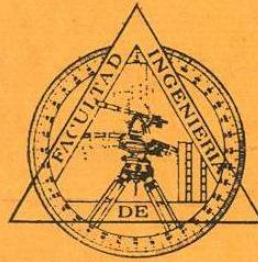


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
Facultad de Ingeniería Civil
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



**APLICACION DEL METODO DE DIFERENCIAS
FINITAS AL ANALISIS DE UN
ACUIFERO CONFINADO**

TESIS PRESENTADA
EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN
"HIDROLOGIA SUBTERRANEA"
POR
ING. EFRAIN SALINAS SALINAS

MONTERREY, N. L.

JUNIO - 1980

TM

Z68

.C5

FIC

198

00



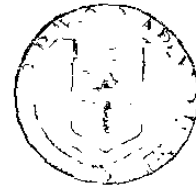
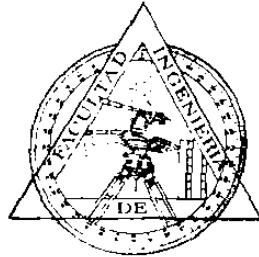
1020091239



ESC

0

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
Facultad de Ingeniería Civil
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



DIRECCION GENERAL DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

**APLICACION DEL METODO DE DIFERENCIAS
FINITAS AL ANALISIS DE UN
ACUIFERO CONFINADO**

TESIS PRESENTADA
EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN
“HIDROLOGIA SUBTERRANEA”
POR
ING. EFRAIN SALINAS SALINAS

MONTERREY, N. L.

JUNIO - 1980

111
2
3

100
1



FONDO TESIS

6304.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

APLICACION DEL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS
AL ANALISIS DE UN ACUIFERO CONFINADO

T E S I S

Que para obtener el grado de Maestría en
Hidrología Subterránea
presenta

EFRAIN SALINAS SALINAS

Monterrey, N. L.

1980

Deseo dedicar este estudio a mi esposa Lily por todo lo que nos une y a mis padres, Ing. Efraín Salinas y Lilia S. de Salinas por sus sacrificios y guía a través de mi carrera académica.

Agradecimientos

Este estudio fué desarrollado bajo la supervisión del Dr. Leopoldo Rodarte R., profesor de la Maestría en Hidrología Subterránea, División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Estoy muy agradecido con él por sus constantes sugerencias y críticas durante el desarrollo de este estudio.

Quiero agradecer al Ing. Jaime A. Tinajero G., Director de Inventario de Agua y Suelo de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico por la ayuda prestada al facilitar la información requerida para la realización del presente estudio.

I N D I C E

<u>INDICE DE LAMINAS</u>	----- vi
--------------------------	----------

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1	Objetivos del estudio -----	1
1.2	Localización -----	1
1.3	Climatología -----	3
1.4	Hidrología superficial -----	3

CAPITULO 2. GEOLOGIA

2.1	Introducción -----	6
2.2	Geología histórica -----	6
2.3	Características geohidrológicas -----	6

CAPITULO 3. HIDROLOGIA SUBTERRANEA

3.1	Recopilación y revisión de la información disponible -----	10
3.2	Configuración de los niveles estáticos ----	10
3.3	Configuración de las curvas de igual transmisibilidad -----	11
3.4	Volúmenes de extracción de agua subterránea -----	11
3.5	Cálculo del coeficiente de almacenamiento regional y de la recarga media anual del acuífero -----	16
3.6	Comentarios -----	18

CAPITULO 4. DESARROLLO DEL MODELO

4.1	Ecuación de flujo en un acuífero confinado-	20
4.2	Aproximación por diferencias finitas -----	26
4.3	Consideraciones sobre los métodos de solución adoptados -----	31
4.4	Método iterativo implícito en dirección alternante (IADI) -----	32
4.5	Programa básico de simulación de acuíferos-	38

CAPITULO 5. INFORMACION REQUERIDA POR EL MODELO

5.1	Geometría -----	41
5.2	Período seleccionado para la calibración --	41
5.3	Características hidrodinámicas, volúmenes de extracción y de recarga asignados a cada celda -----	42

<u>CAPITULO 6.</u>	<u>CALIBRACION DEL MODELO</u>	
6.1	Consideraciones generales -----	46
6.2	Calibración y error -----	46
6.3	Potencial del modelo -----	55
<u>CAPITULO 7.</u>	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	
7.1	Conclusiones -----	56
7.2	Recomendaciones -----	56
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	-----	58
<u>ANEXO.</u>	Listado del programa básico de simulación de acuíferos, datos utilizados por celda y resultados de 1970 a 1979 -----	60

INDICE DE LAMINAS

Lámina	1	Plano de localización
Lámina	2	Precipitación y temperatura media mensual en el valle del Yaqui, Son.
Lámina	3	Corrientes superficiales y canales
Lámina	4	Formaciones geológicas
Lámina	5	Elevación del nivel estático, Octubre 1977 (observada)
Lámina	6	Elevación del nivel estático, Marzo 1979 (observada)
Lámina	7	Transmisibilidad
Lámina	8	Comparación entre la evolución del volúmen total extraído del agua subterránea y la elevación media del nivel estático para el período de 1970 a 1979
Lámina	9	Diagrama de flujo del programa básico de simulación (IADI)
Lámina	10	Malla del modelo y tipo de fronteras
Lámina	11	Elevación del nivel estático, Octubre 1979 (observada)
Lámina	12	Elevación del nivel estático, Octubre 1970 (observada)
Lámina	13	Elevación del nivel estático, 1976 (calculada)
Lámina	14	Elevación del nivel estático, Octubre 1976 (observada)
Lámina	15 a 18	Evolución del nivel estático en celdas seleccionadas
Lámina	19	Elevación del nivel estático 1985 (calculada)
Lámina	20	Distribución de la recarga

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1 Objetivos del estudio

El valle del rio Yaqui es uno de los distritos de riego mas productivos del pais por lo que ha sido objeto de una serie de estudios encaminados a estudiar sus recursos hidráulicos entre los cuales juega un papel muy importante el agua subterránea.

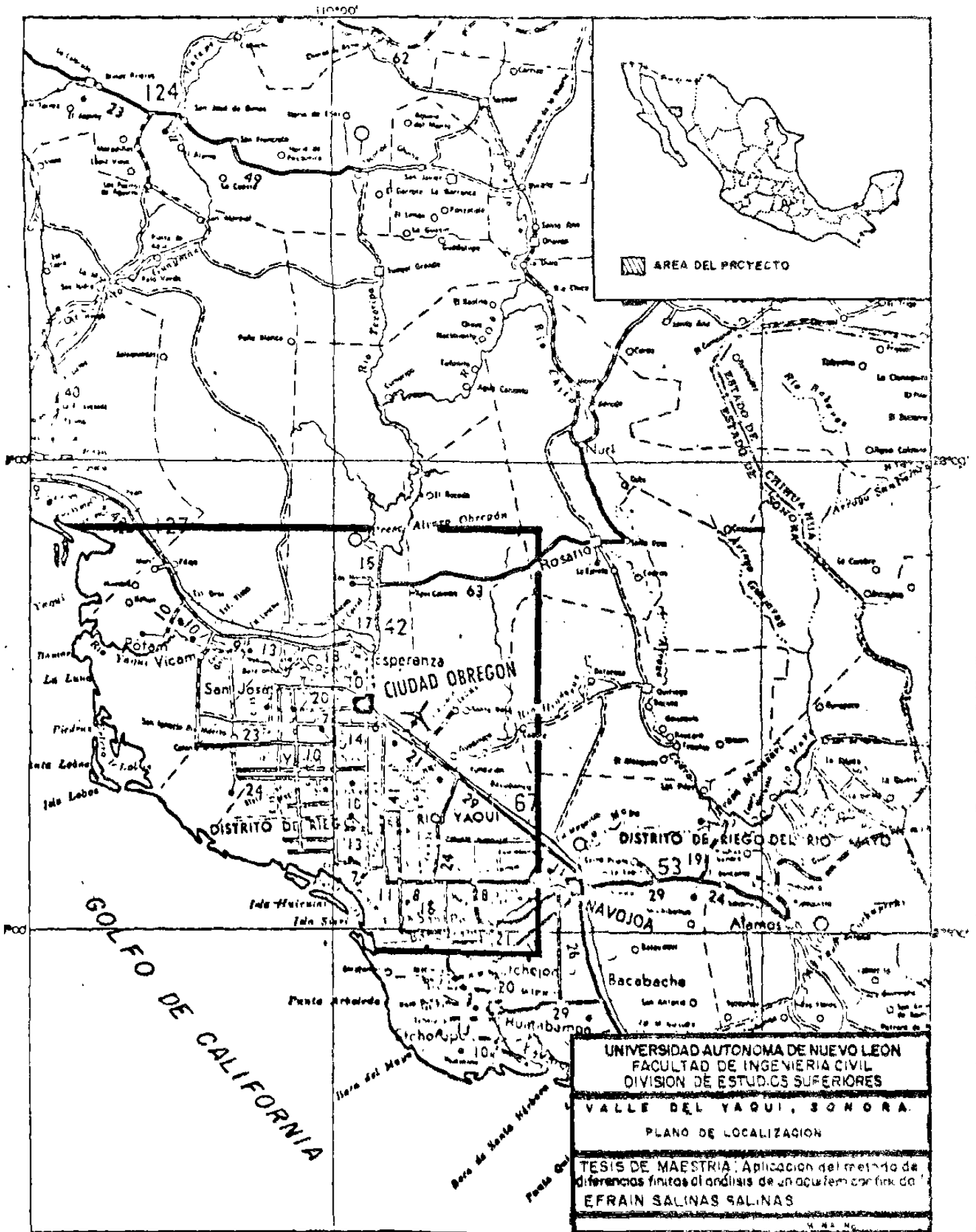
El primer estudio geohidrológico del acuífero del valle del Yaqui fue desarrollado por Icatec, S.A. (1970), el cual obtuvo una magnitud de la recarga media anual de 194 millones de m³. En un estudio posterior desarrollado por la Comisión del Plan Nacional Hidráulico y de la Subdirección de Geohidrología y de Zonas Aridas (1978) se estimó que la recarga media anual del acuífero es de 250 a 300 millones de m³. Teniendo en cuenta las nuevas perforaciones de pozos realizadas durante 1978, que incrementaron las extracciones de agua subterránea de 380 millones de m³ (1975-1976) a más de 500 millones de m³ a la fecha, se propuso el desarrollo de un modelo matemático de simulación del acuífero del valle del Yaqui con el fin de predecir la evolución piezométrica ocasionada por el incremento de las extracciones, definir con mayor precisión la magnitud de la recarga media anual del acuífero y planear el aprovechamiento racional del recurso.

