

ESTIMACION DE AGUA SUBTERRANEA Y
POLITICAS DE EXPLOTACION PARA LA CUENCA
ALTA Y MEDIA DEL RIO PORTUGUESA

Por
Víctor Cabrera

Tesis para Optar al Grado de
Magister Scientiae en la Opción
Riego y Drenaje

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
INTEGRAL DE AGUAS Y TIERRAS CIDIAT
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MERIDA - VENEZUELA
1980

AGRADECIMIENTO

El autor expresa su sincero agradecimiento al Dr. Hervé Jégat, bajo cuya dirección de desarrolló el presente trabajo y a los demás miembros del Comité de Tesis, Dr. Roger Amisial e Ing. Roberto Duque, por las críticas y sugerencias en los temas tratados en este trabajo.

Este trabajo se realizó gracias a la ayuda de las siguientes instituciones: La Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC, que facilitó la oportunidad para asistir a los estudios; el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, CIDIAT, promotor y organizador de los cursos de Postgrado a la Oficina Central de Coordinación y Planificación, CORDIPLAN, quien otorgó la beca de estudios.

Al personal del CIDIAT que en una u otra forma colaboraron en el desarrollo del presente trabajo.

A la Sra. Marcela de Ruz y a la Srta. Lina Ramírez por mecanografiar el trabajo manuscrito.

INDICE

	Página
AGRADECIMIENTO	ii
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SIMBOLOS	x
RESUMEN	xiv
Capítulo	1
I. INTRODUCCION	1
Objetivos	4
Importancia del Estudio	4
Revisión de Literatura	5
II. EL SISTEMA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RIO PORTUGUESA . . .	9
Ubicación y descripción del área en estudio.	9
Ubicación.	9
Descripción	9
Geología	11
Climatología	13
Precipitación.	13
Temperatura	13
Evaporación	13
Balance Hídrico	14
Información Edafotécnica	14
Suelos	14
Capacidad de Uso	14
Producción	16
III. CONSIDERACIONES SOBRE MODELOS EN AGUAS SUBTERRANEAS . .	19
Generalidades.	19
Modelos Análogos	19
Modelos Híbridos	19

INDICE (Continuación)

	Página
Modelos Digitales	20
Utilidad de Modelos Digitales	20
Modelo de Pinder	21
Ecuaciones utilizadas	21
Condiciones Límites	24
Método Directo en Sentido Alternante, ADI.. . . .	25
Método Iterativo Implícito de la Dirección Alternante, IADI.. . . .	25
Descripción del Programa Pinder	31
IV. CARACTERIZACION DEL ACUIFERO	33
Delimitación.	33
Aspectos Litológicos.	33
Características Hidrogeológicas	34
Permeabilidad	36
Transmisividad	37
Rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento	39
Interpretación de las pruebas por bombeo	40
Método de Jacob	40
Determinación de Recarga.	49
Generalidades	49
Modelo de simulación mensual.	50
Calibración del Modelo.	51
Simulación de la Recarga.	51
Reservas del Acuífero	59
Reservas en Acuífero libre	59
Reservas en Acuífero confinado	60
Cálculo de las Reservas	60
Formas de cálculo en el acuífero libre. . .	60
Forma de cálculo en el acuífero confinado .	61
Discusión de los volúmenes de reserva . . .	62

INDICE (Continuación)

		Página
V.	CALIBRACION DEL MODELO DE PINDER	66
	Criterios para implementar el modelo.	66
	Obtención de datos.	66
	Elaboración de la malla rectangular.	71
	Calibración de Modelo.	77
	Calibración basada en los niveles de agua.	81
VI.	RESULTADOS DE LA SIMULACION.	89
	Discusión General.	89
	Políticas de Explotación.	90
	Explotación Actual.	90
	Alternativas Consideradas.	91
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	97
	Conclusiones.	97
	Recomendaciones.	98
VIII.	LITERATURA CITADA.	100
	APENDICE A: Versión Pinder Modificado.	102
	APENDICE B: Tablas de ubicación de los perfiles litológicos.	111
	APENDICE C: Salida del Modelo. Opción Simulación.	137

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Volumen de agua para riego en el área de influencia del embalse Dos Bocas, Estado Portuguesa	6
2	Distribución de áreas según características de uso actual.	17
3	Superficie por cultivos predominante en el área del proyecto de aguas subterráneas	18
4	Materiales característico y permeabilidad.	36
5	Tipos de suelos por bombeo	41
6	Datos de abatimiento-tiempo, prueba de bombeo realizada con pozo de observación	44
7	Parámetros de los procesos hidrológicos para las sub-áreas seleccionadas en la determinación de la recarga.	52
8	Valores de algunos parámetros de los procesos	55
9	Estaciones pluviométricas consideradas	57
10	Estaciones de evaporación	57
11	Determinación de la recarga para la zona acuífera considerada	58
12	Ajuste de la prueba de bombeo, valores observados y simulados de abatimiento.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Zona del Proyecto de Aguas Subterráneas, Subregión Cuenca Alta y Media del Río Portuguesa, Estado Portuguesa	2
2	Ubicación de la zona de estudio	10
3	Geología característica de la zona	12
4	Clasificación interpretativa de los suelos del estado Portuguesa	15
5	Cuadrícula para el Modelo de Pinder	22
6	Corte isométrico en los ríos Morador y Sarare del Estado Portuguesa	35
7	Isolíneas de Transmisividad.	38
8	Prueba de bombeo a caudal constante, pozo PB-1	45
9	Diagramas esquemáticos de las relaciones tiempo-descenso y tiempo-descenso residual	46
10	Prueba de bombeo de recuperación, pozos PB-7	48
11	Prueba de Bombeo de recuperación, pozo PB-8.	48
12	Esquema detallado de las entradas y salidas de agua en una capa acuífera	50
13	Volumen de escorrentía observada y simulada a la salida de la cuenca del río Acarigua en puente Acarigua, período 69-77.	53
14	Delimitación de las cuencas aguas arriba y abajo de los puntos de aforo	56
15	Reservas de los mantos libres, en función de las fluctuaciones de la superficie piezométrica en el transcurso de un año hidrológico.	59

LISTA DE FIGURAS (Continuación).

Figura		Página
16	Reservas de los mantos confinados	60
17	Relación entre el volumen extraído y el descenso del nivel en el acuífero, zona Morador-Guache.	63
18	Relación entre el volumen extraído y el descenso de nivel en el acuífero, zona Guache-Acarigua	64
19	Relación entre el volumen extraído y el descenso de nivel en el acuífero, zona Acarigua-Sarare	64
20	Mapa de niveles de Agua	68
21	Espesores de acuífero	70
22	Malla rectangular variable	72
23	Malla rectangular constante	72
24	Malla para el modelo Pinder, zona Acarigua-Sarare.	74
25	Malla para el modelo Pinder, zona Guache-Acarigua.	75
26	Malla para el modelo Pinder, zona Morador-Guache	76
27	Representación de valores observados y simulados en una prueba de bombeo, con pozo de observación, durante la calibración primer ajuste	79
27	Representación de valores observados y simulados en una prueba de bombeo, con pozo de observación, durante la calibración, ajuste final.	79
28	Representación de valores simulados y observados en una prueba de bombeo, con pozo de observación	80
30	Variación comparativa de los niveles de agua simulados y observados. Zona Morador-Guache, columna 11 de la malla.	84
31	Variación comparativa de los niveles de agua observada y simulada, zona Morador-Guache, filas 16, 23 de la malla	84
32	Variación comparativa de los niveles de agua simulados y observados, fila 13 de la malla, zona Guache-Acarigua	85
33	Variación comparativa de los niveles de agua simulados y observados, columna 18 de la malla, zona Guache-Acarigua	85

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figuras		Página
34	Variación Comparativa de los niveles de agua simulados y observados, columna 16 de la malla, zona Acarigua-Sarare.	86
35	Variación comparativa de los niveles de agua simulados y observados, filas 20, 26, 35 de la malla, zona Acarigua-Sarare..	86
36	Opción calibración, mapa alfanumérico de abatimiento	87
37	Estado del acuífero después de un año de explotación considerando una extracción cuatro veces más que la explotación actual, zona Acarigua-Sarare	93
38	Estado del acuífero después de un año de explotación considerando una extracción seis veces más que la explotación actual, zona Guache-Acarigua	94
39	Estado del acuífero después de un año de explotación considerando una extracción cinco veces más que la explotación actual, zona Morador-Guache	95

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	<u>Definición</u>
A	Area
BOTTOM	Arreglo que indica la fase del acuífero desde un datum de referencia.
CC	Capacidad de campo
°C	Grados centígrados
CINF	Capacidad de infiltración
DELX(J)	Valor del intervalo entre columna
DELY(I)	Valor del intervalo entre filas
dw	Variación de las reservas en aguas subterráneas
E	Evapotranspiración real
H	Carga hidráulica del acuífero sufrayacente
h	Carga hidráulica
Ha	Hectáreas
HES	Humedad inicial
h_p	Variación de la altura en función de la presión
Hr	Horas
i	Gradiente hidráulico
I, J	Subíndices que indican intervalos de espacio
Ir	Infiltración por aguas superficiales
Iw	Infiltración eficaz
K	Permeabilidad
R	Sub-índice que indica tiempo
Km	Kilómetros

LISTA DE SIMBOLOS (Contn.)

Símbolo	<u>Definición</u>
l	Longitud
ln	Logaritmo natural
l/s	Litros por segundo
m	Espesor del acuífero
M	Metros
M ³	Métros cúbicos
mm	Milímetros
Min	Minutos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NE	Nor-Este
NW	Nor-Oeste
P	Parámetros de aceleración de convergencia
PB	Pozo de bombeo
PERM	Arreglo que indica los valores de la permeabilidad
PUMP	Bombeo
PZ	Piezómetro
Q	Caudal
Qe	Surgencias de aguas subterráneas
Qex	Pozos de explotación de! agua subterránea
Qs	Salida en flujo superficial
qs	Aportes de aguas superficiales
Qw	Vertido de la capa acuífera
qw	Aportes de agua subterránea

LISTA DE SIMBOLOS (Contin.)

Símbolo	<u>Definición</u>
R	Escorrentía superficial
r	Distancia al pozo de observación
RATE	Arreglo que indica el espesor de la capa semiconfinante o cuando la carga es constante
S	Coefficiente de almacenamiento
s	Abatimiento
s''	Abatimiento residual
SE	Sur-Este
SL	Rendimiento específico
STRT	Arreglo que indica la carga hidráulica
SW	Sur-Oeste
T	Transmisividad
t	Tiempo
t''	Tiempo del descenso residual
TOPE	Arreglo que indica el techo del acuífero confinado
μ	Valor de la función de pozo
V	Velocidad
W	Función de entrada o salida por unidad de área de cualquier caudal bombeado o recarga
WTABLE	Elevación del agua en lagos, ríos o capa confinante
Δ	Incremento
∞	Infinito
ϵ	Epsilon

LISTA DE SIMBOLOS (Contin.)

Definición

Símbolo

∂	Derivada parcial
π	Número pi
Σ	Sumatoria

RESUMEN

El propósito del presente trabajo consiste en hacer una estimación de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo y establecer políticas de explotación, para la cuenca Alta y Media del Río Portuguesa. Esto forma parte del estudio global de Planificación de las Aguas Subterráneas, con fines de riego en Venezuela.

El área bajo estudio está comprendida entre los ríos Morador y Sarare, en una faja de 40 km de ancho, partiendo del Piedemonte de los Andes Venezolanos.

Se delimitó la zona acuífera tanto en extensión areal como en profundidad hasta 80 metros. Luego se consideraron los datos hidrogeológicos, partiendo de la litología predominante y pruebas por bombeo, niveles de agua, estableciendo la magnitud de las reservas acuíferas subterráneas. Para la determinación de la recarga, se utilizó un modelo de simulación mensual para determinación de la escorrentía.

Posteriormente se utilizó el Modelo de Pinder, modificado por Jégat (1977), se procedió a calibrar el modelo. Posteriormente, basado en estimaciones de la explotación actual, que es de 183 millones de metros cúbicos se hicieron algunas consideraciones sobre políticas de explotación, comparada con la recarga que es de 360 millones de metros cúbicos. El volumen factible de extraerse del acuífero no se limitó únicamente a la recarga sino que se consideraron otras políticas de explotación.

Para la zona Acarigua-Sarare se incrementó cuatro veces la explotación actual, en la zona Guache-Acarigua seis veces y la zona Morador Guache cinco

veces. Se observó en cada área las zonas de descenso del nivel de agua según estas alternativas escogidas.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Las necesidades de agua en la actualidad aumentan considerablemente debido a la creciente demanda de alimentos causada por el desarrollo urbano, industrial y agrícola. Por esta razón deben definirse lineamientos estratégicos, en cuanto a recursos hidráulicos se refiere, adaptados a la realidad específica, de una o varias regiones.

La Cuenca Alta y Media del río Portuguesa, que es la zona donde se encuentra ubicada el área sobre estimación de los recursos subterráneos, Figura 1, cuenta con tierras de gran calidad agrológica y una agricultura desarrollada. Este factor hace que su economía sea básicamente agropecuaria y, a la vez un gran aporte a la economía de Venezuela.

Lo anterior obligó a las entidades encargadas de la administración y planeamiento de los recursos hidráulicos a desarrollar estudios con el bien de garantizar el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos y superficiales, dentro del marco de la conservación y racionalización de estas dos fuentes de agua, procurando la continuidad y permanencia del ciclo hidrológico.

La zona en estudio está comprendida entre los ríos Morador y Sarare, en dirección SW-NE, limitada por el piedemonte a lo largo de la carretera Troncal V.

Los ríos Acarigua, Sarare, Morador, Ospino y Guache son los más importantes que cruzan el área y todos son tributarios del río Portuguesa, constituyendo las fuentes principales de aguas superficiales para la zona. Dadas las

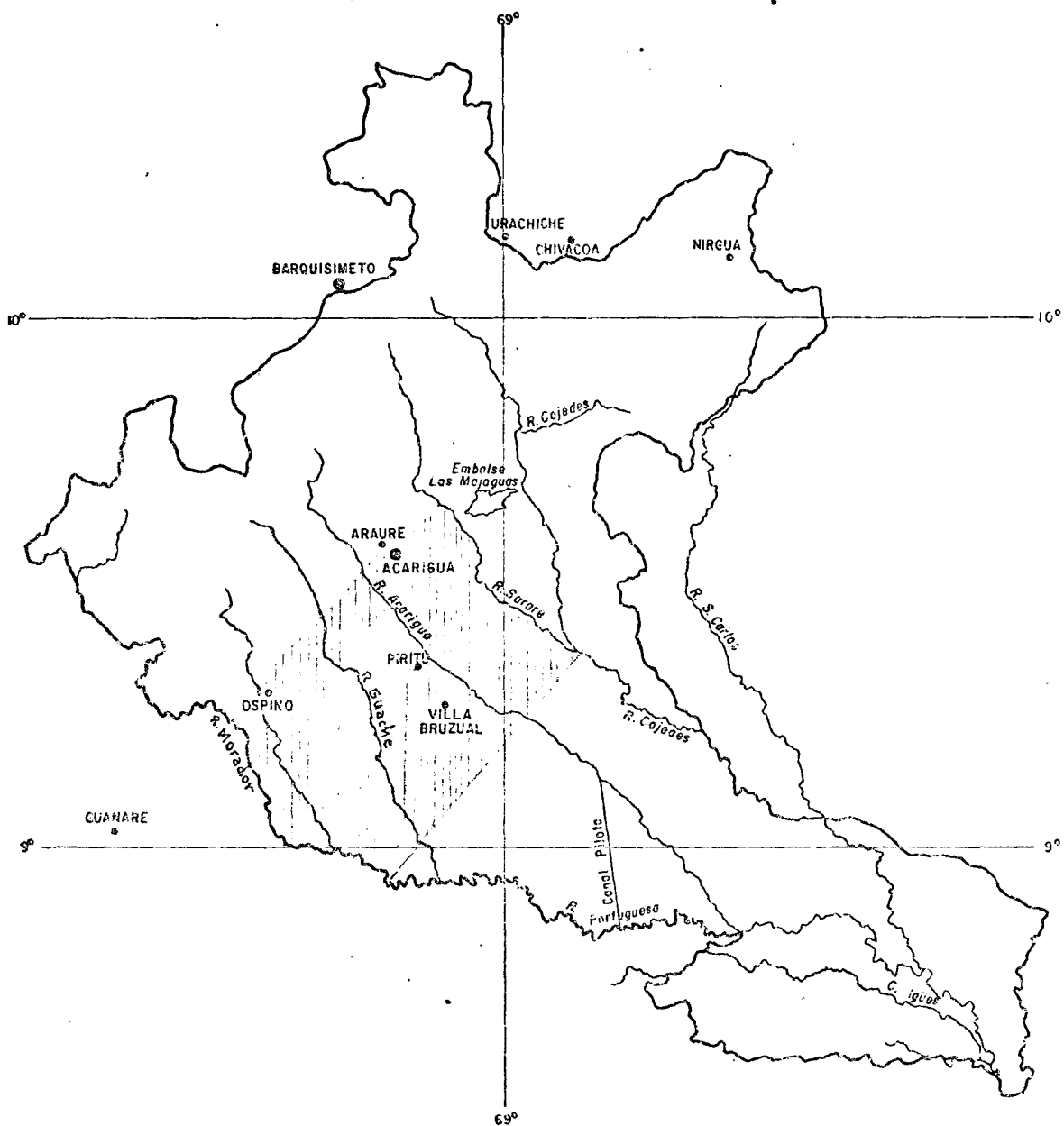


Figura. 1. Zona del proyecto de aguas subterráneas, subregión cuenca alta y media del río Portuguesa, Estado Portuguesa.

fuertes pendientes, antes de entrar en el piedemonte, los ríos fluyen con velocidades que se traducen en un alto poder de erosión y transporte de sedimentos. Esta zona constituye un medio de ablación, donde los materiales arrastrados son depositados al cambiar la pendiente, lo que ocurre al contacto piedemonte-llanos.

El fenómeno deposicional es importante desde el punto de vista hidrogeológico, ya que tales depósitos forman un aluvión de constitución altamente permeable, en el cual abunda el agua subterránea. El uso del agua subterránea ha sido la principal fuente de abastecimiento de la producción agrícola y el consumo humano en esta región.

En la subregión Cuenca Alta y Media del río Portuguesa, existe un sólo sistema tradicional de riego que se abastece a partir del embalse Las Majaguas permitiendo el aprovechamiento de unas 8000 Ha. Para satisfacer la eventual demanda de agua tanto agrícola como doméstica, existe otra serie de embalses cuya construcción está prevista a corto plazo, tal como el embalse Dos Bocas sobre el río Acarigua, para una capacidad total de 654 millones de metros cúbicos. Con este embalse es factible regar unas 4000 Ha y también una derivación para el consumo humano (FUDECO, 1978).

El embalse Morador, sobre el río Morador, presenta una capacidad para regar unas 20000 Ha. Por otra parte se piensa utilizar el embalse Las Vueltas sobre el río Sarare, para recargar el acuífero y regar con agua subterránea unas 2000 Ha, o bien implementar un sistema de riego tradicional. Igual situación presenta el embalse Las Margaritas, ubicado al norte del poblado Agua Blanca, para una superficie regada de 4000 a 6000 Ha.

En la actual dependencia que existe de la explotación del agua subterránea, se concibió el presente estudio, que cubre una superficie de 3000200 Ha, siendo importante considerar la interrelación física del agua superficial y planificar un uso conjunto de estas dos fuentes de abastecimiento. Actualmente se está llevando a cabo el estudio sobre aguas subterráneas, a través de un convenio con el Ministerio de Agricultura y Cría, bajo la dirección del Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal estimar las disponibilidades del recurso hídrico subterráneo y establecer políticas de explotación. Para ello es necesario:

1. Identificar el acuífero en cuanto a su extensión areal, profundidad y parámetros hidrogeológicos.
2. Establecer las fuentes de recarga y su influencia en el acuífero
3. Estudiar el comportamiento del acuífero considerando distintas estrategias de explotación.

Importancia del estudio

Actualmente se ha dado importancia al recurso hídrico subterráneo como una fuente de abastecimiento, tanto doméstico como industrial y agrícola.

El estudio permitirá cuantificar la disponibilidad del agua subterránea existente. Considerándose la región como una de las zonas más ricas en volúmenes de aguas subterráneas, es también determinante establecer diferentes es-

trategias de explotación que permitan un manejo racional de este recurso, con siderándose posteriormente llegar a optimizar el uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales.

Las instituciones podrán planificar mejor el uso de los recursos hídricos, acorde al desarrollo integral de la región, identificando y formulando alternativas de abastecimiento según las zonas de demanda, con énfasis en el incremento de áreas para riego.

Revisión de Literatura

En base a estudios muy generales la Comisión del Plan Nacional de Aprovechamientos de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH, 1970), considera que la planicie aluvial del Piedemonte de los Andes Venezolanos, es una zona muy abundante en aguas subterráneas, diferenciada de la manera siguiente:

- Zona principal, formada por una faja de 40-50 Km de ancho por 300 Km de longitud, desde el río Suripa hasta el río San Carlos.
- Una zona de 4000 Km² en el alto valle del río Sarare, en el Estado Portuguesa.
- La zona norte de la cuenca del río Acarigua.

El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables de Venezuela (1978), en el Diagnóstico de la Cuenca Alta y Media del río Portuguesa, considera que el aprovechamiento de los acuíferos, aparece por debajo de las potencialidades previsibles, pudiéndose obtener mayor desarrollo in tensivo de este recurso. También considera que la subregión dispone de ex cedentes en recursos hídricos, respecto al consumo urbano, industrial y agrícola centrándose la mayor utilización en el agua subterránea. El

uso de las aguas superficiales está concentrado en el sistema de riego Las Majaguas, cuyo crecimiento se ha limitado a solamente unas 800 a 1000 Ha anuales, debido principalmente a problemas de organización campesina. El uso de las aguas subterráneas, se ha concentrado alrededor de la producción agrícola, alcanzando una 6000 Ha bajo riego.

FUDECO (1976) realizó una encuesta para la zona de influencia del proyecto Dos Bocas, y, determinó que el 82% de los aprovechamientos de agua, provenían del recurso hídrico subterráneo y el resto de derivaciones de caños y ríos. Además, estableció información sobre el gasto bombeado, horas diarias de operación y época en que se regaba; posteriormente estimó el volumen de agua utilizada en invierno y en verano, Tabla 1.

Tabla 1 Volumen de agua para riego en el área de influencia del embalse Dos Bocas, Estado Portuguesa.

Fuente	Nº de pozos o derivaciones	Volumen utilizado en invierno ($m^3 \times 10^6$)	Volumen utilizado en verano ($m^3 \times 10^6$)	Volumen total ($m^3 \times 10^6$)
Aguas subterráneas	138	55,70	79,10	134,80
Aguas superficiales	27	16,80	12,80	29,60
Total	165	72,50	91,90	164,40

Fuente: FUDECO (1976)

La complejidad tectónica que caracteriza a los Andes Venezolanos, ha provocado desajustes en el régimen de sedimentación en la zona de piedemonte observándose acumulaciones irregulares de material aluvial.

Los sedimentos recientes son una secuencia alternante de estratos permeables e impermeables con materiales muy gruesos depositados en la cuenca continental del Piedemonte (MOP, 1973). Mientras más se avanza en la llanura, mayor es el predominio de acuicludos, lo cual ocasiona un acuñaamiento de los acuíferos.

El Ministerio de Obras Públicas (1973), ubica cuatro franjas de trasmsividad, que van en valores desde 200 hasta 4000 m³/día/m para toda la zona Piedemonte, estableciéndose que los valores más altos, entre 3000 y 4000 m³/día/m se encuentran en las cercanías de los ríos y al inicio del Piedemonte. También considera que la "máxima acumulación de grava gruesa y arena, hasta 70 m, fue depositada entre los ríos Masparro y Morador con sólo 5% de material impermeable cerca del Piedemonte". El porcentaje de acuicludos aumenta hacia el río Sarare. El aumento de los estratos impermeables es del 3% al 36% abajo del flanco montañoso del río Acarigua.

Actualmente en la zona, la profundidad promedio de pozos es de 60 m, y según el Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1969), se han hecho perforaciones hasta 250 m de profundidad, identificándose sedimentos compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas.

Con el objeto de conocer la calidad del agua subterránea, FUDECO (1976) hizo un análisis físico-químico, considerando también el agua superficial para fines de abastecimiento humano y de riego. Estableció que son aguas sin muchas restricciones para uso agrícola y de abastecimiento urbano.

El MARNR (1978), clasifica las aguas subterráneas entre las clases $C_1 S_1$ y $C_2 S_1$, o sea aguas con poco peligro de salinidad y sodificación de los suelos, y $C_3 S_1$ con alguna restricción en cuanto a aplicación con buen drenaje u cultivos tolerantes, como la caña de azúcar, arroz y pastos.

Según Todd (1973), el rendimiento de seguridad de un acuífero es la cantidad de agua que se puede extraer anualmente sin producir un quebranto en las reservas. Cualquier extracción en exceso produce una sobreexplotación del rendimiento de seguridad.

En forma general, se puede decir que el rendimiento de seguridad es el equivalente a la cantidad de agua que entra al acuífero como recarga, ya sea en forma natural o artificial. Es decir, que la máxima cantidad de agua a extraer anualmente de la reserva subterránea sin llegar a una sobre explotación es el equivalente a la recarga o rendimiento de seguridad.

CAPITULO II

EL SISTEMA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RIO PORTUGUESA

Ubicación y descripción del Area de Estudio

El área que comprende el proyecto sobre estimación del agua subterránea, la constituyen tierras con gran potencial agrícola, formada por una planicie aluvial de materiales depositados por los ríos que atraviesan la zona.

Ubicación

El estudio se encuentra ubicado en la región de los Llanos Altos Occidentales en el Estado Portuguesa y se delimita de la siguiente manera; Figura 2.

Referencia	Latitud	Longitud
Río Morador-Carretera Troncal V	9° 16'	69° 31'
Poblado Agua Blanca	9° 40'	69° 06'
Caserío Sabana en Medio	9° 08' ¹	69° 16' ^{69° 15'}
Caserío Los Chinos	9° 21' ₂	69° 51' ₂

Tiene como límite el Piedemonte de los Andes Venezolanos que va a lo largo de la carretera Troncal V, en un tramo de 73 Km y considerando un ancho de 40 Km de la carretera, en línea recta imaginaria, entre los caseríos Sabana en Medio y los Chinos.

Descripción

Los ríos más importantes que cruzan el área en dirección NW-SE, son el Sarare, Acarigua, Guache, Ospino y Morador, todos afluentes del río Portuguesa.