1.2 Localización

El valle del Yaqui se localiza en la parte sur del Estado de Sonora (lámina 1) entre los paralelos 2700' y 2740' de latitud norte y los meridianos 10930' y 11035' de longitud oeste, abarcndose un área aproximada de 3,500 km².

Por su importancia en el renglón agropecuario el valle se encuentra perfectamente comunicado con el resto del país, siendo sus vias de acceso y salida, la carretera federal No. 15 México-Tijuana, el ferrocarril del Pasfico y el aeropuerto de Cd. Obregón. Existe además, una red de caminos pavimentados y terracerías que comunican los poblados y terrenos de cultivo.

Adicionalmente, se tienen como puntos de exportación para los productos agrícolas el Puerto de Guaymas al norte (a 127 km) y el de Mazatlán al sur (a 555 km). Como se mencionó anteriormente, la agricultura es el principal recurso de esta región y las principales actividades industriales están relacionadas con ella. Su población total alcanza aproximadamente los 300,000 habitantes, y más del 50% se concentra en Cd. Obregón que es la ciudad más importante del valle.



1.3 Climatología

El clima del valle del Yaqui es desértico con vegetación de tipo xerófila, la temperatura media anual es de 25°C (lámina 2), con mínimas de enero y febrero de 0°C y máximas en los meses de junio, julio y agosto de 47°C.

La precipitación media anual en el valle es de 250mm (lámina 2). El período de lluvia empieza en julio y se extiende hasta los meses de octubre; las precipitaciones son mínimas en los meses de febrero a mayo. La evaporación potencial media anual es de 2,700mm y la evapotranspiración media anual de 1,880mm.

1.4 Hidrología superficial

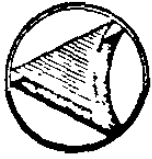
La corriente más importante del valle es el río Yaqui, cuyos escurrimientos son regulados por las presas el Novillo y Alvaro Obregón, ésta última tiene una capacidad de $2,988 \times 10^6$ m³ y una cuenca de captación de 70,845 Km², dispone de dos tomas: el canal Alto, con capacidad de 110m³/seg para el riego de 103,000 ha y el canal Bajo, cuya capacidad es de 154 m³/seg para regar 117,000 ha, cubriéndose en total 220,00 ha de riego con aguas superficiales.

El canal Bajo se subdivide a su vez en dos canales: 1) el canal de las colonias Yaquis, y 2) el canal Bajo propiamente dicho.

Además del río Yaqui, existen pequeños arroyos de tipo torrencial de los cuales el único importante es el Cocoraque, el cual descarga a la bahía de Tobarí frente a la isla de Huivulái un caudal medio anual de 0.57 m³/seg (período 70-73). A lo largo de su recorrido contribuye con sus infiltraciones a la recarga del acuífero, al igual que los canales Alto y Bajo. La ubicación de las presas mencionadas, así como los canales de conducción y el arroyo Cocoraque se muestran en la lámina 3.

LAMINA 2. PRECIPITACION Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN LAS ESTACIONES CLIMATOLOGICAS DEL VALLE DEL YAQUI, SON.

Estación	Medida	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Promedio
														Anual
A Cd. Obregón 1955-1968	Precipitación	18.2	8.5	7.6	1.0	0.0	9.8	96.0	97.9	65.5	27.7	8.7	33.6	374.0
	Temperatura	16.9	17.8	20.1	23.8	27.0	30.0	31.9	31.4	30.4	27.4	22.0	17.9	24.0
B Calle 1200 con canal Bajo 1933-1950	Precipitación	21.3	9.7	3.1	0.4	0.0	4.7	51.1	73.8	40.5	31.3	5.5	23.9	265.0
	Temperatura	15.6	16.1	18.3	21.2	24.5	27.7	30.5	30.8	29.6	26.4	21.3	16.6	23.0
C Batevito 1950-1960	Precipitación	9.7	0.6	2.0	0.6	1.7	0.0	25.7	22.8	20.9	25.7	1.5	6.7	117.0
	Temperatura	18.4	18.9	19.8	21.5	24.2	24.5	29.5	27.6	28.5	25.3	23.6	19.8	23.0



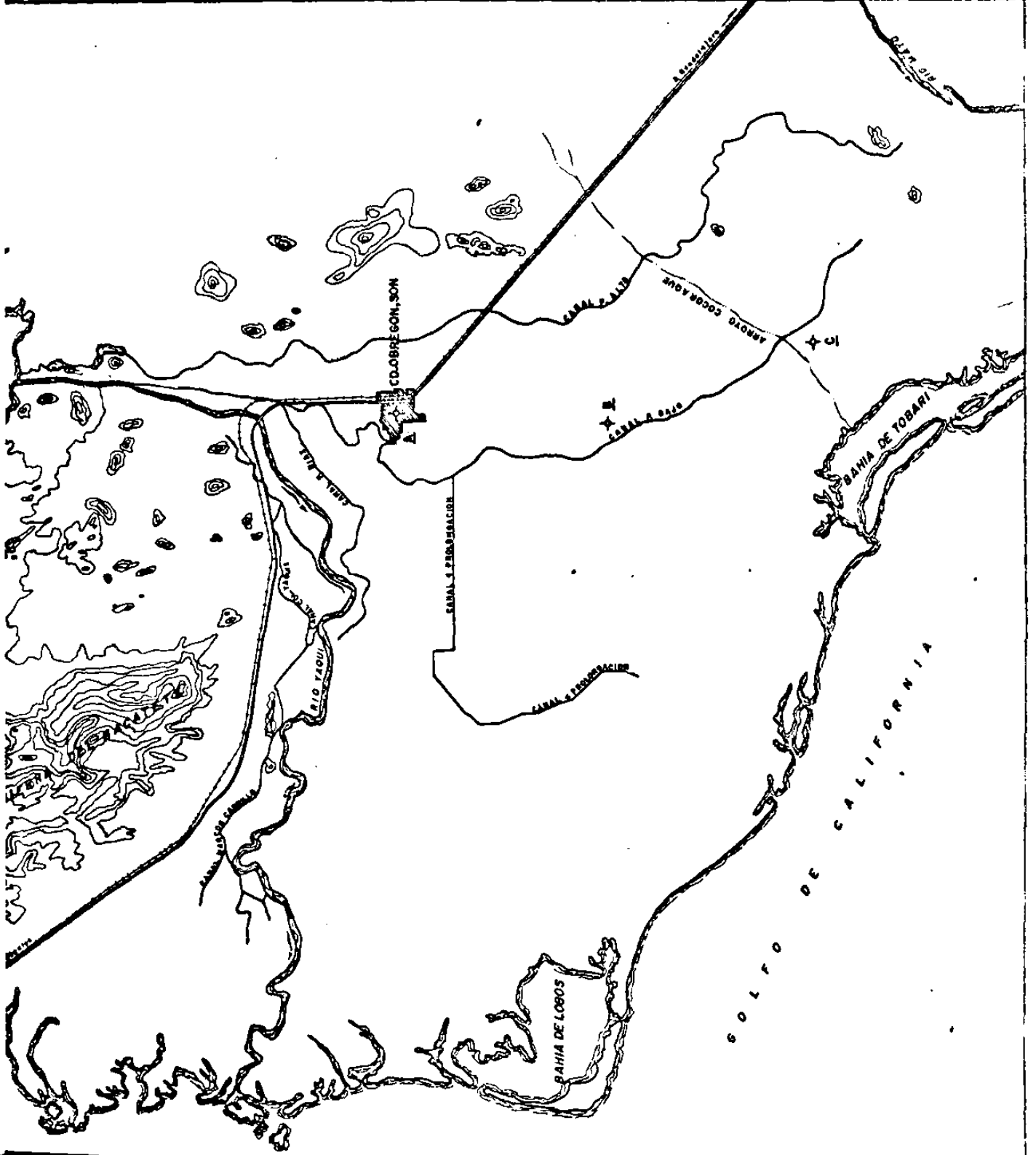
SIMBOLOGIA

- POBLACION: [Symbol: Shaded square]
- CARRETERA: [Symbol: Solid line]
- PERROCARRO: [Symbol: Dashed line]
- CANAL: [Symbol: Dotted line]
- RIO: [Symbol: Wavy line]
- ARROYO: [Symbol: Thin solid line]
- ESTACION PLUVIOMETRICA: [Symbol: Star]

ESCALA 1:400 000

 KILOMETROS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES
 VALLE DEL YAQUI, SONORA
 CORRIENTES SUPERFICIALES, CANALES
 Y ESTACIONES PLUVIOMETRICAS
 TESIS DE MAESTRIA "Aplicación del método de
 Afluencias fluviales al análisis de un acuífero confinado"
 EFRAIN SALINAS SALINAS



CAPITULO 2. GEOLOGIA

2.1 Introducción

Basándonos en el estudio geohidrológico desarrollado por Icatec (1970), se definieron las características geológicas y geohidrológicas de las diferentes formaciones que afloran en el valle.

2.2 Geología histórica

La primera etapa de la historia geológica está representada en la zona, por la sedimentación de rocas calcáreas que se supone termina a fines del Pérmico, período en el que el mar pierde su profundidad a consecuencia de la orogenia Sonorana (Fries, 1962) que deja emergida una superficie que quedó sujeta a un largo período de erosión.