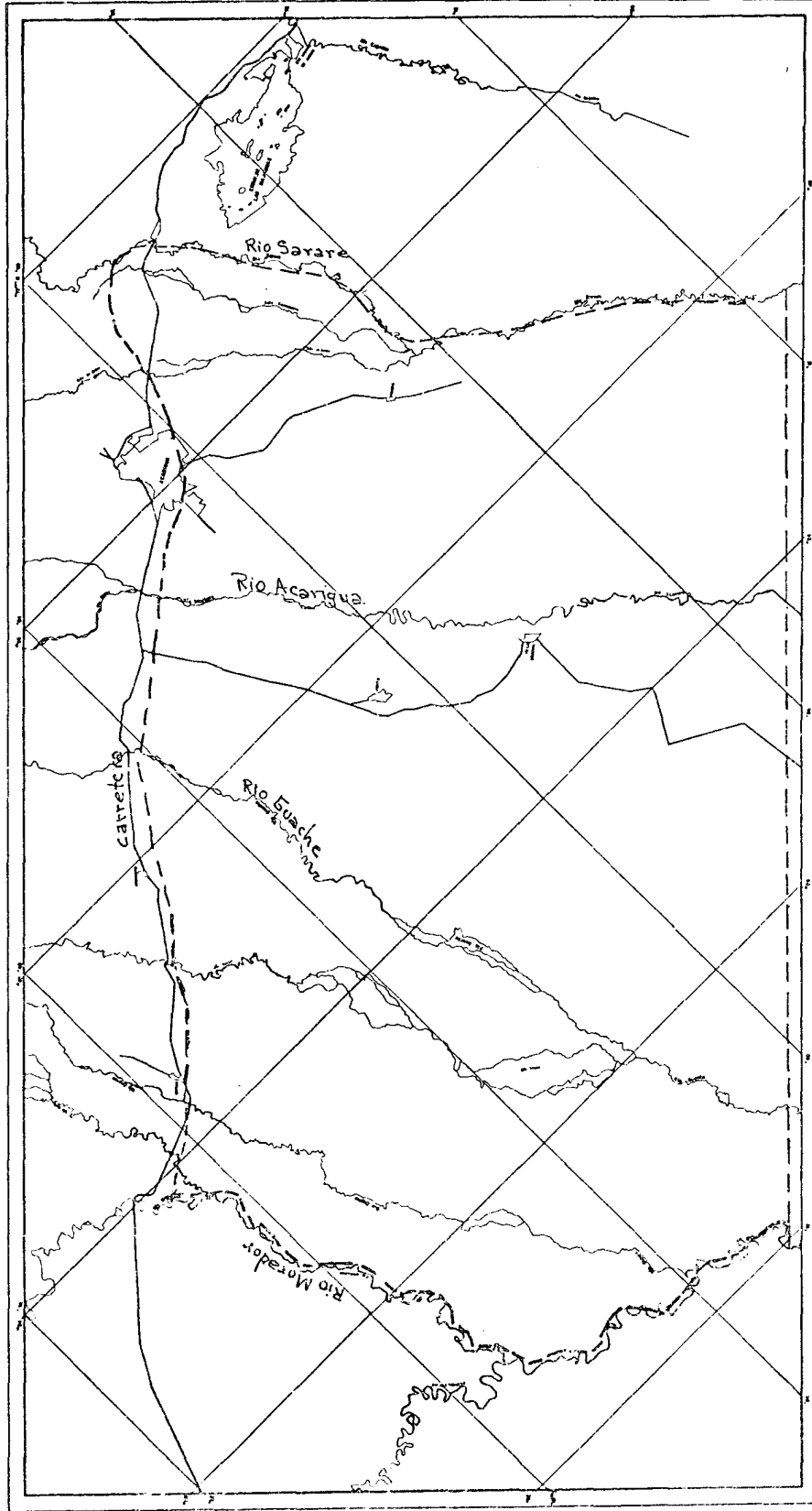


Figura 2. Ubicación de la Zona de Estudio. (---)

El sistema cuenta con el embalse Las Majaguas que tiene con una capacidad útil de 328 millones de m^3 de agua. Existen otros embalses proyectados a corto plazo tales como el embalse Las Margaritas, en la hoya del Sarare, con 43,70 millones de m^3 de capacidad útil y el embalse Morador sobre el río Morador.

Geología

La Cordillera Andina formada por rocas sedimentarias Pleistocenas a Cretáceo inferior, bordea toda la zona que caracterizada por haberse originado a partir de depósitos aluviales recientes, Figura 3. Estos depósitos es tán compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, depositadas en diferentes estratos, con valores de permeabilidad variable. A los lados de los ríos y al inicio del Piedemonte se detectan zonas de altas transmisividades, debido a que existen grandes acumulaciones de gravas gruesas y arena. Lo contrario ocu rre hacia abajo, donde la pendiente es más suave y se observan inundaciones; así mismo el material depositado es más fino. Rocas con permeabilidad entre bajas y medias se encuentran entre Guanare y Ospino, donde aflora la formación río Yuca.

Los sedimentos granulares predominantemente permeables, donde se consi dera un alto rendimiento de los acuíferos, se encuentran entre los ríos Guache y Sarare. En esta zona se observan transmisividades entre 1500 a 3000 $m^2/día$.

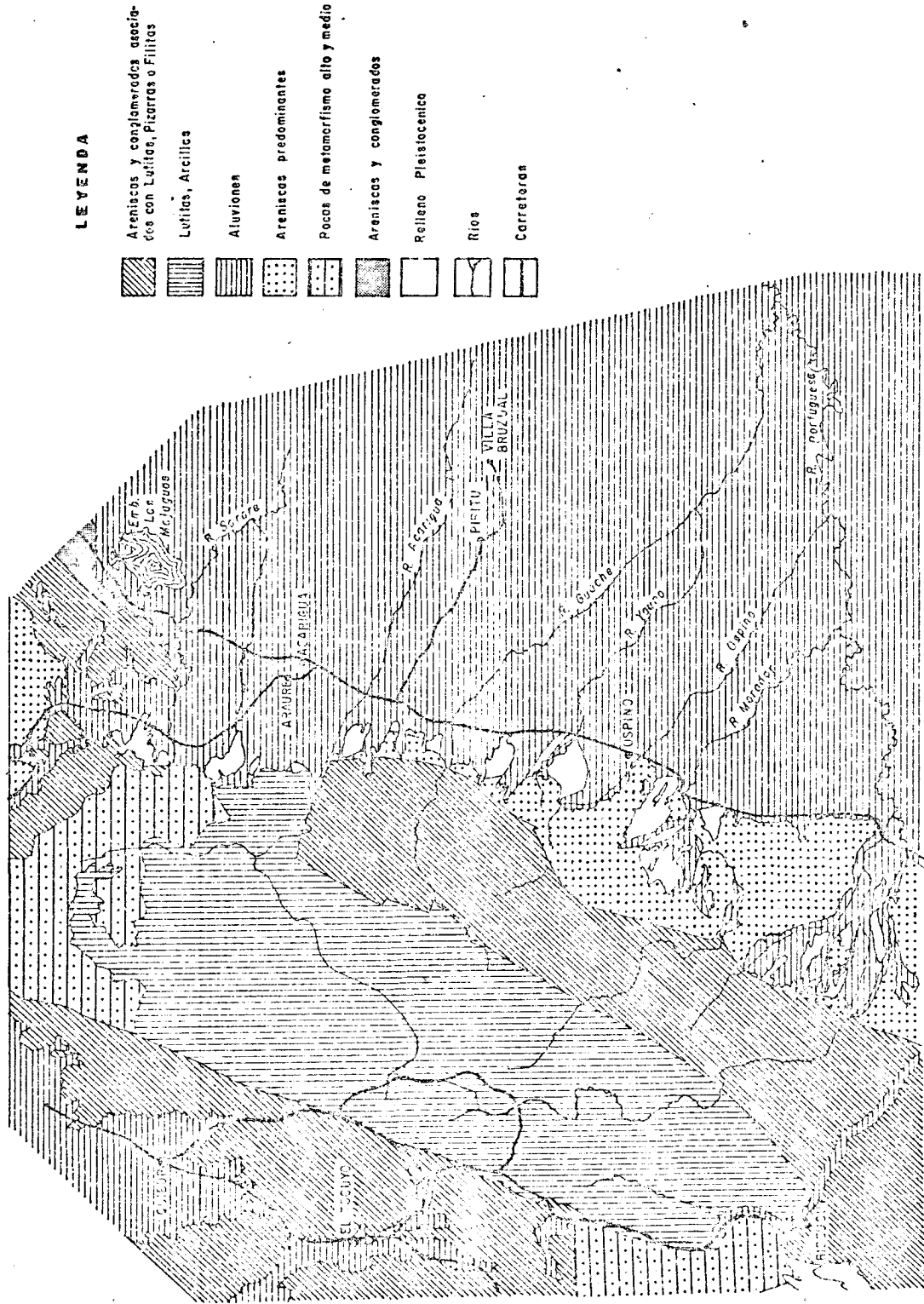


Figura 3. Geología superficial en la cuenca alta y media del río Portuguesa

Climatología

Precipitación

La precipitación varía entre 1200 y 1600 mm anuales, considerándose dos épocas bien definidas: el período seco durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, donde el promedio mensual es 50 mm; un período lluvioso donde se concentra el mayor volumen de lluvias (1100 mm) en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, siendo los meses de noviembre y abril épocas de transición entre una estación a otra.

Temperatura

La temperatura media anual de la zona es de 27°C. Las temperaturas más altas se registran en los meses de marzo y abril, cuyo promedio máximo es de 28,50°C y la temperatura promedio mínima es de 21°C, registrada en los meses de junio y julio.

Evaporación

La evaporación media anual varía desde 1600 hasta 1900 mm. Durante el año se registra una evaporación media mensual de 160 mm, con una mínima de 110 mm en junio y una máxima de 280 mm en abril.

Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1960), la subregión se ubica dentro del grupo ecológico de bosque seco tropical, cuyas características climáticas son semejantes a las descritas. En este grupo ecológico se considera una relación entre la evapotranspiración potencial anual y la lluvia entre 0,90 y 2,00.

Balance hídrico

Según el MARNR (1978) en la zona de los llanos el período deficitario va de diciembre a abril. En esta época la demanda bruta alcanza unos 1100 mm/año, equivalente a unos 11000 m³/Ha/año.

Información Edafotécnica

Suelos

Los suelos en el área del proyecto varían según se aleja del Piedemonte; los suelos cercanos a este son en su mayoría de texturas medias con altos contenidos de limos, bien drenados. Los suelos de textura fina se observan más hacia el llano y varían entre limosos y arcillosos a francos; estos suelos generalmente presentan problemas de drenaje.

El pH va de ligeramente ácido a neutro, o alcalinos y presentan altas saturaciones de bases en todo el perfil con poco desarrollo pedogenético.

En la clasificación interpretativa de los suelos en base a su fertilidad FONAIAP (1969) presenta un mapa, Figura 4, donde se observa la distribución de los suelos de acuerdo a su textura.

Capacidad de uso

Los suelos que se observan en la zona, de acuerdo a su capacidad de uso, se definen de la siguiente manera: la clase I, que son suelos con muy pocas limitaciones en su uso para un amplio margen de cultivos, pastos, bosques

y vida silvestre; los suelos son casi planos, profundos, bien drenados, fáciles de laborar, con buena capacidad de retención de humedad. La Clase II incluye algunas limitantes y requieren moderadas prácticas de manejo para mejorar la relación agua-suelo-planta; tiene pendientes suaves y moderadamente susceptibles a la erosión y aparecen daños ocasionales por inundaciones pero corregibles con drenaje. La Clase III, incluye terrenos con fuertes limitaciones que reducen la elección de plantas y/o requieren prácticas de manejo y conservación y la Clase IV tiene severas limitaciones con mucha susceptibilidad a la erosión, fuertes pendientes, excesiva humedad e inundaciones frecuentes que afectan severamente los cultivos.

Las clases principalmente pecuarias son la Clase V y VI, aptas para pastos, bosques y vida silvestre.

La zona no cuenta con un estudio de suelo completo a nivel de semidetalle, salvo para algunas zonas muy localizadas, tal como Turén, Las Majaguas, y El Playón, los cuales se han considerado en este trabajo.

Producción

La subregión Cuenca Alta y Media del río Portuguesa se caracteriza por ser una zona que participa en un gran aporte a la economía agrícola de Venezuela, principalmente en lo que se refiere a la producción vegetal. Dentro de la zona del estudio de aguas subterráneas, la distribución de áreas según cultivo o característica vegetativa se presenta de la siguiente manera, Tabla 2.

Tabla 2 Distribución de áreas según características de uso actual

Descripción	Superficie en Ha
Áreas urbanas y relacionadas	6860
Caña de azúcar	14645
Cítricos	100
Cereales, fibras, oleaginosas y leguminosas	159180
Tabaco	850
Pastizales establecidos	39490
Pastos naturales no arbolados	370
Pastos naturales arbolados	3460
Bosque natural denso bajo (3-20 m de altura)	11640
Bosque natural ralo bajo	46240
Rastrojos y matorrales	4250
Cuerpos de agua	4120

El área sobre la cual se ha considerado el proyecto de aguas subterráneas, es aproximadamente de 300200 Ha. Es importante también considerar que el 95% de la producción lo aportan los cultivos considerados en la Tabla 2 y el Ministerio de Agricultura y Cría, para el año 1979, estableció la distribución del área según cultivo para la zona.

Tabla 3 Superficie por cultivo predominante, en el área del proyecto de aguas subterráneas

Cultivos	Superficie en Ha
Maíz	43500
Arroz	48400
Sorgo	26250
Caraota	3995
Frijol (Cajanus)	796
Algodón	3550
Ajonjolí	43300
Yuca	3180
Tabaco	850
Caña de azúcar	14645

Para implementar la zona bajo riego, será necesario establecer, además de las redes generales de riego, a redes de drenaje y vialidad. En algunas zonas como Turén, Santa Rosalía y el Playón se tienen sistemas de drenaje superficial establecidos; ésta es una de las zonas donde la explotación del acuífero es bastante grande.

CAPITULO III

CONSIDERACIONES SOBRE MODELOS EN AGUAS SUBTERRANEAS

MODELO DE PINDER

Generalidades

El análisis de los problemas concernientes al comportamiento de los acuíferos y su evolución en el tiempo ha venido realizándose con la utilización de modelos que permiten simular la variación de los niveles de agua en el tiempo. Para dar una solución al movimiento del agua en un acuífero cualquiera, existen diferentes tipos de modelos (Amisial y Jegat, 1976).

Modelos analógicos

Se basan en aproximaciones de diferencias finitas de las ecuaciones del flujo; consisten en una red de resistencias y condensadores que pueden ser considerados analógicos a la transmisividad y almacenamiento del acuífero. Estos modelos son más realísticos y versátiles que las soluciones analíticas, y han sido desarrollados para varios acuíferos complejos.

Modelos analógicos

Son técnicas mediante las cuales se reemplazan las ecuaciones diferenciales por un sistema mixto de ecuaciones continuas con respecto a una variable, pero discretas con respecto a las demás. La solución del sistema de ecuaciones se lleva a cabo en una computadora analógica que permite la integración en forma continua con respecto a la variable no discretizada.

Modelos híbridos

Son similares a los modelos analógicos con la diferencia de que en la

solución del sistema mixto de ecuaciones, se utiliza la combinación de una computadora digital y de una analógica que operan en paralelo. La solución puede llegar a ser muy eficiente si la computadora híbrida cuenta con suficiente capacidad para asignar a la parte analógica las operaciones tales como integración, generación de funciones y multiplicación mientras que la digital hace a la vez de supervisor del flujo de operación y realiza las operaciones lógicas y de almacenamiento.

Modelos digitales

Son técnicas que permiten reemplazar las ecuaciones del flujo por un sistema de ecuaciones lineales cuyas variables son estimadas en un número finito de puntos. Este método puede utilizar una aproximación por diferencias finitas al sustituir las derivadas por variaciones lineales de las variables, en un intervalo de tiempo. También puede ser usado el método de elementos finitos, que consiste en la formulación del problema, basándose en la teoría del cálculo variacional.