A fines del Cretácico y a principios del Terciario, tiene efecto la Revolución Laramide durante la cual se efectúa una intensa actividad estructural, manifestada por emisiones lávicas, intrusiones ácidas y fenómenos de plegamientos y aflamamientos que afectaron la mayor parte de las sierras existentes en la región. Posteriormente, hacia fines del Terciario tuvo lugar un período de intensa erosión, durante el cual ocurrió el depósito de conglomerados y areniscas.

Durante el Cuaternario, la erosión continúa sobre todas las rocas que se encuentran expuestas en la región, dando por resultado la formación de depósitos de talud, abanicos aluviales y los rellenos del valle.

2.3 Características geohidrológicas

a) Paleozoico (Pa1)

Las rocas calcáreas del Paleozoico presentan un área de afloramiento muy limitada y en ella no se observaron ni cavidades de disolución ni un intenso fenómeno de fracturamiento por lo cual se le atribuyó una permeabilidad nula.

b) Cretácico volcánico (Kv)

Esta formación constituida por andesitas con interestratificaciones de conglomerados y areniscas, tiene un área de afloramiento limitada que se localiza en el interior de la sierra.

A estas rocas se les atribuye una permeabilidad secundaria controlada por las fracturas que superficialmente se presentan abiertas y poco espaciadas entre sí. Por ésto, la permeabili-

dad es variable pero en conjunto se puede considerar como nula y no se cree que pueda afectar a los acuíferos del valle del Yaqui.

c) Terciario volcánico (Tv)

Las rocas andesíticas y riolíticas que se formaron en este período son las que mas abundan en el área. La permeabilidad de estas rocas es secundaria y está ligada al grado de fracturamiento de las rocas. Este, en general es muy intenso superficialmente, pero dado que se cierra a profundidad como puede verse en los afloramientos al norte de Fundición, confiere a la formación una permeabilidad muy baja que no influye sobre los acuíferos del valle.

d) Granito (Tgr)

Las rocas graníticas presentan en esta región un área de afloramiento bastante extensa, y están recubiertas superficialmente por una arena arcósica producto del intemperismo. En los afloramientos en los que el granito aparecía menos intemperizado, no se observaron fracturas bien desarrolladas por lo cual a estas rocas se les atribuye una permeabilidad nula, aunque superficialmente ésta se puede considerar buena debido a la presencia de arenas sueltas que las recubren.

e) Conglomerados (Tbc)

Estas rocas afloran en un área bastante extensa y están constituidas por conglomerados que presentan hacia la base interestratificaciones de coladas basálticas. En cuanto a la permeabilidad, ésta es de origen primario y está controlada por la granulometría y el grado de cementación.

Estos factores son muy variables de un lugar a otro, aunque por lo general, los materiales son de grano grueso, poco cementados y de granulometría bastante uniforme, por lo cual se atribuye a esta formación una buena permeabilidad.

Por la posición topográfica y estratigráfica de estos materiales, se cree que constituyan los rellenos del valle que se encuentran subyaciendo a los aluviones y es probable que en ellos esten labrados algunos de los pozos profundos del valle de Yaqui. Por lo tanto, se considera posible que las áreas donde afloran estos materiales constituyan una fuente de recarga para los acuíferos explotados.

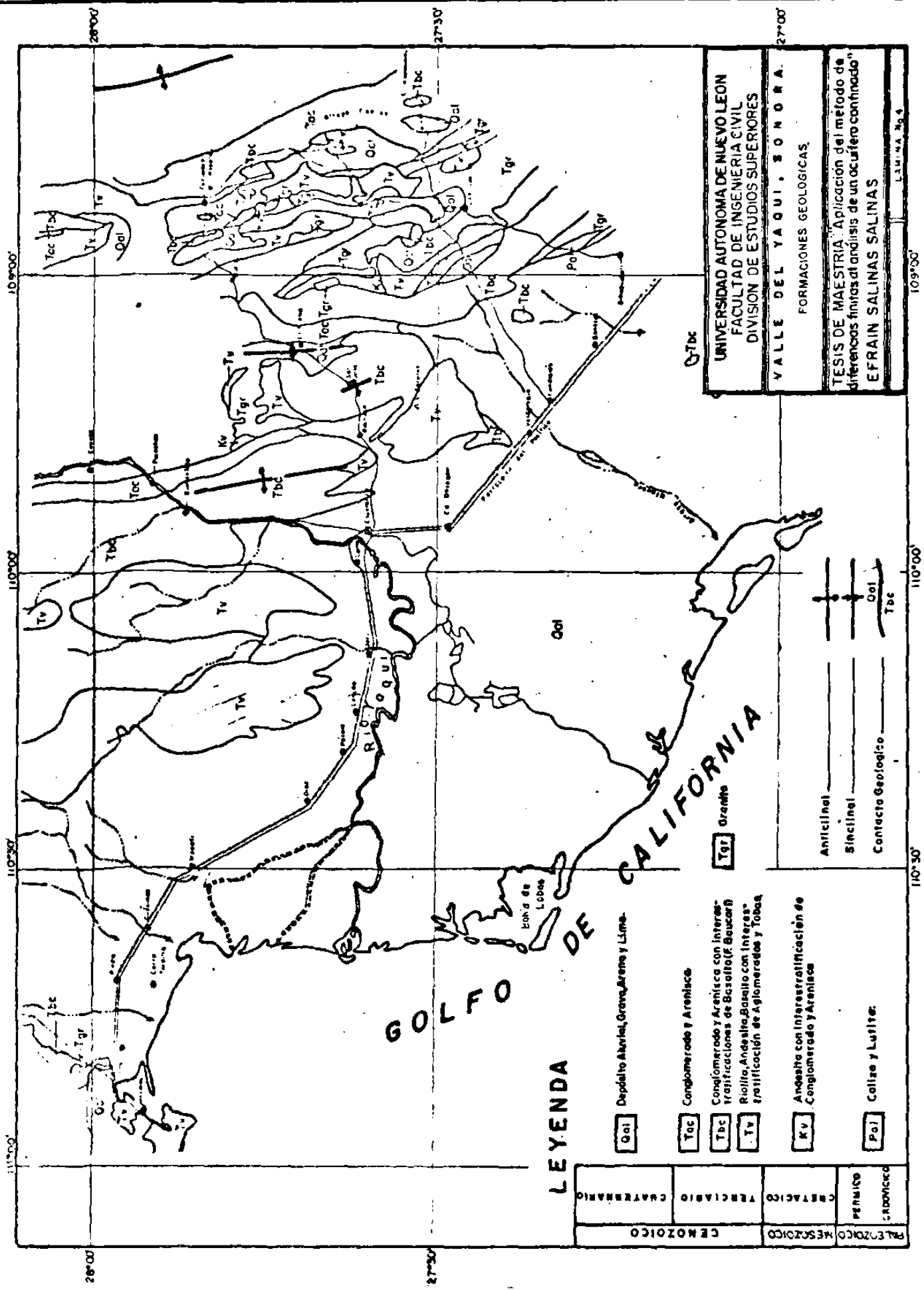
f) Areniscas y conglomerados (Tac)

Sobreyacen concordantemente a los conglomerados unas areniscas entre las que se encuentran interestratificaciones de conglomerados. Estas rocas presentan una permeabilidad muy variable ya que se pueden encontrar conglomerados muy cementados, impermeables, de grano que varía de grueso a fino y arenas poco compactas de buena permeabilidad. Debido a que estas rocas afloran unicamente en áreas muy restringidas se considera que los aportes a los acuíferos del valle de Yaqui son muy limitados.

g) Depósitos aluviales cuaternarios (Qal)

Estos depósitos están representados por materiales aluviales y depósitos de talud que presentan una granulometría muy variable, encontrándose desde tamaños de grava hasta arenas y limos. Por lo que se refiere a la permeabilidad de estos depósitos es variable, ya que en las márgenes del río Yaqui, donde se encuentran los pozos de Cócorit es muy alta, por estar el acuífero constituido por materiales de grano grueso, mientras que alejados del río se encuentran depósitos finos, limosos y arenosos de menor permeabilidad que los anteriores. Los sedimentos aluviales afloran en toda la zona plana del valle del Yaqui, tienen un espesor desconocido y constituyen el acuífero de la región.

La distribución de las principales formaciones geológicas que afloran en el valle del Yaqui, se muestran en la lámina 4



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

VALLE DEL YAQUI, SONORA.

FORMACIONES GEOLOGICAS

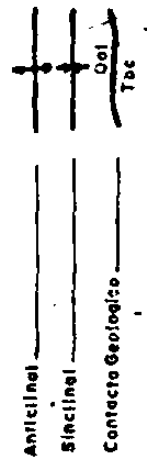
TESIS DE MAESTRIA "Aplicación del método de diferencias finitas al análisis de un acuífero confinado"

EFRAIN SALINAS SALINAS

LÁMINA No. 4

LEYENDA

Qal	Depósito Aluvial, Grava, Arena y Limo.
Tbc	Conglomerado y Arenisca
Tbc	Conglomerado y Arenisca con Interstratificación de Basalto (F. Baucará)
Tv	Riolita, Andesita, Basalto con Interstratificación de Aglomerados y Toba
Kv	Andesito con Interstratificación de Conglomerado y Arenisca
Pol	Caliza y Lutita.



CENOZOICO	CRETACICO	TERCIARIO	CUATERNARIO
PLEISTOCENO	PLISTOCENO	PLEISTOCENO	PLEISTOCENO

109°30'

110°00'

110°30'

109°00'

110°00'

110°30'

26°00'

27°00'

27°30'

CAPITULO 3. HIDROLOGIA SUBTERRANEA

3.1 Recopilación y revisión de la información disponible

Se revisó la información geohidrológica que se tiene de la zona, esencialmente la que sería de utilidad para elaborar el modelo, tal como la historia piezométrica, la hidrometría subterránea (volúmenes extraídos por los pozos), pruebas de bombeo y estudios anteriores.