Utilidad de Modelos Digitales

Los modelos se utilizan con el fin de estudiar el comportamiento de un acuífero ante distintas alternativas de uso de aguas subterráneas, pero en otros casos se han utilizado para estudios de drenajes agrícolas, redes de filtración de presas, acuíferos conectados con embalses y movimiento de contaminantes en acuíferos.

Para la resolución de estos problemas, la técnica de simulación a utilizar puede ser analógica, híbrida o digital, dependiendo en todo caso del equipo disponible. Los modelos digitales tienen la ventaja de una mayor flexi

bilidad para resolver cualquier problema de límites cambiantes, estado inicial de la carga hidráulica y cambios de transmisividad en acuíferos libres.

Modelo de Pinder

Pinder (1966) utiliza el método iterativo implícito de la dirección alternante para evaluación de acuíferos. El modelo se aplica a acuíferos confinados, libres y semiconfinados; heterogéneos y anisotrópicos, considerando flujo bidimensional y no permanente.

Ecuaciones utilizadas

Las ecuaciones utilizadas para representar el flujo en acuíferos confinados, libres y semiconfinados (Amisial y Jégat 1976) son:

Acuíferos confinados

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W(x,y,t) \quad (1)$$

S : coeficiente de almacenamiento

T_x, T_y: la transmisividad

h : carga hidráulica

W : es la función de entrada o salida por unidad de área, que incluye cualquier caudal de bombeo de un pozo y/o de recarga de un pozo, río o lago.

Acuíferos libres

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} + W(x,y,t) \quad (2)$$

K_x, K_y : conductividad hidráulica

S_y : rendimiento específico del acuífero libre

h : espesor saturado del acuífero

Acuífero semiconfinado

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{K'}{m} (H-h) + W(x,y,t) \quad (3)$$

K : conductividad hidráulica de la capa semiconfinante

m : espesor de la capa semiconfinante

H : carga hidráulica del acuífero suprayacente, altura de lagos o ríos. Es constante en el tiempo.

En la resolución de las ecuaciones se debe considerar lo siguiente:

En el centro de cada rectángulo están los puntos o nodos, donde se estudia la variación de la carga hidráulica en el tiempo, Figura 6.

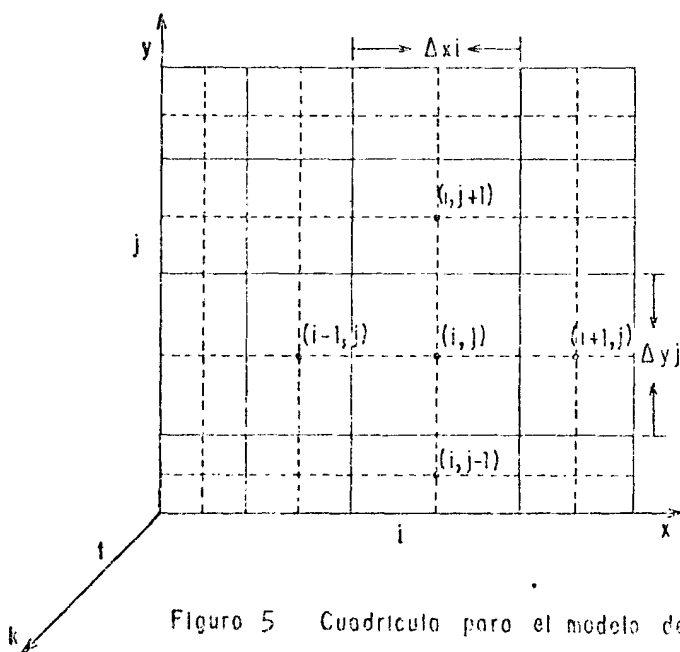


Figura 5 Cuadrícula para el modelo de Pinder

Mediante las medias armónicas de la transmisividad, la ecuación que representa el flujo en un acuífero confinado puede ser discretizada en la siguiente forma implícita, Pinder (1970).

$$\begin{aligned}
 & T_{i-1/2,j} \left(\frac{h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta x_i} \right) + T_{i+1/2,j} \left(\frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta x_i} \right) + \\
 & T_{i,j-1/2} \left(\frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta y_j} \right) + T_{i,j+1/2} \left(\frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta y_j} \right) = \\
 & S_{i,j} \frac{h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1}}{\Delta t_k} = W_{i,j,k} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$T_{i-1/2,j} \text{ es la media armónica de } \frac{T_x(i,j)}{\Delta x_i} \text{, y, } \frac{T_x(i-1,j)}{\Delta x_{i-1}}$$

o sea:

$$T_{i-1/2,j} = \frac{2T_x(i,j) T_x(i-1,j)}{T_x(i,j) \Delta x_{i-1} + T_x(i-1,j) \Delta x_i} \quad (5)$$

La función de entrada o salida $W_{i,j,k}$ puede tomar las dos formas siguientes:

a) En caso del bombeo o caudal constante $q_{i,j}$ de un pozo ubicado en el punto de coordenadas $i\Delta x, j\Delta y$.

$$W_{i,j,k} = \frac{q_{i,j}}{\Delta x_i \Delta y_i}$$

b) En caso de una filtración desde una capa semi-confinante

$$W_{i,j,k} = (h_{i,j,0} - h_{i,j,k}) \frac{K'}{\ell_{i,j} (\pi K' tk/2\ell_{i,j}^2 S_s)^{1/2}} \times$$

$$\left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2}{K' tk/2\ell_{i,j}^2 S_s}\right) \right] + \frac{K'}{\ell_{i,j}} (h_{i,j,0} - \hat{h}_{i,j,0}) \quad (6)$$

$h_{i,j,0}$: carga inicial en el acuífero

$h_{i,j,0}$: carga en la capa confinante, o elevación en lagos y ríos

k' : permeabilidad en la zona semiconfinante

S_s : almacenamiento específico en la capa semiconfinante

$P_{i,j}$: espesor de la capa semiconfinante en el punto (i,j)

En acuíferos libres, la ecuación 2 no tiene una forma lineal y, para linealizarla, se expresa la transmisividad al tiempo $k + 1/2$, usando el valor de la carga al tiempo k o sea:

$$T_{i,j} = k_{i,j} \cdot T_{i,j,k} \text{ para el cálculo de } h_{i,j,k+1/2}$$

y

$$T_{i,j} = k_{i,j} \cdot T_{i,j,k+1/2} \text{ para el cálculo de } h_{i,j,k+1}$$

Condiciones Límites

Las condiciones en los límites para efectos de simulación pueden ser:

a) Impermeable, cuando el acuífero tiene contacto con mantos de roca o bien zonas de arcillas compactadas que no permiten el paso de agua; para este caso los valores de transmisividad son iguales a cero en el punto considerado o sea $T_{i,j} = 0$

b) Carga constante, cuando existen cuerpos de agua ya sean ríos, lagos, embalses que permiten recargar al acuífero constantemente en función de la carga hidráulica.

c) Flujo constante, cuando al acuífero entra o sale determinado flujo de agua en forma constante.

Método directo en sentido alternante (ADI)

Este método fue desarrollado por Peaceman y Rachford (1955). La idea del método es:

- a) Dibujar una malla con contorno exterior rectangular.
- b) Dividir el Δt en dos partes
- c) Resolver el sistema para el instante $t + \Delta t/2$ barriendo fila por fila. Se consideran como incógnitas los niveles $t + \Delta t/2$ en la fila calculada, mientras que los niveles en las filas anterior y posterior se suponen conocidos con el valor correspondiente a t .
- d) Partiendo de $t + \Delta t/2$, resolver el sistema para $t + \Delta t$ barriendo columna por columna. Se consideran como incógnitas los niveles en $t + \Delta t$ en la columna calculada, mientras que los niveles en las columnas anterior y posterior se suponen conocidos con el valor correspondiente a $t + \Delta t/2$.

Concluido todo el proceso, se tienen los niveles de agua en cada nodo en $t + \Delta t$. Con esto queda finalizado el cálculo para el intervalo Δt . Por lo tanto, no se trata de un método iterativo, ya que los valores finales se obtienen directamente, mediante 2 rastreos de la malla sin necesidad de aplicar ningún criterio de error.

Método Iterativo Implícito de la Dirección Alternante

(IADI)

Con el fin de mejorar el método anterior, se desarrolló la versión iterativa. Esencialmente es igual que el ADI; esto es, que realiza rastreos alternativos de la malla, unas veces en dirección de las columnas y otras ve-

ces en dirección de las filas. Sin embargo, existen tres diferencias derivadas del carácter iterativo.

Cada dos rastreos de la matriz no completan un intervalo de tiempo, sino que completan una iteración. Esto permite variar progresivamente la transmisividad en función del nivel obtenido en cada iteración, por lo cual puede aplicarse a los problemas no lineales que se presentan al tratar acúferos libres.

Se considera terminado el cálculo del intervalo cuando el error es aceptable, según un criterio prefijado.

Para mejorar la eficiencia del proceso iterativo se incluye una serie de parámetros de aceleración de la convergencia, números positivos y reales.

El sistema de ecuaciones puede ser resuelto con este método. El método aumenta considerablemente el tiempo y los requerimientos de memoria de la computadora pero es más preciso.

Es posible explicar este método demostrando que las ecuaciones se modifican de dos maneras diferentes, de modo que en cada expresión los valores desconocidos de la carga hidráulica corresponden sólo a una dirección de coordenadas (Beltran, 1976).

Esto se efectúa iterativamente para cada fila y luego se repite el procedimiento para las columnas.

Cálculo fila por fila

Se consideran incógnita los valores de la carga hidráulica de la fi-

la "j" y se hace variar "i".

Los valores conocidos son identificados con el término $h_{i^0,j,k}$ y los desconocidos $h_{i^1,j,k}$,

La ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & T_{i-1/2,j} \left(\frac{h_{i^1-1,j,k} - h_{i^1,j,k}}{\Delta x_i} \right) + T_{i+1/2,j} \left(\frac{h_{i^1+1,j,k} - h_{i^1,j,k}}{\Delta x_i} \right) + \\
 & T_{i,j-1/2} \left(\frac{h_{i^0,j-1,k} - h_{i^0,j,k}}{\Delta y_j} \right) + T_{i,j+1/2} \left(\frac{h_{i^0,j+1,k} - h_{i^0,j,k}}{\Delta y_j} \right) = \\
 & S_{i,j} \left(\frac{h_{i^1,j,k} - h_{i^1,j,k-1}}{\Delta t_k} \right) + W_{i,j,k+P} (h_{i^1,j,k} - h_{i^0,j,k}) \quad (7)
 \end{aligned}$$

Ordenando las ecuaciones de forma que en el primer miembro queden las incógnitas y en el segundo los valores conocidos se tiene:

$$\begin{aligned}
 & \frac{T_{i-1/2,j}}{\Delta x_i} h_{i^1-1,j,k} + \left(-\frac{T_{i-1/2,j}}{\Delta x_i} - \frac{T_{i+1/2,j}}{\Delta x_i} - \frac{S_{i,j}}{\Delta t_k} - P \right) h_{i^1,j,k} + \\
 & \frac{T_{i+1/2,j}}{\Delta x_i} h_{i^1+1,j,k} = -\frac{T_{i,j-1/2}}{\Delta y_j} h_{i^0,j-1,k} + \left(\frac{T_{i,j-1/2}}{\Delta y_j} + \frac{T_{i,j+1/2}}{\Delta y_j} - \right. \\
 & P \left. \right) h_{i^0,j,k} + T_{i,j+1/2} h_{i^0,j+1,k} - S_{i,j} h_{i^1,j,k-1} + W_{i,j,k} \quad (8)
 \end{aligned}$$

definiendo

$$A_i = \frac{T_{i-1/2,j}}{\Delta x_i}$$

$$B_i = \frac{T_{i-1/2,j}}{\Delta x_i} - \frac{T_{i+1/2,j}}{\Delta x_i} - \frac{S_{i,j}}{\Delta t_k} - P$$

$$C_i = \frac{T_{i+1/2,j}}{\Delta x_i}$$

$$\frac{S_{i,j}}{\Delta t} (h_{i^2,j,k} - h_{i,j,k-1}) + W_{i,j,k+P} (h_{i^2,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (11)$$

Ordenando las ecuaciones de manera que las incógnitas estén en el primer miembro y definiendo, se tiene:

$$A'_j = \frac{T_{i,j-1/2}}{\Delta y_j}$$

$$B'_j = \frac{T_{i,j-1/2}}{\Delta y_j} - \frac{T_{i,j+1/2}}{\Delta y_j} - \frac{S_{i,j}}{\Delta t} - P$$

$$C'_j = \frac{T_{i,j+1/2}}{\Delta y_j}$$

$$D'_j = -\frac{T_{i-1/2,j}}{\Delta x_i} h_{i-1^1,j,k} + \left(\frac{T_{i-1/2,j}}{\Delta x_i} + \frac{T_{i+1/2,j}}{\Delta x_i} - P \right) h_{i^1,j,k} +$$

$$\frac{T_{i+1/2,j}}{\Delta x_i} h_{i+1,j,k} + S_{i,j} h_{i,j,k-1} - W_{i,j,k} \quad (12)$$

Para:

$$j = 1, 2, \dots, m$$

El sistema 11 en forma matricial

$$\begin{bmatrix} B'_1 & C'_1 & \dots & \dots & \dots \\ A'_2 & B'_2 & C'_2 & \dots & \dots \\ & A'_3 & B'_3 & C'_3 & \dots \\ & & & & A'_{m-1} & B'_{m-1} & C'_{m-1} \\ & & & & A'_m & B'_m & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{2,1,k} \\ h_{2,2,k} \\ h_{2,3,k} \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{2,m,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D'_1 \\ D'_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ D'_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

El sistema es tridiagonal, utilizando las ecuaciones 9, 10, 12 y 13 se constituyen el siguiente algoritmo (Beltran, 1976).

Algoritmo

1o. se suponen conocidos $h_{i,j,k-1}$

$i = 1, 2 \dots n$

$j = 1, 2 \dots m$

Cuando $k-1 = 0$, los valores $h_{i,j,0}$ corresponden a las condiciones iniciales. En caso contrario $h_{i,j,k-1}$ son valores calculados anteriormente.