El análisis de toda la información recopilada se hizo con el fin de conocer el comportamiento del acuífero, sus características hidrodinámicas, el órden de la recarga vertical y el volúmen de agua extraído anualmente por pozos. De la revisión de estos estudios se concluyó lo siguiente:

En el estudio desarrollado por Icatec (1970) se tiene el inconveniente que para resolver la ecuación de balance de las aguas subterráneas se tuvo que hacer la hipótesis que el volúmen de agua extraído por bombeo (B) y el infiltrado (I) se les denominó (X=B-I) y se trabajó como si (X) fuera constante, resolviéndose las ecuaciones por simultáneas cada dos meses. Esto se hizo además para un período corto (Septiembre 1968-Agosto 1969) por lo que hay que tomar el estudio con ciertas reservas.

El estudio desarrollado por la CPNH (1978) se hizo para el período 1970-1976, pero los resultados que obtuvo, tales como un coeficiente de almacenamiento de $S = -0.003$ absurdo y sin sentido físico, el coeficiente de correlación = -0.09 lo cual indica que las ecuaciones planteadas no son correlacionables. Ante esta situación con la información del estudio de la CPNH (1978) para el período de 1970-1976, se volvieron a plantear las ecuaciones de balance, modificando sólo el término cambio en el almacenamiento, ya que éste fue calculado ahora a partir de la configuración de los niveles estáticos para cada año, arrojando los resultados siguientes:

Coeficiente de correlación = 0.85
Coeficiente de almacenamiento = 0.07
Recarga vertical media = $253 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$

Como se puede apreciar el coeficiente de correlación es bueno y la recarga vertical media anual concuerda con la estimación hecha por la CPNH (1978), para el cálculo del coeficiente de almacenamiento y de la recarga media anual, ver la sección 3.5.

3.2 Configuración de niveles estáticos

Se contó con los planos de configuración del nivel estático de 1970 a 1976 desarrollados por la CPNH (1978), en ellos se puede observar que la dirección de flujo es de NE a SW, un domo entre la intersección del arroyo Cocoraque con los canales principales Alto y Bajo y un cono en la intersección de las calles 800 y 18, el cual se ha ido formando por la explotación concentrada e intensiva de agua subterránea realizada por las industrias allí ubicadas.

En todos estos planos no se observa en la cercanía del mar ninguna inversión de flujo que pueda indicar intrusión salina, pero en las configuraciones hechas en este estudio con la información piezométrica de Octubre de 1977 y Marzo de 1979, presentan zonas con elevaciones del nivel estático por abajo del nivel del mar (láminas 5 y 6).

3.3. Configuración de curvas de igual transmisibilidad

La lámina 7 presenta la configuración de los valores de igual transmisibilidad obtenida de los valores puntuales de transmisibilidad, determinados mediante 139 pruebas de bombeo realizadas en pozos de una profundidad de 50 a 150 m, lo que representa la cuarta parte superior del espesor total del depósito aluvial. La condición de penetración parcial que presentan los pozos ocasiona abatimientos mayores dentro del pozo, que los que presenta el acuífero, aumentando así las pérdidas hidráulicas, lo cual ocasiona una disminución en la eficiencia de la captación.

En estas pruebas sólo seis fueron efectuadas con pozo de observación teniendo una duración de bombeo superior a 6 horas, el tiempo de bombeo de las otras pruebas no excedía de 2 horas. La falta de una mayor cantidad de pruebas de bombeo con pozo de observación nos impide obtener suficientes valores de coeficiente de almacenamiento para valorizarlo espacialmente, por lo cual constituye una incógnita en la ecuación de balance de las aguas subterráneas.

La interpretación de estos ensayos fue realizada a partir de la ecuación de Theis o de la fórmula simplificada de Jacob.

En la lámina 7 se observa que las transmisibilidades más

altas se encuentran a lo largo del canal principal Bajo, entre el pueblo de Cocorit y la calle 1, 300 y a ambos lados del río Yaqui entre Cocorit y San José y varían entre .001 y .1 m²/seg.

3.4 Volúmenes de extracción de agua subterránea

La subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas proporcionó un plano de la región con el último censo de pozos, así como datos del volúmen de agua extraída por pozo anualmente de 1970 a 1976. La tabla siguiente muestra los valores totales de agua subterránea extraída dentro de cada ciclo agrícola.

Ciclo	Volúmen de agua subterránea extraído. (Millones de m ³)
70-71	230
71-72	245
72-73	137
73-74	271
74-75	309
75-76	378

Como se aprecia en la tabla anterior, a partir de 1970 se han ido incrementando las extracciones de agua subterránea, teniéndose que para satisfacer las demandas ac-



SIMBOLOGIA

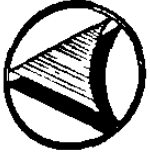
- POBLACION
- CARRETERA
- PERROCAMIN
- CANAL
- RIO
- ARROYO
- CURVA DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO EN M.S.N.M.

ESCALA 1:400 000



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
VALLE DEL TABUL, SONORA
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO
OCTUBRE 1977 (REVISTA)
TESIS DE MAESTRÍA Aplicación del método de
diferencias horizontales en un valle de
ESPAÑA SALINAS SALINAS





SIMBOLOGIA

- POBLACION
- CARRETERA
- FERROCARRIL
- CANAL
- RIO
- ARROYO
- CURVA DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO EN MAR



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES
 VALLE DEL TABUÍ, SONORA
 ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO
 OCTUBRE 1978 (OBSERVADA)
 TESIS DE MAESTRIA. Aplicación del método de
 interferencia fotogrametrica de un acuifero confinado
 EFRAIN SALINAS SALINAS





SIMBOLOGIA

- POBLACION
- CARRETERA
- PERICAMINO
- CANAL
- SHO
- ARROYO
- CURVA DE IGUAL TRANSMISIBILIDAD
EN $m^2/m^2 \times 10^{-4}$

ESCALA 1:400 000



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

VALLE DEL VAQUI, SONORA
TRANSMISIBILIDAD

TESIS DE MAESTRIA, Aplicacion del método de
referencia finos al análisis de un acuífero continuo
EFRAIN SALINAS SALINAS



tuales de agua subterránea para riego se construyeron durante 1978, 50 pozos con los cuales se piensa incrementar las extracciones de agua subterránea a 500 millones de m³.

3.5 Cálculo del coeficiente de almacenamiento regional y de recarga media anual del acuífero

Para realizar el cálculo del coeficiente de almacenamiento regional y de la recarga media anual del acuífero se usó la fórmula general:

Entradas - Salidas = Cambio en el almacenamiento

$$Eh + Rv - B - Sh = \Delta \Omega \cdot S \quad \dots (3.5.1)$$

Eh = Entradas por flujo horizontal
 Rv = Recarga vertical del acuífero
 B = Volúmen de agua subterránea extraído
 Sh = Salidas por flujo horizontal
 $\Delta \Omega \cdot S$ = Cambio en el almacenamiento del acuífero
 S = Coeficiente de almacenamiento

En esta ecuación son incógnitas:

S = Coeficiente de almacenamiento
 Rv = Recarga vertical del acuífero

La recarga vertical es producto principalmente de infiltraciones en los canales principales y arroyo Cocoraque.

Los valores de Eh y Sh se calcularon a partir de las redes de flujo trazadas en los planos de configuración de niveles estáticos mediante la fórmula:

Qi = $T_i \times L_i \times l_i$ caudal en el canal de flujo i
 Ti = Transmisibilidad en el canal del flujo i
 Li = Ancho del canal del flujo i

l_i = Gradiente medio en el canal de flujo i

$$Eh = \sum_{i=1}^{C_e} Q_{it}; \quad Sh = \sum_{i=1}^{C_s} Q_{it}; \quad \dots (3.5.2)$$

C_e = Número de canales de entrada

C_s = Número de canales de salida

t = Tiempo considerado para el análisis, el cual es generalmente de un año (31.5×10^6 seg).

Ciclo	Eh (10^6 m^3)	Rv (10^6 m^3)	Sh (10^6 m^3)	B (10^6 m^3)	$\Delta V \cdot S$ (10^6 m^3)
1970-1971	33	Rv	40	221	+ 23.64 S
1971-1972	35	Rv	47	258	- 11.82 S
1972-1973	43	Rv	45	231	+183.21 S
1973-1974	48	Rv	46	265	-671.77 S
1974-1975	50	Rv	47	305	-153.66 S
1975-1976	45	Rv	38	372	-1479.47 S

$$V = \sum_{i=1}^N a_i h_i \quad \dots (3.5.3)$$

a_i = Área con h_i de elevación del nivel estático

h_i = Elevación al nivel estático

N = Número de elevaciones al nivel estático diferentes

$\Delta \Omega$ = $\Omega_i - \Omega_{i-1}$ = Diferencia de volúmen entre dos años consecutivos.

Las ecuaciones para cada ciclo y para un área de balance de 1970 Km^2 quedan de la siguiente manera:

$$\begin{array}{lcl} 70-71 & Rv - 23.64 S & = 228 \\ 71-72 & Rv + 11.82 S & = 270 \\ 72-73 & Rv - 183.21S & = 233 \\ 73-74 & Rv + 671.77S & = 263 \\ 74-75 & Rv + 153.66S & = 302 \\ 75-76 & Rv +1479.47S & = 365 \end{array}$$

Al encontrar la recta de mejor ajuste aplicando el método de regresión lineal a este sistema de ecuaciones lineales se ob-

tuvieron los siguientes resultados:

Ecuación de la recta de regresión: $Y = 0.07X + 253.0$

Coefficiente de correlación = 0.85

Coefficiente de almacenamiento = 0.07

Recarga vertical media = $253 \times 10^6 \text{ m}^3$

Se tiene un 68% de probabilidad de que la recarga vertical media tenga un error de ± 30.50 y de 95% con error de ± 61.00

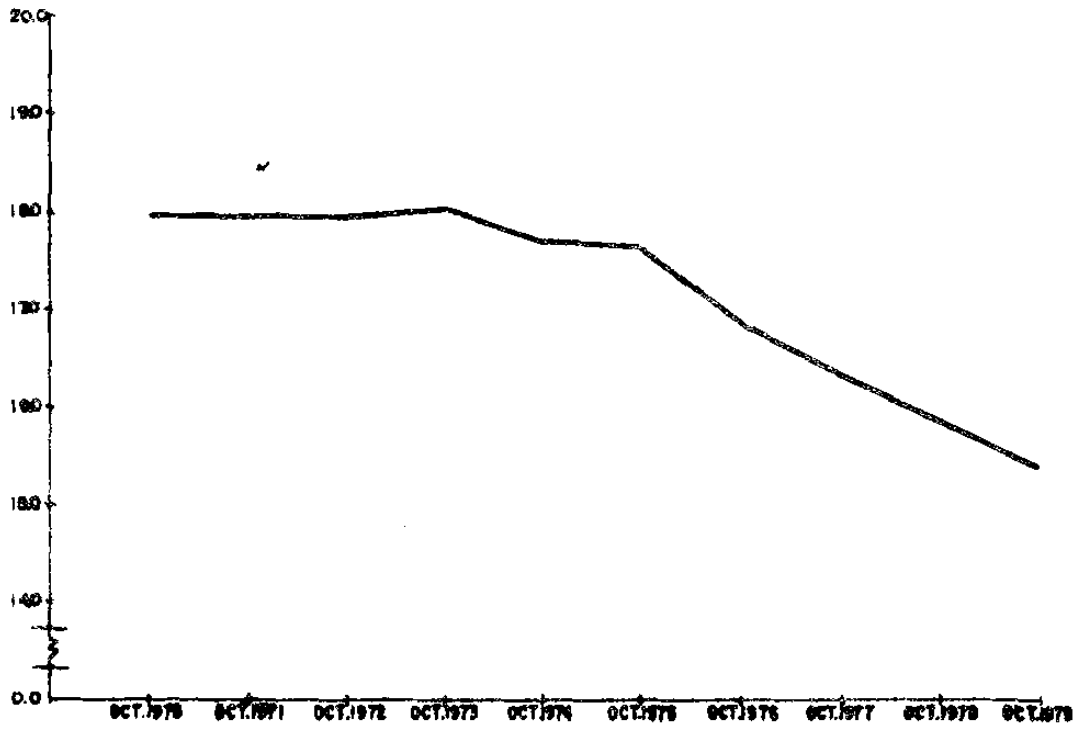
En la lámina 8 se hace la comparación entre la evolución del volumen total extraído de agua subterránea y la elevación media del nivel estático para el período de 1970 a 1979. En ella se aprecia que a extracciones superiores a 250 millones de m^3 corresponde un descenso en la elevación media del nivel estático del acuífero.

3.6 Comentarios

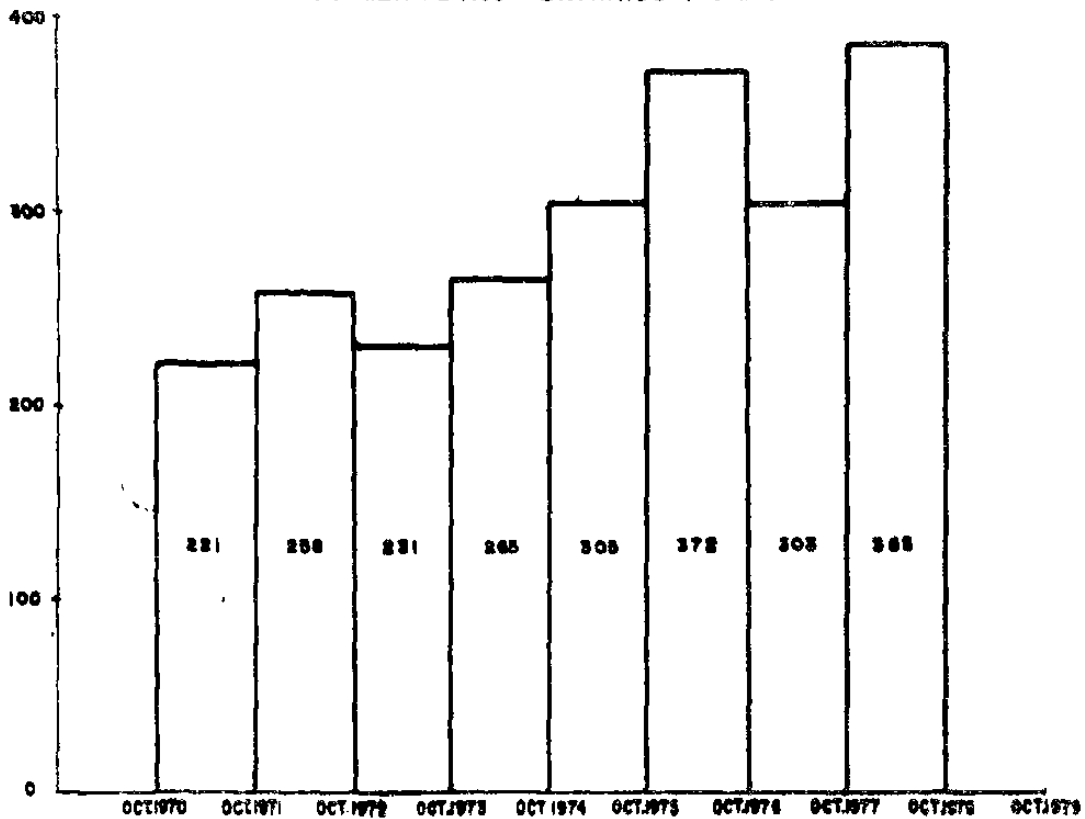
En resumen, la información empleada para llegar al planteamiento del modelo es la piezometría de 1970 a 1976, volúmenes de agua subterránea extraída por pozo de 1970 a 1976, configuración de igual transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento regional y volumen de la recarga media anual del acuífero. Toda esta información se toma en forma individual para cada celda.

Las fronteras del acuífero se definieron en base a la geología y al comportamiento de los niveles piezométricos del acuífero, en el capítulo 5 se explica a detalle lo relacionado con la información requerida por el modelo y la forma de entrada.

ELEVACION MEDIA DEL NIVEL ESTATICO (M.S.N.M.)



VOLUMEN DE AGUA EXTRAIDO ($10^6 m^3$)



CAPITULO 4. DESARROLLO DEL MODELO

4.1 Ecuación de flujo en un acuífero confinado

La ecuación que define el flujo no establecido en un acuífero confinado es obtenida a partir de la ley de Darcy y el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad.

La ecuación de continuidad para un medio elástico, poroso y completamente saturado es obtenida de un volumen de control pequeño ($\Delta\Omega$), con centroide en P (x,y,z) y de dimensiones $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, figura A.

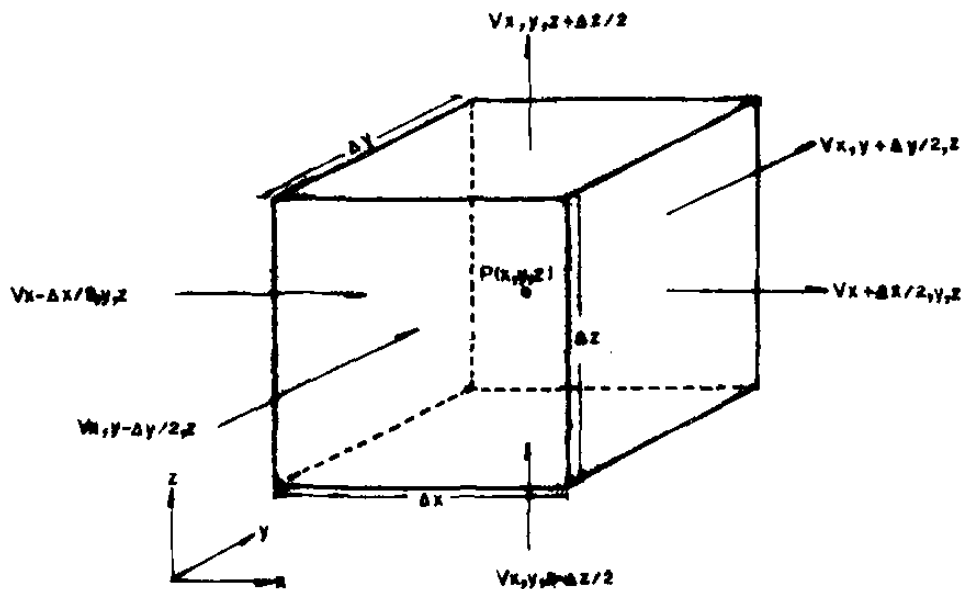


FIGURA A

Del desarrollo por series de Taylor, ecuaciones (4.2.1) y (4.2.2) (sección 4.2) se tiene que:

$$V_{x+\Delta x/2, y, z} = V_{x, y, z} + \frac{\partial V_{x, y, z}}{\partial X} \frac{\Delta X}{2} + \frac{\partial^2 V_{x, y, z}}{\partial X^2} \frac{(\Delta X/2)^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n V_{x, y, z}}{\partial X^n} \frac{(\Delta X/2)^n}{n!} \dots \quad (4.1.1)$$

$$V_{x-\Delta x/2, y, z} = V_{x, y, z} - \frac{\partial V_{x, y, z}}{\partial X} \frac{\Delta X}{2} + \frac{\partial^2 V_{x, y, z}}{\partial X^2} \frac{(\Delta X/2)^2}{2!} + \dots + \frac{(-1)^n \partial^n V_{x, y, z} (\Delta X/2)^n}{\partial X^n n!} \dots \quad (4.1.2)$$