2o. se supone $h_{i^0,j,k} = h_{i,j,k-1}$

$i = 1, 2 \dots n$

$j = 1, 2 \dots m$

3o. se resuelve el sistema de ecuaciones

y se obtiene $h_{i^1,j,k}$

$i = 1, 2 \dots n$

$j = 1, 2 \dots m$

4o. se resuelve el sistema de ecuaciones

y se obtiene $h_{i^2,j,k}$

$i = 1, 2 \dots n$

$j = 1, 2 \dots m$

5o. con $h_{i^1,j,j}$ y $h_{i^2,j,k}$; y las dos aproximaciones de $h_{i,j,k}$ obtenidas de 3o. y 4o. se verifican las siguientes condiciones.

- Si $\left| h_{i^1,j,k} - h_{i^2,j,k} \right| < \epsilon$ para todos los valores de i y j siendo ϵ un criterio de error prefijado, se detienen las iteraciones y se pasa al intervalo de tiempo siguiente $k + 1$.

Si existen i, j tales que:

$$\left| h_{i^1,j,k} - h_{i^2,j,k} \right| > \epsilon$$

Se hace $h_{i^0,j,k} = h_{i^2,j,k}$ para todo i, j y se calculan nuevas aproximaciones $h_{i^1,j,k}$ y $h_{i^2,j,k}$ iterando a partir de 3o.

Descripción del programa de Pinder

El programa simula la variación de la carga hidráulica del acuífero en función de espacio y tiempo; la descripción de los datos de entrada del modelo se observan en el Apéndice A.

Esta versión original del modelo de Pinder puede trabajar alternativamente con acuíferos libres, semiconfinados y/o confinados, sometido al bombeo de pozos a tasa constante en el tiempo.

Beltran (1976) presenta el programa ACMIXTO que además de trabajar en las condiciones antes mencionadas, define las siguientes posibilidades: acuíferos libres que debido a recargas pueden transformarse en confinados o semiconfinados; acuíferos semiconfinados o confinados que por explotación pueden pasar a mixtos, es decir, partes libres y partes confinadas. Se tiene también la facilidad de poder introducir o detener la explotación en los pozos en cualquier momento de la simulación, considerando bombeo escalonado en el tiempo.

Jégat (1977) hace también cambios que permiten adaptaciones al modelo en la forma presentada por Beltran (1976), sin considerar caudal variable; además, introduce una variación en el orden de resolución de las ecuaciones del Pinder original. El programa Pinder modificado, para realizar el cálculo fila por fila y columna por columna, necesita hacer prueba de convergencia al completar un ciclo de iteraciones. Para esto se requiere mayor tiempo de computadora pero se obtiene mayor precisión.

Para el presente trabajo se utilizó el programa de Pinder modificado por Jégat (1977), ver Apéndice A, Tabla A1 y Figura A1.

CAPITULO IV

CARACTERIZACION DEL ACUIFERO

Delimitación

Tiene como límite el piedemonte de los Andes Venezolanos y la carretera Trocal V que va a poca distancia de éste; además, con los ríos Sarare y Morador en un ancho de 43 km. La extensión areal del acuífero es de 300200 hectáreas. En cuanto a la profundidad de estudio se consideró hasta 80 m, según la información obtenida a partir de perforaciones de las cuales se elaboraron los perfiles litológicos. Esto se muestra en el Apéndice B, Tabla B1 y Figura B1, B 18.

Aspectos Litológicos

El piedemonte es producto de deposiciones de material aluvial, que son una secuencia de estratos permeables e impermeables, compuestos de gravas, arenas, limos y arcillas en todas sus combinaciones. El sector piedemonte, al entrar en la planicie, está formado casi totalmente de material fosilizado por aluviones recientes, (MOP, 1973), con algunas islas o escalones del cuaternario antiguo y reciente, en alturas de 240 y 360 msnm, como el caso de Acarigua. El material casi fosilizado está compuesto de material grueso como piedras y gravas. Esta es una zona de gran infiltración de agua de los ríos y la de mayor recarga al acuífero. Comprende, entre los ríos Sarare y Acarigua, una faja de 15 - 20 km, perpendicular al piedemonte andino, reduciéndose hasta 8 km hacia el río Morador; esta zona presenta un acuífero libre y según los perfiles litológicos elaborados, existen grandes depósitos de material

grueso muy permeables hasta 50-60 m de profundidad. Estos materiales se fueron depositando según la velocidad del agua de los ríos, de tal manera que al ir bajando y disminuyendo la pendiente del río disminuyen las capas de material grueso y superficialmente se observa un depósito de materiales más finos, como arenas finas, limos y arcillas, superficialmente debido al desplazamiento de los ríos. El acuífero está más profundo debido al depósito de un estrato arcilloso, de tal manera que sufre un confinamiento paulatino. Esto se puede ver en el perfil isométrico elaborado, Figura 6.

En la Figura 6, se observa que en la zona de Turén hacia abajo, en dirección NW-SE, se empieza a confinar el acuífero, observándose una capa gruesa de arcillas y limos compactos que varía de 5 a 22 m de espesor, a medida que se interna en el llano.

Entre los ríos Guache y Morador, se observa una serie de estratificaciones en la zona confinada e incluso en esta región, por las Vegas de Ospino, el agua emerge a la superficie.

En síntesis, el acuífero tiene comportamiento libre en la zona cercana al piedemonte y luego sufre un confinamiento aguas abajo de los ríos Morador Aca rigua y Sarare. Esta característica se determinó en base al mapa isométrico elaborado, a las pruebas de bombeo.

Características Hidrogeológicas

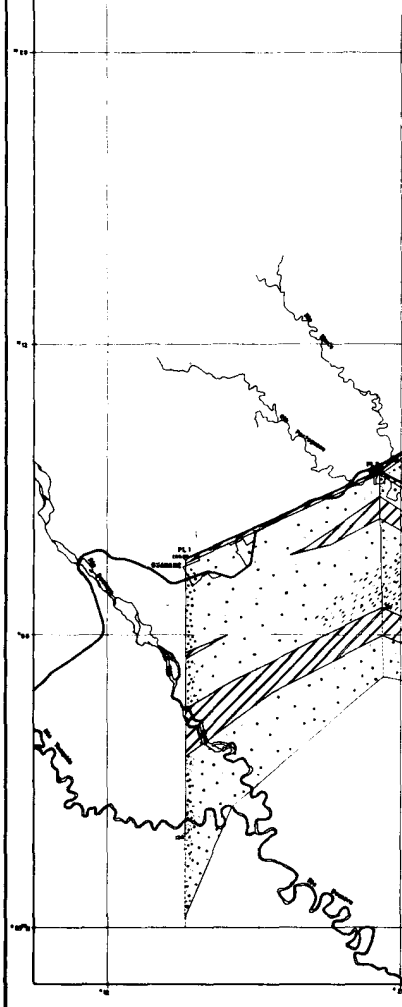
El acuífero, como sistema físico, tiene un cierto comportamiento regulado por extracciones, bombeo, y recargas, dependiendo de características intrínsecas que se definen a continuación.

Figura 6.

CORTE ISOMETRICO ENTRE L
DEL ESTAD

LEYENDA

- PL 6 Numero de Pozo
- 16000 Cota del Pozo en m.s.n.m.
- Pozo
- Profundidad del Pozo en mts
- Perfil Supuesto
- Rios
- Carreteras
- PIRITU Ciudades y Pueblos
- Arcilla
- Grava
- Arena
- Conglomerado
- Grava Arenosa
- Arcilla Gravosa
- Arcilla Arenosa
- Grava Arenosa Arcillosa



Permeabilidad o Conductividad Hidráulica

Se define como el caudal que pasa por una sección o unidad de acuífero, en un gradiente, i , unitario, a una temperatura fija o determinada (Custodio y Llamas 1976). La permeabilidad depende de factores intrínsecos como los mencionados y factores extrínsecos, tal como la viscosidad y peso específico del fluido.

La ecuación que la define es:

$$K = \frac{V}{i} \quad (14)$$

donde $i = \frac{\Delta h}{l} \quad (15)$

i : gradiente

l : longitud

Δh : diferencia de carga

K : coeficiente de permeabilidad

V : velocidad aparente

En la Tabla 4 se pueden observar materiales característicos, y su permeabilidad encontrados en la zona acuífera.

Tabla 4. Materiales característicos y permeabilidad

Permeabilidad (m/día)	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Tipo de terreno	Grava limpia	Arena limpia; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas				
Categorización	Buenos acuíferos				Acuífero pobres			Impermeables			
Capacidad de drenaje	Drenan bien					Drenan mal		No drenan			

Según las características del material predominante observado en los datos de perforaciones, se definieron zonas de permeabilidad semejante. Esta varía en rangos de 120 m/día en la zona de piedemonte y en los flancos de los ríos debido a la presencia de gravas gruesas y arenas, así mismo, va disminuyendo a medida que se aleja del piedemonte, ya que debido a la reducción de la pendiente de los ríos y los desplazamientos, se han depositado materiales más finos y se observan zonas de conductividad en rangos de 50-60 m/día. Esta característica se observó a partir de los ensayos por bombeo de los perfiles litológicos y, posteriormente, en la calibración del modelo de Pinder.

Transmisividad

La transmisividad fue introducida por Theis en 1935. Se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno en una unidad de ancho y la altura igual a la del manto permeable saturado, bajo una unidad de gradiente, a una temperatura fija determinada; se expresa en m²/día, m³/día/m de donde:

$$T = K \cdot m \quad (16)$$

T: transmisividad

K: conductividad hidráulica

m: espesor saturado del acuífero

Los valores de la transmisividad se obtuvieron a partir de las pruebas de bombeo midiendo el abatimiento en el pozo de bombeo y a partir de mediciones en pozos de observación; en base a estos resultados, se elaboró el mapa de isolíneas de transmisividad, Figura 7. Entre los ríos Morador y Acarigua se

observa una faja con valores entre 2000 a 4500 m²/día, en las cercanías del piedemonte y aledaño a los ríos, debido a los grandes depósitos de gravas. Esta zona es muy rica en agua, ya que el material poroso permita una gran infiltración, la cual ocurre en una faja de 8 a 15 km respectivamente.

Entre los ríos Acarigua y Sarare, la transmisividad varía entre 2000 y 3000 m²/día y se extiende en una faja de 20 km a partir del piedemonte, en dirección perpendicular a éste. La transmisividad entre 1300 a 2000 m²/ día es una fase transicional entre el acuífero libre y el confinado.

A la altura de las Vegas de Ospino, cerca al río Morador, Villa Bruzual y Acarigua, hacia aguas abajo de los ríos, los valores de la transmisividad disminuyen debido a la reducción del espesor saturado, entre 20-30 m, y también de la permeabilidad. Los rangos varían entre 800-1200 m²/día.

Rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento

El rendimiento específico es la relación que existe entre el volumen de agua que puede liberarse por drenaje gravitacional y un volumen de acuífero. El valor para el acuífero libre se obtuvo a partir de los datos del MOP (1973), ya que para esta zona no fue posible establecer pozos de observación y los valores varían entre los $1,4 \times 10^{-2}$ a 20×10^{-2} . El coeficiente de almacenamiento representado por el volumen de agua que libera un acuífero cautivo por expansión del agua y compactación de la matriz sólida, es adimensional. Este parámetro se determinó a partir de ensayos por bombeo con medición del abatimiento en el pozo de observación; los valores obtenidos van desde $1,2 \times 10^{-3}$ hasta $7, \times 10^{-4}$, disminuyendo en dirección aguas abajo, donde

el acuífero sufre un confinamiento. Ambos coeficientes se corrigieron durante la calibración del modelo Pinder.

Interpretación de las Pruebas por Bombeo

Para determinar los parámetros hidrogeológicos tal como permeabilidad, transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, se distribuyeron pruebas por bombeo en el área, unas midiendo el abatimiento en el mismo pozo y otros en el pozo de observación. En la Tabla 6 se indican los tipos de pruebas, ubicación, el parámetro determinado y condiciones para el análisis.

Los métodos para analizar los datos de ensayos por bombeo en condiciones de flujo en régimen permanente y variable, para acuíferos de extensión infinita y aplicado a acuíferos libres, confinados, semiconfinados y semilibres, en condiciones corrientes de campo, sin considerar límites de barrera, recarga o formas de acuíferos, se basan en los siguientes supuestos, Kruseman (1975).

- El acuífero tiene una extensión superficial infinita
- El acuífero en el área influenciada por el ensayo por bombeo, es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme
- Antes de bombear, la superficie piezométrica y/o superficie freática son casi horizontales en el área influenciada por el bombeo.
- Se bombea el acuífero a caudal constante
- El pozo penetra totalmente en el acuífero y por ello recibe agua de todo el espesor del acuífero, siendo el flujo horizontal.

El método de Jacob

Las pruebas a caudal constantes se interpretaron por el método

Tabla 5 . Descripción de las Pruebas por Bombeo.

LUGAR	TIPO DE PRUEBA	CAUDAL BOMBEO l/s	NIVEL ESTÁTICO	NIVEL DE BOMBEO	DIÁMETRO DEL POZO cm	DISTANCIA AL PIEZOMETRO m	TIEMPO DE BOMBEO horas	TRANSIVIDAD (m ² /día/m TO)	COEFICIENTE ALMACENAMIENTO	METODO INTERPRETACION
La Flecha	Caudal Constante	27,5	29,0	24,21	40,0	-	15,0	483,2	-	Jacob
Empresa Choro Gonzalezero	Caudal Constante	130,0	1,52	4,57	40,0	-	28,0	3304,0	-	Jacob
Potrero de Armo	Recuperación	142,0	3,79	10,75	40,0	-	102,0	2159,0	-	Jacob
Colonia Turén	Caudal Constante	110,0	2,21	-	40,0	50	36,0	1023,0	5,33x10 ⁻³	Jacob
Fca. Payara	Caudal Constante	126,0	2,00	7,01	45,0	-	26,0	3985,0	-	Jacob
Hda. Guache	Caudal Constante	21,0	17,36	30,54	35,0	-	24,0	706,0	-	Jacob
Fca. Charafús	Caudal Constante	159,0	0,50	-	45,0	186,0	25,0	2566,0	7,183x10 ⁻⁴	Jacob
Tierra Buena	Recuperación	90,0	6,42	13,30	40,0	-	49,0	3847,0	-	Jacob
Parigua	Caudal Constante	140,0	5,81	-	40,0	200,0	48,0	2635,0	1,60 x10 ⁻³	Jacob

de Jacob, kruseman (1975), a partir de los datos de abatimiento-tiempo obtenidos en el campo. En este método las ecuaciones que se usan son:

$$T = \frac{2,3 Q}{4 \pi \Delta s} \quad (17)$$

$$S = \frac{2,25 T \cdot t_0}{r^2} \quad (18)$$

T : transmisividad

Q : caudal

S : coeficiente de almacenamiento

Δs : abatimiento en un ciclo logarítmico

t_0 : valor que se obtiene al intersectar la recta abatimiento-tiempo en el eje de abatimiento igual a cero.

r : distancia al pozo de observación

Para representar los datos de abatimiento respecto al tiempo bombeado, se usa papel semilogarítmico; el tiempo va en la escala logarítmica y el abatimiento en la escala aritmética, de tal manera que al ajustarse a una recta los valores t_0 y Δs quedan determinados.