El cambio de masa en la dirección x en un intervalo de tiempo es:

$$\rho V_{x+\Delta x/2, y, z} \Delta Y \Delta Z - \rho V_{x-\Delta x/2, y, z} \Delta Y \Delta Z \dots \quad (4.1.3)$$

donde ρ (densidad) es igual a masa entre volumen, despreciando en 4.1.1 y 4.1.2 los términos de orden igual o mayor a $(\Delta X/2)^2$ y sustituyéndolo en 4.1.3, tenemos:

$$\begin{aligned} (\rho V_{x, y, z} + \frac{\rho \partial V_{x, y, z}}{\partial X} \frac{\Delta X}{2}) \Delta Y \Delta Z - (\rho V_{x, y, z} - \frac{\rho \partial V_{x, y, z}}{\partial X} \frac{\Delta X}{2}) \Delta Y \Delta Z \\ = \frac{\rho \partial V_{x, y, z}}{\partial X} \Delta X \Delta Y \Delta Z \dots \quad (4.1.4) \end{aligned}$$

Para el eje de las Y y de las Z se procede igual. Quedando la ecuación de continuidad de la forma siguiente:

$$\left(\frac{\partial \rho V_{x, y, z}}{\partial X} + \frac{\partial \rho V_{x, y, z}}{\partial Y} + \frac{\partial \rho V_{x, y, z}}{\partial Z} \right) \Delta X \Delta Y \Delta Z + \left(\frac{\partial \rho e}{\partial t} \right) \Delta X \Delta Y \Delta Z = 0 \quad (4.1.5)$$

esto es:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) + \partial \rho e / \partial t = 0 \quad (4.1.6)$$

donde e (porosidad efectiva) es igual al volúmen de los huecos interconectados entre el volúmen total, y t es el tiempo, entonces $\partial pe/\partial t$ es el cambio en el almacenaje.

La ley de Darcy se define por:

$$V_i = -K_{i,j} \frac{\partial h}{\partial X_j} \quad \dots\dots(4.1.7)$$

$$\begin{aligned} i &= 1,2 \\ j &= 1,2 \end{aligned}$$

donde V_i es la componente de la velocidad en la dirección i con unidades (L/T), h es la carga hidráulica, en un medio homogéneo e isótropo, la ecuación 4.1.7 se transforma a:

$$\vec{V} = -K \text{ grad } h \quad \dots\dots(4.1.8)$$

Se tiene que: $h = P/\gamma + Z \quad \dots\dots(4.1.9)$

$$\gamma = \rho g \quad \dots\dots(4.1.10)$$

Z = Potencia de posición
 P = Presión
 g = Gravedad

Considerando la hipótesis que el suelo y el agua son elásticos, tenemos:

$$\rho = \rho_0 \{1 + 1/E_w (p - P_0)\} \quad \dots\dots(4.1.11)$$

$$e = e_0 + 1/E_s (P - P_0) \quad \dots\dots(4.1.12)$$

donde:

E = módulo de elasticidad del agua
 E_w = módulo de elasticidad del suelo
 P^s = Presión inicial
 e_0 = porosidad inicial
 ρ_0 = densidad inicial

Si definimos:

$$B_w = 1/E_w \quad ; \quad B_s = 1/E_s \quad \dots\dots(4.1.13)$$

tenemos:

$$\rho = \rho_0 + \rho_0 B_w (P - P_0) \quad \dots (4.1.14)$$

$$e = e_0 + B_s (P - P_0) \quad \dots (4.1.15)$$

multiplicando (4.1.14) por (4.1.15)

$$\rho \cdot e = e_0 \rho_0 + e_0 \rho_0 B_w (P - P_0) + e_0 B_s (P - P_0) + \rho_0 B_w B_s (P - P_0)^2 \quad \dots (4.1.16)$$

y despreciando los términos cuadráticos por ser pequeños:

$$\rho \cdot e = \rho_0 \{e_0 + (B_s + e_0 B_w) (P - P_0)\} \quad \dots (4.1.17)$$

$$B = B_s + B_w e_0 \quad \dots (4.1.18)$$

$$\rho e = \rho_0 \{e_0 + B (P - P_0)\} \quad \dots (4.1.19)$$

y considerando que:

$$\rho \approx \rho_0 \quad \dots (4.1.20)$$

$$\rho e = \rho_0 \{e_0 + B (P - P_0)\} \quad \dots (4.1.21)$$

y como:

$$h = P / \rho g + Z \quad \dots (4.1.22)$$

tenemos que:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \rho_0 B \frac{\partial P}{\partial t} = \rho_0 g^2 B \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (4.1.23)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (4.1.24)$$

como:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = \rho \operatorname{div} \vec{V} + \vec{V} \operatorname{grad} \rho \quad \dots\dots (4.1.25)$$

tenemos:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho \vec{V}) &= \rho \left(\frac{\partial V_{x,y,z}}{\partial X} + \frac{\partial V_{x,y,z}}{\partial Y} + \frac{\partial V_{x,y,z}}{\partial Z} \right) + V_{x,y,z} \frac{\partial \rho}{\partial X} + \dots \\ &\quad + V_{x,y,z} \frac{\partial \rho}{\partial Y} + V_{x,y,z} \frac{\partial \rho}{\partial Z} \\ &= \rho \left\{ \frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial h}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(k \frac{\partial h}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(k \frac{\partial h}{\partial Z} \right) \right\} + \\ &\quad V_{x,y,z} \frac{\partial \rho}{\partial X} + V_{x,y,z} \frac{\partial \rho}{\partial Y} + V_{x,y,z} \frac{\partial \rho}{\partial Z} \quad \dots\dots (4.1.26) \end{aligned}$$

donde: $h = h(x, y, z, t)$

$K = K(x, y, z)$

determinando los términos siguientes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \rho B_w \frac{\partial P}{\partial x} = \rho^2 g B_w \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \rho B_w \frac{\partial P}{\partial y} = \rho^2 g B_w \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = \rho B_w \frac{\partial P}{\partial z} = \rho^2 g B_w \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \dots (4.1.27)$$

y sustituyendo (4.1.7), (4.1.27) en (4.1.26) tenemos:

$$\begin{aligned} &- \left\{ K \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 \rho^2 g B_w + K \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \rho^2 g B_w + K \rho^2 g B_w \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right\} \\ &- \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) \left\} + \rho g B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4.1.28) \end{aligned}$$

reagrupando términos:

$$\rho g B \frac{\partial h}{\partial t} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right\}$$

$$- \rho^2 g B_w K \left\{ \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \right\} = 0 \quad \dots (4.1.29)$$

Despreciando los términos cuadráticos, en el caso de un movimiento casi horizontal el término $\partial h / \partial z$ es muy pequeño y considerando que el acuífero no sufre cambios muy bruscos de carga h , se implica que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

Así la ecuación para un acuífero confinado queda:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \rho g B \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (4.1.30)$$

donde:

$\rho g B = \rho g (B_s + e_o B_w) = S_s =$ coeficiente de almacenamiento específico.

Para un medio homogéneo e isótropo, la ecuación (4.1.30) queda:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (4.1.31)$$

pero como:

$$\bar{h}(x, y, t) = \frac{1}{b} \int_0^b h(x, y, z, t) dz \quad \dots (4.1.32)$$

donde:

$b =$ espesor del acuífero

$\bar{h} =$ carga hidráulica media.

Sustituyendo \bar{h} por h , tenemos:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{1}{b} \int_0^b h dz \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{1}{b} \int_0^b h dz \right) + \frac{1}{b} \int_0^b \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dz = \frac{1}{b} \frac{S_s}{K} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^b h dz \quad \dots (4.1.33)$$

efectuamos las integraciones:

$$\frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial z} \Big|_b - \frac{\partial \bar{h}}{\partial z} \Big|_0 \right) = \frac{S_s \cdot b}{K \cdot b} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad \dots (4.1.34)$$

como la velocidad en las fronteras superior e inferior del acuífero es nula, entonces la ecuación (4.1.31), nos queda de la forma siguiente:

$$\frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad \dots (4.1.35)$$

donde:

$S = S_s \cdot b =$ coeficiente de almacenamiento

$T = K \cdot b =$ coeficiente de transmisibilidad

Para el caso de un acuífero no homogéneo e isótropo, al seguir el mismo procedimiento, la ecuación (4.1.30) es de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (4.1.36)$$

4.2 Aproximación por diferencias finitas

El método de diferencias finitas surgió en 1910 (L. F. Richardson) como un método aproximado para calcular la solución de ecuaciones diferenciales parciales, este método al igual que otros cayó en el olvido por la falta de equipos apropiados de cálculo que ayudaran a resolver el sistema de ecuaciones, ya que realizar los cálculos manualmente tomaría mucho tiempo, lo que obligó a que se utilizaran otros métodos. El método de diferencias finitas utiliza la matemática convencional y sustituye las derivadas por diferencias finitas hasta llegar a obtener un

sistema de ecuaciones algebraicas para toda la zona de estudio y el cual puede ser resuelto por métodos directos o iterativos.

El método de diferencias finitas se basa en el desarrollo por series de Taylor (figura B), de la forma siguiente:

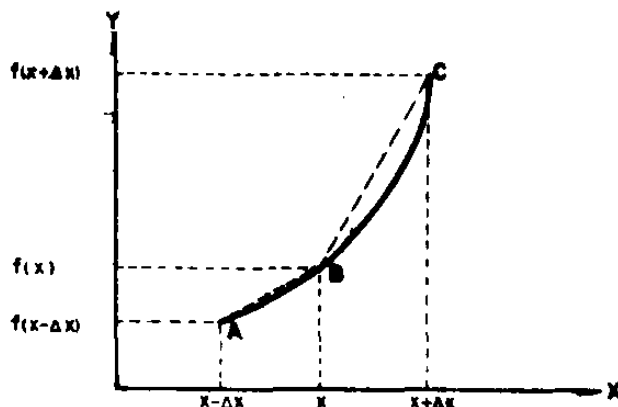


FIGURA B

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{df(x)}{dx} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots + \frac{d^n f(x)}{dx^n} \frac{(\Delta x)^n}{n!} \dots (4.2.1)$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \frac{df(x)}{dx} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} - \dots + \frac{(-1)^n d^n f(x)}{dx^n} \frac{(\Delta x)^n}{n!} \dots (4.2.2)$$

Si la ecuación (4.2.1) la resolvemos para df/dx tenemos:

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} + o(\Delta x) \dots (4.2.3)$$

donde el término $o(\Delta x)$ es el término que falta de la serie.