Cuando no se tiene pozo de observación únicamente se puede obtener el valor de la transmisividad, ya que el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico no se pueden determinar en el mismo pozo.

Si el ensayo por bombeo se hace en un acuífero libre el abatimiento se corrige con la ecuación:

$$s' = s - \frac{s^2}{m} \quad (19)$$

donde:

s : abatimiento medido

s' : abatimiento corregido

m : espesor saturado del acuífero

La prueba realizada en la Finca Charada, en las Vegas de Ospino, se presenta como ilustración al método antes descrito. Los datos de abatimiento-tiempo se presentan en la Tabla 7, y la gráfica de abatimiento-tiempo en la Figura 8, en papel semilogarítmico, en donde:

$$t_0 = 6,20 \text{ minutos} = 4,305 \times 10^{-3} \text{ días}$$

$$\Delta s = 0,98 \text{ m}, \text{ tomando un ciclo logarítmico}$$

cambiando las ecuaciones 16, 17, 18 y 19 se obtiene que $T=2.565,7 \text{ m}^2/\text{día}$, $s = 7.183 \times 10^{-4}$, adimensional, $K = 102,6 \text{ m/día}$ y $\mu = 0,0024$, cumple la condición de Jacob de que $\mu < 0,01$

Además de los supuestos generales para interpretación de las pruebas por bombeo, el método de Jacob se basa en la fórmula de Theis y debe satisfacer las siguientes condiciones o supuestos limitantes. (Kruseman, 1975).

-El acuífero es confinado

-El flujo del agua hacia el pozo es un régimen variable, es decir, ni las diferencias del descenso del nivel en los piezómetros son despreciables con el tiempo, ni el gradiente es constante con el tiempo.

-La extracción del agua del almacenamiento produce inmediatamente descenso en la carga hidráulica.

-El diámetro del pozo es muy pequeño y se desprecia el almacenamiento en el mismo.

-Valores de μ pequeños, $\mu < 0,01$ relacionan que r es pequeño y t es grande.

Tabla 7. Datos de Abatimiento-Tiempo.

Prueba de Bombeo Caudal Constante Fecha: 12 - 3 - 80

Lugar: Finca Charada, Vegas de Ospino, Estado Portuguesa

Caudal Bombeado 159 l/s Nivel Estático 0,50

Profundidad de: Pozo Bombeo 70 m Pozo Observación 70 mDiámetro Pozo de Bombeo 0,45 m Distancia al Pie
zómetro 186 mTiempo de Bombeo 25 Hr Cota msnm 116 m Tipo de Bomba Combustión

Tiempo (minutos)	Abatimiento(mts)	Tiempo (minutos)	Abatimiento (mts)
3	0,54	1.800	2,79
5	0,58		
6	0,62		
8	0,65		
15	0,85		
20	1,04		
30	1,16		
40	1,24		
50	1,36		
65	1,49		
80	1,60		
95	1,68		
125	1,80		
155	1,90		
185	2,00		
250	2,11		
305	2,20		
420	2,30		
510	2,37		
720	2,55		
1350	2,72		
1500	2,76		

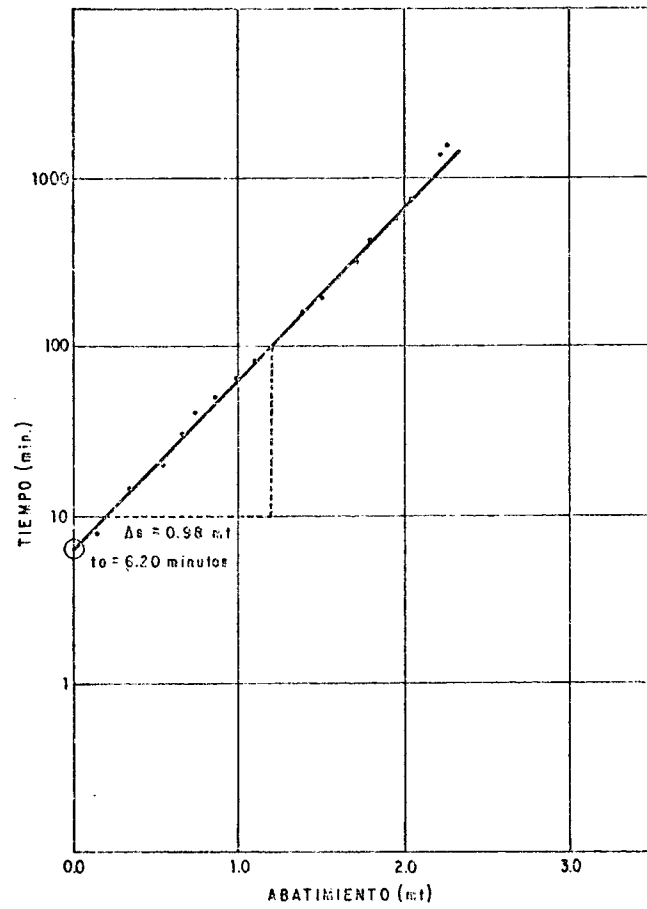


Figura 8 Prueba de bombeo a caudal constante, pozo PB-1

donde

$$\mu = \frac{r^2 S}{4 T} \quad (20)$$

Las pruebas de recuperación consisten en suspender el bombeo después de determinadas horas y el agua comienza a subir a su posición original o nivel estático. Este período de ascenso es llamado recuperación del pozo y se mide en base al descenso residual, s'' y es la diferencia entre el nivel del agua antes de comenzar el bombeo y el nivel actual medido en cierto momento t , después de finalizado el bombeo, Figura 10.

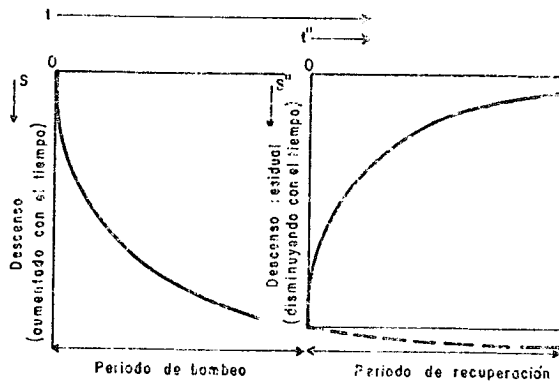


Figura 9 Diagramas esquemáticos de las relaciones tiempo-descenso y tiempo-descenso residual.
Fuente: Kruseman, 1975

Con la prueba de recuperación se puede calcular la transmisividad y se escogió este tipo de prueba en aquellas zonas donde no se contaba con pozo de observación y porque da menos error por no tener efecto de las pérdidas de pozo.

En la recuperación no se producen las pequeñas diferencias en el descenso, debidas a las variaciones de descarga durante el bombeo. Si se satis-

facen los supuestos de Jacob, se puede utilizar el método de recuperación de Theis para calcular las propiedades hidráulicas del acuífero.

Según Theis el descenso residual s'' durante el período de recuperación viene dado por, (Kruseman, 1975).

$$s'' = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{4Tt}{r^2 S} - \ln \frac{4Tt''}{r^2 S''} \right] \quad (21)$$

donde

Q : caudal bombeado

T : transmisividad

r : distancia al pozo de observación

S : coeficiente de almacenamiento durante el bombeo.

S'' : coeficiente de almacenamiento durante la recuperación

t : tiempo de descenso durante el bombeo

t'' : tiempo de descenso residual

Si S y S'' son constantes e iguales y r^2 es suficientemente pequeño, se escribe:

$$s'' = \frac{2,3 Q}{4 T} \log \frac{t}{t''} \quad (22)$$

De tal manera que los valores de t/t'' se plotean en la escala logarítmica y los del descenso residual en la escala aritmética en papel semilogarítmico.

Con estas pruebas sólo se puede determinar la transmisividad y no así el coeficiente de almacenamiento. Para esto se muestra la prueba en los pozos PB-7 y PB- 8. Ver Figuras 10 y 11.

Para medir los cambios de abatimiento del agua en los pozos de observación o bombeo, se utilizó una sonda eléctrica, adaptada a un medidor de vol

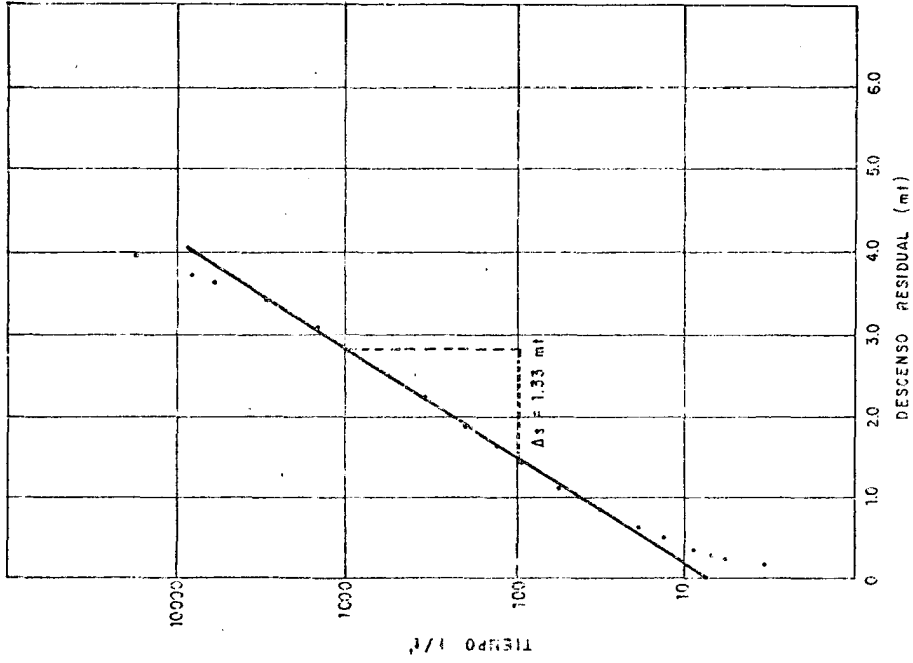


Figura 11 Prueba de bombeo de recuperación, pozo PB-8

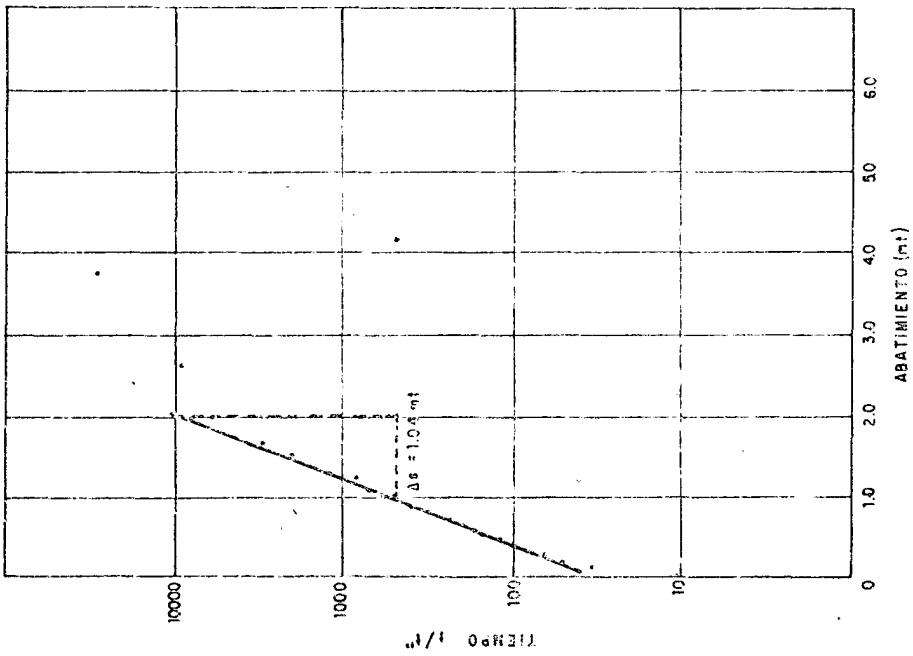


Figura 10 Prueba de bombeo de recuperación, pozo PB-7

taje sensible, de tal manera que al tocar el agua marcaba en el detector.

Los aforos de los pozos se hicieron en base al volumen por tiempo de llenado en las tanquillas que reciben el agua, por medio de un parshall, con capacidad para 90 l/s y en algunos casos con el vertedero rectangular ya establecido en el tanque de salida.

Determinación de la Recarga

Generalidades

Es importante saber que la recarga es parte del balance hidrológico del sistema, según Custodio (1975), la ecuación de continuidad es la misma del balance hidráulico y se expresa:

$$\text{Entradas} = \text{salidas} \pm \text{Variación de almacenamiento}$$

Castany (1973) considera que los elementos principales que determinan el balance de la capa acuífera se pueden presentar en la ecuación siguiente:

$$I_w + I_Q + I_r + q_w + q_s = E + R + Q_{ex} + Q_e + Q_w \pm d_w \quad (23)$$

donde :

I_Q I_r : infiltración por aguas superficiales

I_w : infiltración eficaz

q_w : aportes de aguas subterráneas, alimentación indirecta

q_s : aportes de aguas superficiales, alimentación indirecta

E : evapotranspiración real

R : escorrentía superficial

Q_{ex} : pozos de explotación del agua subterránea

Q_e : surgencias de aguas subterráneas

- Q_s : salida en flujo superficial
 Q_w : vertido de la capa acuífera
 d_w : variación de las reservas en agua subterránea

En la Figura 13, representa la relación de entradas y salidas de agua en un acuífero cualquiera.