Despreciando el término $0(\Delta x)$ de (4.2.3) obtenemos la aproximación de la derivada de f por diferencias hacia adelante:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad \dots\dots(4.2.3')$$

Resolviendo la ecuación (4.2.2) para df/dx y despreciando el término $0(\Delta x)$ obtenemos la aproximación de la derivada de f por diferencias hacia atrás, esto es:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \dots\dots(4.2.4)$$

El error que tenemos en ambas aproximaciones es el término que despreciamos de la serie de Taylor, éste es de $0(\Delta x)$.

Para obtener la aproximación a la primera derivada por diferencias centradas a (4.2.1) le restamos (4.2.2), dando la ecuación siguiente:

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} + 0\{(\Delta x)^2\} \quad \dots\dots(4.2.5)$$

donde el término $0\{(\Delta x)^2\}$ es el término que falta de la serie, despreciándolo tenemos:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \dots\dots(4.2.5')$$

el error que tenemos en esta aproximación es de $0\{(\Delta x)^2\}$

Para la aproximación a la segunda derivada se suma (4.2.1 a 4.2.2), dando:

$$\frac{d^2f(x)}{dx^2} = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} + 0\{(\Delta x)^2\} \quad (4.2.6)$$

despreciando el término $0\{(\Delta x)^2\}$ tenemos:

$$\frac{d^2f(x)}{dx^2} \approx \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad \dots\dots(4.2.6')$$

el error de la aproximación es de $0\{(\Delta x)^2\}$

Definiendo:

$$h(x, y, t) = h(i, j, k)$$

$$h(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = h(i + 1, j + 1, k + 1)$$

donde i, j, k (figura C) son los índices de x, y , y t (tiempo) respectivamente, y $\Delta x, \Delta y, \Delta t$, son los incrementos en x, y , y t , respectivamente.

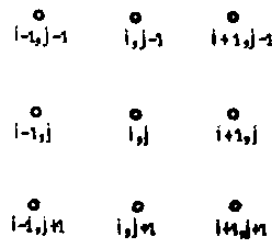


FIGURA C

Entonces de (4.2.5') y (4.2.6') se tiene:

$$\frac{\partial h_{i,j,k}}{\partial x} \approx \frac{h_{i-1,j,k} - h_{i+1,j,k}}{2\Delta x} \quad ;$$

$$\frac{\partial h_{i,j,k}}{\partial y} \approx \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j+1,k}}{2\Delta y} \quad \dots\dots(4.2.7)$$

$$\frac{\partial^2 h_{i,j,k}}{\partial x^2} \approx \frac{h_{i+1,j,k} - 2h_{i,j,k} + h_{i-1,j,k}}{(\Delta x)^2}$$

$$\frac{\partial^2 h_{i,j,k}}{\partial y^2} \approx \frac{h_{i,j+1,k} - 2h_{i,j,k} + h_{i,j-1,k}}{(\Delta y)^2} \quad \dots\dots(4.2.8)$$

y de (4.2.4) tenemos que :

$$\frac{\partial h_{i,j,k}}{\partial t} \approx \frac{h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1}}{\Delta t} \quad \dots\dots(4.2.9)$$

Expresando la ecuación (4.1.36) de la forma siguiente:

$$\frac{T_{xx}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{T_{yy}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots (4.2.10)$$

Para obtener una expresión para la transmisibilidad en el punto medio entre dos vértices, desarrollamos la serie de Taylor entre los vértices (i,j) e $(i-1,j)$. Considerando por simplicidad, la ecuación de una dimensión solamente, tenemos que la transmisibilidad entre (i,j) e $(i-1, j)$, según (4.2.2) es:

$$T_{xx}(i-1/2, j) = T_{xx}(i, j) - \frac{\partial T_{xx}(i, j)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} + \dots + \frac{\partial^2 T_{xx}(i, j)}{\partial x^2} \frac{(\Delta x/2)^2}{2!} - \dots \quad \dots (4.2.11)$$

donde:

$$T_{xx}(i, j) = T_{xx}(i-1/2, j) + \frac{\partial T_{xx}(i, j)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \frac{\partial^2 T_{xx}(i, j)}{\partial x^2} \frac{(\Delta x/2)^2}{2!} + \dots \quad \dots (4.2.12)$$

y de (4.2.1) tenemos:

$$T_{xx}(i+1/2, j) = T_{xx}(i, j) + \frac{\partial T_{xx}(i, j)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} + \frac{\partial^2 T_{xx}(i, j)}{\partial x^2} \frac{(\Delta x/2)^2}{2!} + \dots \quad \dots (4.2.13)$$

donde:

$$T_{xx}(i, j) = T_{xx}(i+1/2, j) - \frac{\partial T_{xx}(i, j)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \frac{\partial^2 T_{xx}(i, j)}{\partial x^2} \frac{(\Delta x/2)^2}{2!} - \dots \quad \dots (4.2.14)$$

despreciando los términos cuadráticos o de orden mayor en (4.2.11) y (4.2.13), luego usandolas con (4.2.7) y (4.2.8) para determinar:

$$\begin{aligned}
& T_{xx}(i,j) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial T_{xx}(i,j)}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} = \\
& \left(\frac{T_{xx}(i,j)}{(\Delta x)^2} - \frac{1}{2\Delta x} \frac{\partial T_{xx}(i,j)}{\partial x} \right) (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
& + \left(\frac{T_{xx}(i,j)}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{2\Delta x} \frac{\partial T_{xx}(i,j)}{\partial x} \right) (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.2.15)
\end{aligned}$$

despreciando los términos cuadráticos o de orden mayor en (4.2.12) y (4.2.14), sustituyéndolas luego en (4.2.15), tenemos:

$$\begin{aligned}
& T_{xx}(i,j) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial T_{xx}(i,j)}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} = T_{xx}(i-1/2,j) \cdot \\
& \left(\frac{h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \right) \\
& + T_{xx}(i+1/2,j) \left(\frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \right) \quad \dots (4.2.16)
\end{aligned}$$

para el eje de las "y" se procede igual. Finalmente para la aproximación por diferencias finitas de (4.1.36) usamos (4.2.9) y (4.2.16), dando:

$$\begin{aligned}
& T_{xx}(i-1/2,j) \left(\frac{h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \right) + \\
& T_{xx}(i+1/2,j) \left(\frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \right) + \\
& + T_{yy}(i,j-1/2) \left(\frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} \right) + \\
& + T_{yy}(i,j+1/2) \left(\frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} \right) = \\
& = S \left(\frac{h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1}}{\Delta t} \right) - Q \quad \dots (4.2.17)
\end{aligned}$$

4.3 Consideraciones sobre los métodos de solución adoptados

Los métodos de solución que inicialmente se usaron fueron dos, ambos de diferencias finitas. Uno es el DAS desarrollado por Cruickshank y Chávez Guillén (1969), consta de dos programas: Uno define la geometría del acuífero (GEOMETRI) y el otro predice las cargas hidráulicas a futuro (ACUI). Este último resuelve el sistema de ecuaciones resultante que constituye un esquema implícito por el método iterativo de Gauss-Seidel con coeficiente de sobrerrelajación hasta que la solución quede dentro de la tolerancia fijada.

El otro método es el usado por Illinois State Water Survey, desarrollado por Prickett y Lonquist (1971), este método es una variedad del IADI (Iterative Alternating Direction Implicit Procedure) y resuelve el problema planteado que resulta ser una matriz tridiagonal con una combinación del método implícito de dirección alternante de Peaceman y Rachford (1955), el método Gauss esto se hace primero para las columnas y después para los renglones completando así una iteración y se hacen tantas iteraciones como sea necesario para que quede dentro de la tolerancia el error. El método en conjunto es rápido, preciso y tiene aplicación a muchos problemas de agua subterránea.

Después de manejar inicialmente estos dos métodos en forma conjunta, se decidió la aplicación de solo uno, ya que la principal diferencia entre ambos es la forma de resolver el sistema de ecuaciones, para lo cual el método usado por Illinois State Water Survey resulta más rápido; además de presentar ventajas en cuanto al manejo de datos de entrada.

4.4 Método iterativo implícito en dirección alternante (IADI)

Este método consiste en reducir el sistema de ecuaciones de la forma (4.2.17) a un sistema tridiagonal, procediéndose en primer lugar por columnas considerando cada una de ellas separadamente. En una columna se considera el sistema de ecuaciones correspondientes a sus vértices, tomándose como variables las alturas piezométricas de los vértices de la columna que se está procesando, en tanto que se mantienen constantes los correspondientes a las columnas adyacentes. El sistema de ecuaciones resultante para cada columna se resuelve por el método de eliminación de Gauss, tal como lo utilizaron Peaceman y Rachford (1955), el conjunto de ecuaciones a lo largo de una columna así obtenido, es un sistema implícito en la dirección de las columnas y explícito en la dirección de los renglones, una vez que todas las columnas han sido procesadas se aplica el mismo sistema a los renglones y cuando se concluye con todos]

renglones se ha completado una iteración. El proceso descrito se repite el número de veces necesario para conseguir la convergencia de los resultados, la cual una vez alcanzada concluye los cálculos para un incremento de tiempo. Las alturas piezométricas así calculadas se utilizan como niveles iniciales para el siguiente incremento del tiempo, comenzando de nuevo el mismo proceso. Peaceman y Rachford (1955) indican que esta técnica es incondicionalmente estable, con independencia del valor asignado al incremento de tiempo.