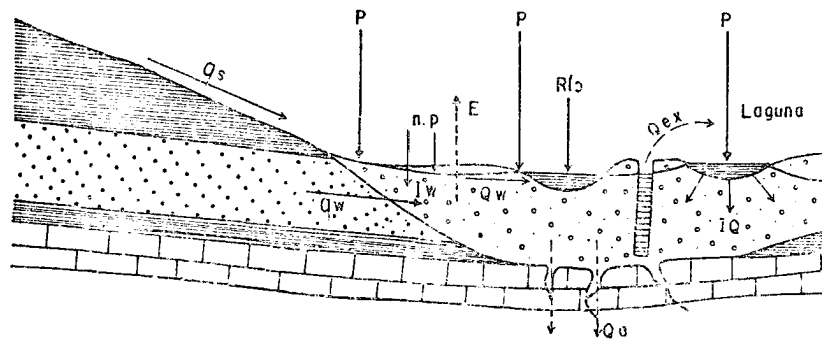


Figura 12 Esquema detallado de las entradas y salidas de agua en una capa acuífera.
Fuente: Conslony 1975

Modelo de simulación mensual

Para determinar la recarga se utilizó el modelo de simulación hidrológica a nivel mensual de Martín García (1976), modificado por Amisial (1980). El modelo considera la cuenca hidrográfica dividida en subcuencas para las cuales se considera homogeneidad en los procesos hidrológicos dominantes, así como en las condiciones físicas que lo afectan.

El conjunto de factores más importantes que afectan el balance de agua y sus relaciones entre sí, son: precipitación, evapotranspiración, infiltración, escurrimiento superficial, almacenamiento subterráneo, flujo base y flujo por cauces o escorrentía.

Calibración del Modelo

Las cuencas del río Morador, Guache, Acarigua y Sarare, hidrológicamente forman parte de la cuenca alta y media del río Portuguesa.

Como conjuntamente se está llevando a cabo el estudio sobre la disponibilidad de agua superficial y la factibilidad de represar los ríos antes mencionados, Guerra (1980) utilizó el modelo de García (1976), para estimar la escorrentía. A partir de los registros en las estaciones fluviométricas ubicadas en los puentes que cruzan la carretera Troncal V, se calibró el modelo para las cuencas de los ríos Morador, Acarigua y Sarare. Esta calibración consistió en tratar de ajustar la escorrentía simulada a la observada, con la combinación de los parámetros que afectan la distribución y movimiento del agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico. En la Figura 13, se muestra la calibración de la cuenca del río Acarigua hasta la estación de aforo en Puente Acarigua y en la Tabla 7, , los parámetros considerados.

Simulación de la Recarga

Las calibraciones de las cuencas corresponden a zonas ubicadas aguas arriba del sector considerado como fuente de agua subterránea, es decir, que en la zona de estudio no se cuenta con estaciones fluviométricas. Por esta falta de aforos no es posible calibrar el modelo en la zona acuífera, por lo que se procedió a extender los parámetros determinados por Guerra (1980), aguas abajo de los puntos de calibración, considerando únicamente la zona acuífera en estudio. Estos parámetros pueden verse en la Tabla 7. De estos valores se hizo variar la capacidad de infiltración del suelo, CINF, estimándose en 150 la capacidad de campo, CC, en rangos de 100 a 130 y el contenido límite

Tabla 7. . Parámetros de los Procesos Hidrológicos para las sub-áreas seleccionadas en la determinación de la recarga.

PARAMETRO	S U B C U E N C A		
	MORADOR-GUACHE	ACARIGUA	SARARE
C3	0,10	0,05	0,05
C4	0,85	0,45	0,05
C5	0,05	0,05	0,05
C6	0,10	0,05	0,85
C7	0,05	0,77	0,95
C8	0,05	0,05	0,90
C9	0,03	0,77	0,30
C10	0,10	0,25	0,70
CINF	150,00	150,00	150,00
PHSI	5,00	5,00	1,00
HES	120,00	130,00	100,00
CC	150,00	150,00	150,00
PV011	5,00	5,00	1,00
AS	0,00	0,00	0,00
AA	0,00	0,00	0,00
PSR01	0,10	1,50	0,10
CK3	0,80	0,80	0,80

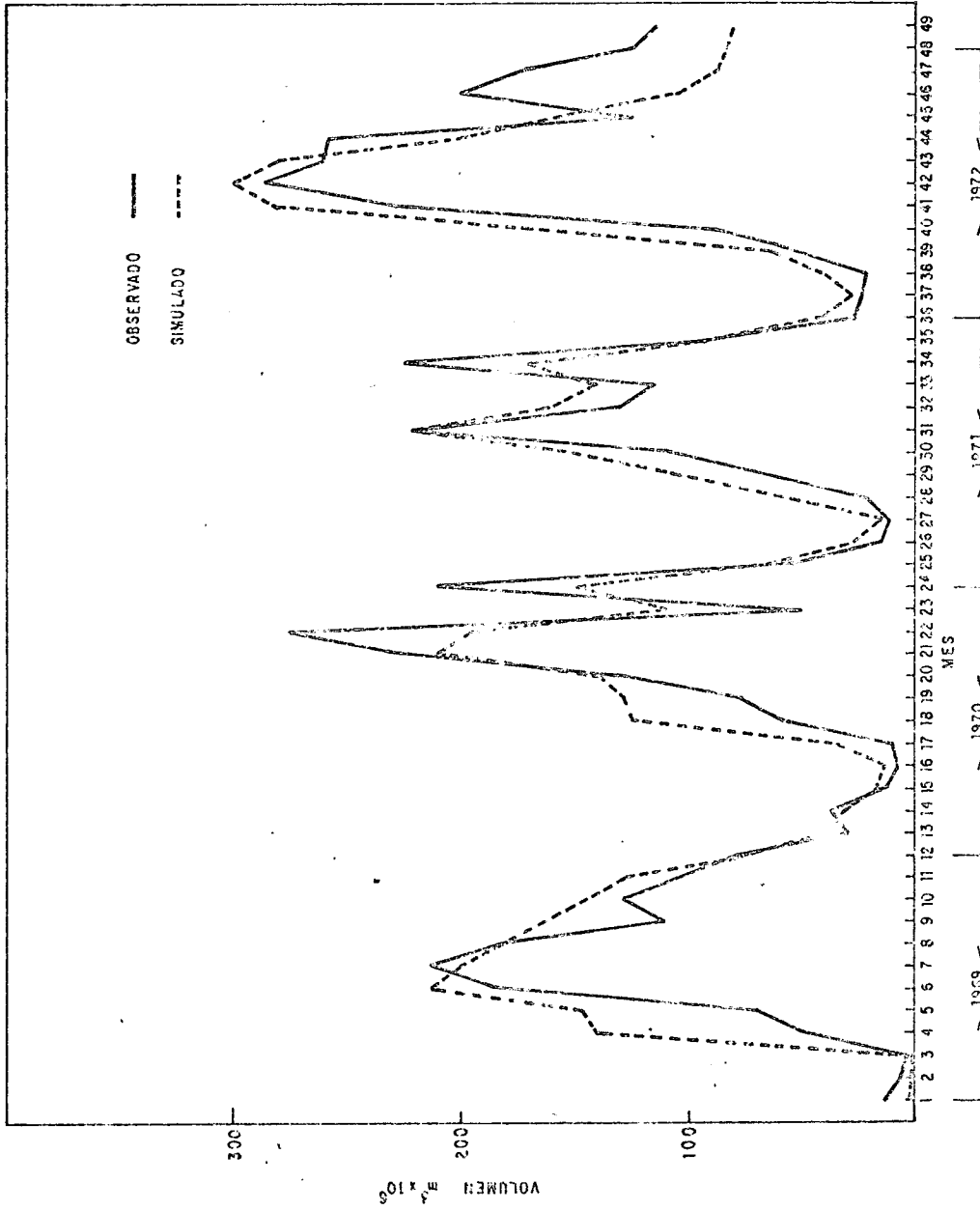


Figura 13 Volumen de escorrentía observado y simulados a la salida de la cuenca del río Acarigua, en Puente Acarigua período 69-72. Fuente: Guerra (1980)

de humedad, HES, en 140 a 150. Esta variación se debió al cambio en las características del suelo en la zona del proyecto de aguas subterráneas. En la Tabla 8, donde se dan los valores de estos parámetros, basados en la textura del suelo. También se hizo variar la evaporación de la tina en valores de 0,75 a 0,80 para la zona piemontina.

Ubicación de estaciones pluvioevaporimétricas

Se delimitó el área de cada cuenca considerada, aguas abajo de los puntos de calibración, Figura 19. Luego se ubicaron todas las estaciones evaporimétricas y Pluviométricas, Tabla 9 y 10, en el área del acuífero y se utilizó el método de Thiessen para establecer el área de influencia de cada estación.

Simulación

Para la simulación de la recarga se consideraron años comunes de registros, en cuanto a evaporación y precipitación se refiere, además de las variaciones que se le dieron a algunos parámetros ya mencionados anteriormente. Para la cuenca del río Morador se utilizaron 8 años de registros es decir, de 1958 a 1965.

En la cuenca del río Acarigua, Guache y Sarare se consideraron 4 años respectivamente, comprendidos en los años 1969 a 1972. En la cuenca del río Guache se consideraron los parámetros determinados para la cuenca del río Acarigua por estar próxima a ésta. Posteriormente se calculó la recarga total para cada zona acuífera considerada, cuyos valores se presentan en la Tabla 11.

En el modelo de García (1976) se considera que existe recarga al

Tabla 8. Valores de algunos parámetros de los procesos

Textura	Capacidad de campo mm/50 cm	Punto de Marchitez Permanente mm/50 cm	CINF mm/50 cm	HES mm/50 cm
Arenosa	78 (47 - 108)	33 (11 - 54)	78 (47 - 108)	62 (38 - 86)
Franco Arenoso	107 (70 - 144)	46 (28 - 64)	107 (70 - 144)	86 (56 - 115)
Franco	159 (122 - 195)	62 (54 - 70)	159 (122 - 195)	92 (98 - 86)
Franco Arcilloso	184 (150 - 217)	89 (72 - 105)	184 (150 - 217)	147 (120 - 174)
Arcillo Arenoso	203 (169 - 236)	98 (81 - 115)	203 (169 - 236)	162 (135 - 169)
Arcilloso	220 (186 - 254)	101 (90 - 111)	220 (186 - 254)	176 (149 - 203)

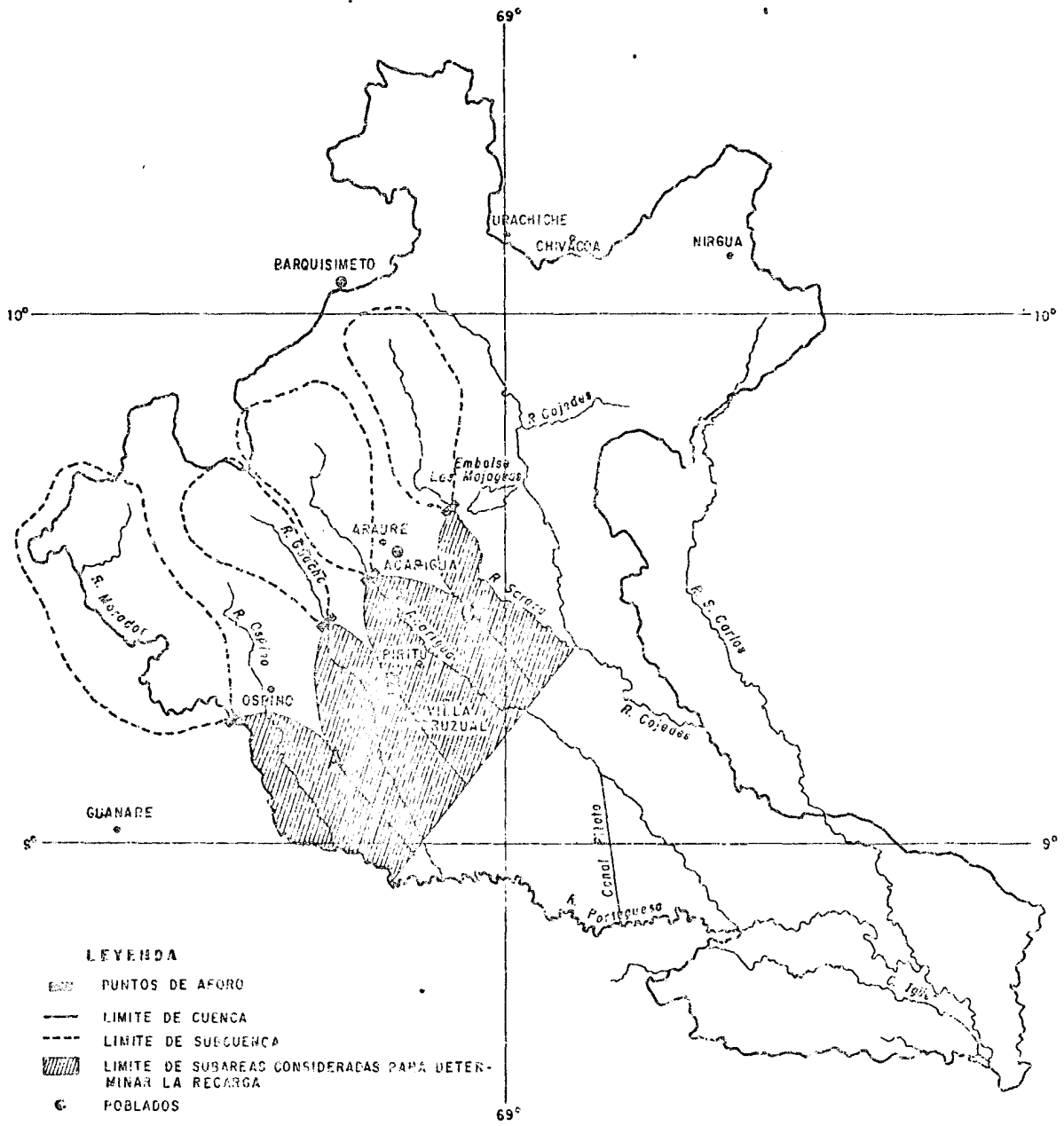


Figura 14 Delimitación de las cuencas, aguas arriba y abajo de los puntos de aforo.

Tabla 10 . Estaciones Pluviométricas consideradas.

ESTACION	C O O R D E N A D A S		
	LATITUD	LONGITUD	MSNM
Hacienda San Rafael	09°10'	69°35'	176
Ospino Dispensario	09°17'	69°27'	188
Hacienda Guache	09°26'	69°21'	276
Píritu	09°22'	69°12'	230
Centro Agrícola Turen	9°16'	69°05'	130
Acarigua Aeropuerto	09°35'	69°14'	225
Auro	09°42'	69°14'	315
Payara	09°30'	69°05'	192
Tocuyano	09°22'	68°57'	140
Las Majaguas	09°39'	68°59'	182
Santa Teresa	9°31'	68°51'	150

Tabla 11 . Estaciones de Evaporación.

ESTACION	C O O R D E N A D A S		
	LATITUD	LONGITUD	MSNM
Las Majaguas	09°39'	68°59'	182
Centro Agrícola Turen	09°16'	69°05'	130
Hacienda Guache	09°26'	69°21'	276

Tabla 11 . Determinación de la recarga a partir de la infiltración eficaz del agua de lluvia para las zonas acuíferas consideradas.

ZONA	PERIODO	RECARGA PROMEDIO EN MILLONES DE METROS CUBICOS												TOTAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Morador-Guache	58-65	0,0	0,0	0,0	0,0	5,43	15,32	13,46	11,52	12,14	10,40	12,38	0,0	80,67
Guache-Acarigua	69-72	0,0	0,0	0,0	1,25	4,60	12,77	23,61	21,30	22,98	16,37	0,0	1,57	104,45
Acarigua-Sarare	69-72	0,0	0,0	0,0	0,0	3,28	42,70	41,62	26,51	26,29	7,38	3,65	0,0	151,43

acuífero cuando hay percolación; ésta ocurre cuando la humedad del suelo es mayor que la capacidad de campo, Tabla 12. La diferencia entre ambos es el agua que percola por efecto de lluvia, en caso contrario no existe recarga al acuífero.

Reservas del Acuífero

Las reservas representan el volumen de agua almacenada en un período determinado para una zona acuífera.

Las reservas están condicionadas por la estructura geológica que da las dimensiones, luego por la porosidad eficaz o rendimiento específico y por el coeficiente de almacenamiento. Los datos dimensionados que determinan las reservas en aguas subterráneas son fijos, según sean acuíferos confinados o libres.

Reservas en acuíferos libres

En los mantos libres, las reservas están definidas por el fondo del sustrato impermeable y la cota del nivel piezométrico, afectado por las fluctuaciones periódicas. En la Figura 15 se observa un esquema de las reservas en un manto libre.

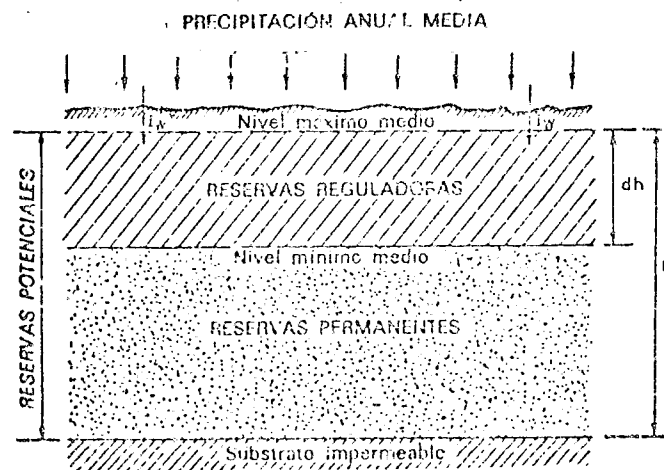


Figura 15. Reservas de los mantos libres en función de las fluctuaciones de la superficie piezométrica en el transcurso de un año hidrológico medio.

FUENTE: Castany, 1975.

Reservas en los acuíferos Confinados

En los acuíferos confinados, las reservas permanentes son iguales a las reservas totales y al volumen de agua liberable en la totalidad de la capa acuífera. Las fluctuaciones se traducen en variaciones de presión, dp , que no afectan la capa acuífera, Figura 16

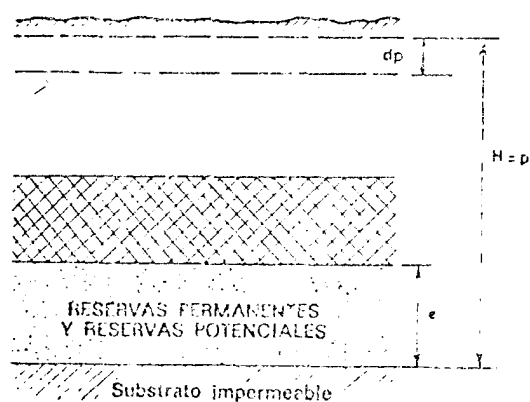


Figura 16 . Reservas de los mantos confinados.

FUENTE: Castany, 1975

Cálculo de las reservas

Los valores de las reservas se obtuvieron aprovechando, en el modelo de Pinder modificado por Jégat (1977), utilizando la variante libre/confinado.

Forma de cálculo en el acuífero libre

El volumen de agua en el acuífero libre se obtuvo de la siguiente manera:

$$\text{Volumen} = A \cdot h \cdot SL \quad (24)$$

donde

$$A = \text{DELX}(J) \cdot \text{DELY}(i)$$

- A : área correspondiente a cada nodo en la malla.
 h : altura de la carga hidráulica respecto al datum de referencia
 SL : rendimiento específico
 DELX(J) : valor del intervalo entre columnas
 DELY(i) : valor del intervalo entre filas

Forma de cálculo en el acuífero confinado

En los acuíferos confinados, la superficie piezométrica se encuentra más arriba que el techo impermeable. Para el cálculo de las reservas se procedió de la siguiente manera:

-Se calculó la reserva tomando como referencia el techo del acuífero y el incremento debido a la presión, hasta el nivel piezométrico. El volumen debido a este incremento es:

$$\text{Volumen} = A \cdot h_p \cdot SC \quad (25)$$

donde

- A : área correspondiente a cada nodo en la malla
 h_p : variación de la altura en función de la presión
 SC : coeficiente de almacenamiento

-Luego se calculó el volumen correspondiente a la zona encerrada entre los dos estratos impermeables. Para este caso se considera el rendimiento específico.

$$\text{Volumen} = A \cdot m \cdot SL \quad (26)$$

donde

- A : área correspondiente a cada nodo en la malla
- m : espesor del acuífero
- SL : rendimiento específico

Discusión de los volúmenes de reserva

Se consideró el sistema acuífero, en la zona Morador-Guache, Acarigua-Sarare y Guache-Acarigua, como un sistema estático para efecto del cálculo de las reservas. Se consideró la carga hidráulica inicial como la máxima media anual. Este valor es un dato puntual correspondiente al mes de septiembre de 1977, (MARNR, 1979).

Si el sistema acuífero sufre un descenso en el nivel de agua, también tendrá una relación en el volumen de agua de salida; esto se puede observar mejor en las Figuras 17, 18 y 19.

Para la zona acuífera Acarigua-Sarare, considerando la suma total, las reservas son de 2323,13 millones de metros cúbicos para el mes de septiembre de 1977. Se ha establecido que el nivel mínimo medio fluctúa entre 3 a 5 metros por debajo del nivel inicial, tanto en condiciones libres como confinadas (MARNR, 1978). La reserva permanente es de 2159,62 millones de metros cúbicos de tal modo que las reservas reguladoras son de 163,47 millones de metros cúbicos.

En la zona acuífera Guache-Acarigua, para el mismo período considerado, las reservas totales se estimaron en 1697,24 millones de metros cúbicos; las reservas permanentes en 1602,12 millones de metros cúbicos, considerándose como reserva reguladora 95,12 millones de metros cúbicos.

Las Figuras 17, 18 y 19, establecen la relación de que para un determinado volumen de agua extraído del acuífero, existirá un descenso en la zona considerada.

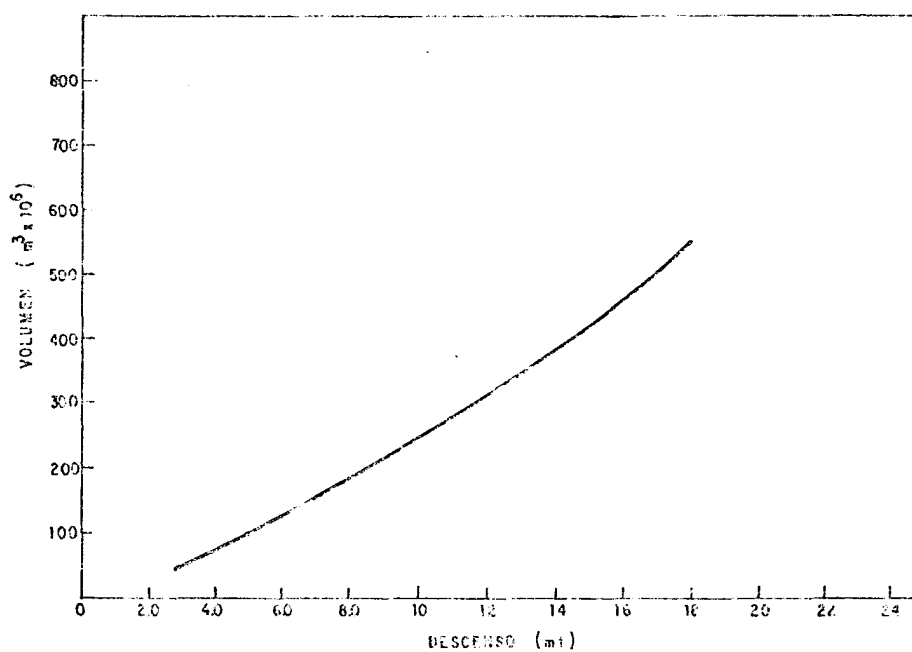


Figura 17: Relación entre el volumen extraído y el descenso de nivel en el acuífero, zona Morador - Guacho.

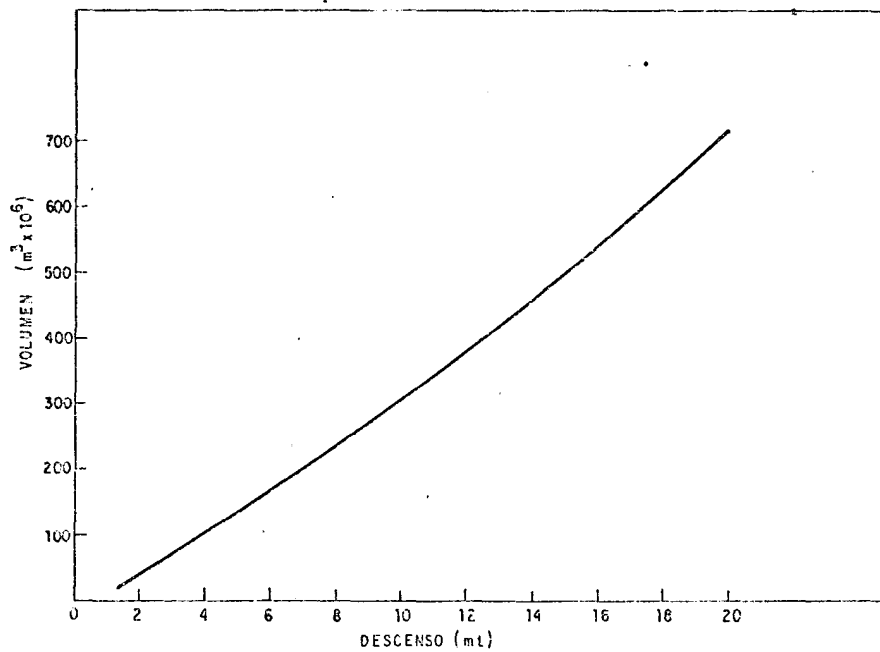


Figura 18 Relación entre el volumen extraído y el descenso de nivel en el acuífero, zona Guache - Acarigua.

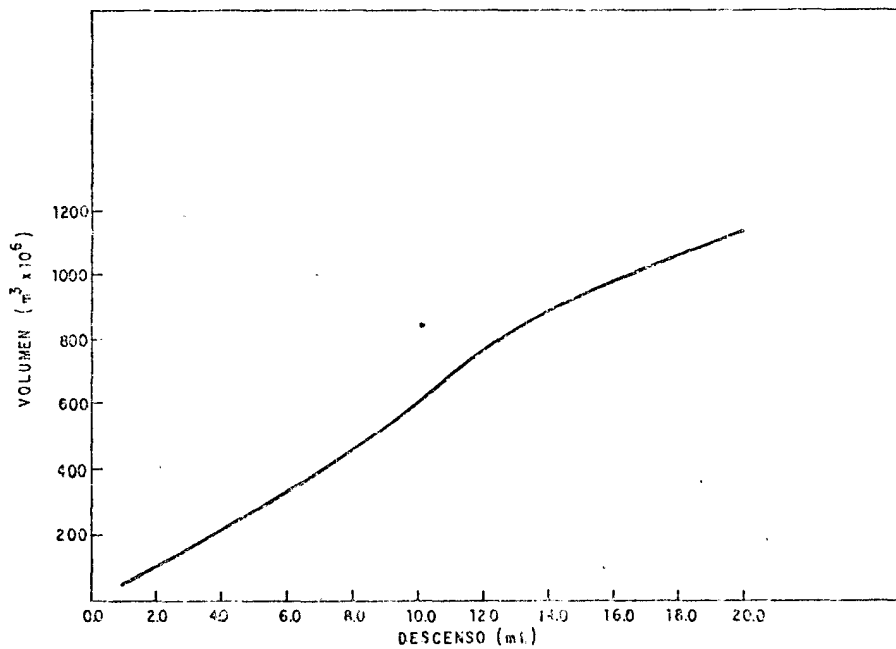


Figura 19 Relación entre el volumen extraído y el descenso de nivel en el acuífero, zona Acarigua - Sarare

La zona acuífera Morador-Guache tiene como reserva total 1165,60 millones de metros cúbicos, las reservas permanentes ascienden a 1063,8 millones de metros cúbicos y las reservas reguladoras oscilan en 102,31 millones de metros cúbicos. Siempre en el mismo período considerado.

Toda la zona del proyecto, entre los ríos Morador y Sarare, tiene un total en reservas permanentes de 4825 millones de metros cúbicos. Las reservas reguladoras son de 360 millones de metros cúbicos en toda la zona del proyecto.