Modificando y reordenando la ecuación (4.2.17), se facilita la resolución de las ecuaciones por columnas y renglones. En primer lugar si se supone que la malla está formada por cuadrados, de modo que $\Delta y = \Delta x$, la ecuación (4.2.17) se modifica multiplicando ambos miembros por Δx^2 , dando:

$$T_{i-1,j,2} (h_{i-1,j} - h_{i,j}) + T_{i,j,2} (h_{i+1,j} - h_{i,j}) + \dots$$

$$T_{i,j,1} (h_{i,j+1} - h_{i,j}) + T_{i,j-1,1} (h_{i,j-1} - h_{i,j}) =$$

$$(S(\Delta x)^2/\Delta t) (h_{i,j} - h_{\phi i,j}) - Q_{i,j} \quad \dots (4.4.1)$$

donde:

$$T_{i-1,j,2} = T_{xx}(i-1/2, j)$$

$$T_{i,j,2} = T_{xx}(i+1/2, j)$$

$$T_{i,j-1,1} = T_{yy}(i, j-1/2)$$

$$T_{i,j,1} = T_{yy}(i, j+1/2)$$

$$h_{i,j} = h_{i,j,k}$$

$$h_{\phi i,j} = h_{i,j,k-1}$$

Desarrollando la ecuación (4.4.1), cambiando los signos y agrupando los términos en $h_{i,j}$ se llega a:

$$h_{i,j} (T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S(\Delta x)^2/\Delta t) -$$

$$\begin{aligned}
 & - T_{i,j-1,2} h_{i-1,j} - T_{i,j,2} h_{i+1,j} - T_{i,j,1} h_{i,j+1} - \\
 & - T_{i,j-1,1} h_{i,j-1} = (S(\Delta x)^2/\Delta t) h_{\phi i,j} - Q_{i,j} \dots (4.4.2)
 \end{aligned}$$

Se puede escribir la ecuación (4.4.2) de dos maneras, una para resolver las ecuaciones por columnas y otra para la resolución por renglones.

Para el cálculo por columnas la ecuación (4.4.2) se puede escribir:

$$\begin{aligned}
 & - T_{i,j-1,1} h_{i,j-1} + h_{i,j} (T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + \\
 & + T_{i,j-1,1} + S(\Delta x)^2/\Delta t) - T_{i,j,1} h_{i,j+1} = \\
 & = (S(\Delta x)^2/\Delta t) h_{\phi i,j} - Q_{i,j} + T_{i-1,j,2} h_{i-1,j} + \\
 & + T_{i,j,2} h_{i+1,j} \dots (4.4.3)
 \end{aligned}$$

la ecuación (4.4.3) es de la forma:

$$AA_j h_{i,j-1} + BB_j h_{i,j} + CC_j h_{i,j+1} = DD_j \dots (4.4.3')$$

donde las constantes son:

$$\begin{aligned}
 AA_j &= - T_{i,j-1,1} \\
 BB_j &= T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S(\Delta x)^2/\Delta t \\
 CC_j &= - T_{i,j,1} \\
 DD_j &= (S(\Delta x)^2/\Delta t) h_{\phi i,j} - Q_{i,j} + T_{i-1,j,2} h_{i-1,j} + T_{i,j,2} h_{i+1,j}
 \end{aligned}$$

Para el cálculo por renglones se tendría una ecuación de la forma siguiente:

$$AA_i h_{i-1,j} + BB_i h_{i,j} + CC_i h_{i+1,j} = DD_i \dots (4.4.4)$$

donde las constantes son:

$$\begin{aligned}
 AA_i &= -T_{i-1,j,2} \\
 BB_j &= T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S(\Delta x)^2/\Delta t \\
 CC_i &= -T_{i,j,2} \\
 DD_i &= (S(\Delta x)^2/\Delta t) h_{\phi i,j} - Q_{i,j} + T_{i,j-1,1} h_{i,j-1} + \\
 &\quad + T_{i,j,1} h_{i,j+1}
 \end{aligned}$$

En notación matricial un sistema de ecuaciones de la forma (4.4.3') ó (4.4.4) es lo que se llama una matriz tridiagonal ya que presenta cuando mucho tres niveles piezométricos incógnita en cada una de las ecuaciones escritos por vértice, ya sea de columnas (ecuación (4.4.3')) o de renglones (ecuación (4.4.4)). La solución de un sistema de ecuaciones de columnas o renglones se obtiene por el método de eliminación de Gauss, incorporando lo que Peaceman y Rachford (1955) llaman vectores G y B, aplicados a matrices tridiagonales como se explica a continuación.

En el primer vértice del renglón $i = 1, j$, de la ecuación (4.4.4) se tiene:

$$AA_1 h_{0,j} + BB_1 h_{1,j} + CC_1 h_{2,j} = DD_1 \dots\dots (4.4.5)$$

Como no existe ningún vértice de coordenadas 0, j hacemos $AA_1 = 0$, con lo que se obtiene:

$$BB_1 h_{1,j} + CC_1 h_{2,j} = DD_1 \dots\dots (4.4.6)$$

de dónde:

$$h_{1,j} = DD_1/BB_1 - (CC_1/BB_1) h_{2,j} \dots\dots (4.4.7)$$

definimos:

$$G_1 = DD_1/BB_1 \dots\dots (4.4.8)$$

$$B_1 = CC_1/BB_1 \dots\dots (4.4.9)$$

sustituyendo las ecuaciones (4.4.8) y (4.4.9) en (4.4.7) tenemos:

$$h_{1,j} = G_1 - B_1 h_{2,j} \dots\dots (4.4.10)$$

quedando el nivel en el vértice $1, j$ como función de los parámetros G_1 y B_1 , que son conocidos y del nivel en el vértice $h_{i+1, j}$ ó $h_{2, j}$, únicamente.

Procediendo de la misma forma para el siguiente vértice del renglón nos queda:

$$AA_2 h_{1, j} + BB_2 h_{2, j} + CC_2 h_{3, j} = DD_2 \quad \dots (4.4.11)$$

sustituyendo la ecuación (4.4.10) en (4.4.11) tenemos:

$$BB_2 h_{2, j} = DD_2 - CC_2 h_{3, j} - AA_2 (G_1 - B_1 h_{2, j}) \dots (4.4.12)$$

reagrupando los términos y despejando $h_{2, j}$ queda:

$$h_{2, j} = (DD_2 - AA_2 G_1) / (BB_2 - AA_2 B_1) - CC_2 / (BB_2 - AA_2 B_1) h_{3, j} \quad \dots (4.4.13)$$

los factores conocidos de esta ecuación se definen:

$$G_2 = (DD_2 - AA_2 G_1) / (BB_2 - AA_2 B_1) \quad \dots (4.4.14)$$

$$B_2 = CC_2 / (BB_2 - AA_2 B_1) \quad \dots (4.4.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.4.14) y (4.4.15) en (4.4.13) nos queda:

$$h_{2, j} = G_2 - B_2 h_{3, j} \quad \dots (4.4.16)$$

para el siguiente vértice nos quedaría de la misma forma, o sea:

$$h_{i, j} = G_i - B_i h_{i+1, j} \quad \dots (4.4.17)$$

y para las columnas sería:

$$h_{i, j} = G_j - B_j h_{i, j+1} \quad \dots (4.4.18)$$

para el último vértice del renglón $i = n$, tenemos $CC_{n+1} = 0$

$$AA_n h_{n-1, j} + BB_n h_{n, j} = DD_n \quad \dots (4.4.19)$$

reordenando los términos de esta ecuación nos queda:

$$BB_n h_{n, j} = DD_n - AA_n h_{n-1, j} \quad \dots (4.4.20)$$

sustituyendo la ecuación (4.4.17) en (4.4.20) tenemos:

$$BB_n h_{n,j} = DD_n - AA_n (G_{n-1} - B_{n-1} h_{n,j}) \dots (4.4.21)$$

despejando $h_{n,j}$, tenemos:

$$h_{n,j} = (DD_n - AA_n G_{n-1}) / (BB_n - AA_n B_{n-1}) \dots (4.4.21')$$

Pero dado que el nivel piezométrico $h_{n,j}$ es función únicamente de valores conocidos, se puede definir:

$$G_n = (DD_n - AA_n G_{n-1}) / (BB_n - AA_n B_{n-1}) \dots (4.4.22)$$

cuya sustitución en la ecuación (4.4.21) nos lleva a:

$$h_{n,j} = G_n \dots (4.4.23)$$

Una vez conocido el nivel piezométrico $h_{n,j}$ la sustitución de su valor en la ecuación (4.4.17) permite conocer el nivel en el vértice $h_{n-1,j}$. Después sustituimos el nivel $h_{n-1,j}$ en la ecuación (4.4.17) para el cálculo de $h_{n-2,j}$ y así sucesivamente hasta encontrar el nivel de $h_{1,j}$, determinándose de este modo los niveles de todos los vértices del renglón j .

De las ecuaciones desarrolladas anteriormente (4.4.8, 4.4.9, 4.4.14, 4.4.15, 4.4.22) tenemos que la forma general de los términos G y B es:

$$G_N = (DD_N - AA_N G_{N-1}) / (BB_N - AA_N B_{N-1}) \dots (4.4.24)$$

$$B_N = CC_N / (BB_N - AA_N B_{N-1}) \dots (4.4.25)$$

en los cuales $N = i$ para cálculos por renglones y por similitud $N = j$ para cálculos por columnas. Además se hace AA_N igual a cero para el primer vértice de un renglón o columna y del mismo modo CC_N para el último vértice de una fila o columna.

En resumen, el proceso de cálculo de los niveles piezométricos por renglones o por columnas en un modelo digital comienza con el cálculo de los vectores G y B (ecuaciones 4.4.24 y 4.4.25) para los vértices de una columna o de un renglón, procediendo en sentido creciente de i, j . Durante este cálculo se halla el nivel en el último vértice de la columna o renglón y posteriormente, utilizando las ecuaciones (4.4.17 y 4.4.18), se calculan los demás niveles piezométricos de la columna o renglón siguiendo un orden decreciente de j o i respectivamente. Al terminar el cálculo de niveles en una columna o renglón determinado, la computadora avanza a calcular la siguiente columna o renglón hasta procesar todas; este procedimiento reduce consi-

derablemente las necesidades de almacenamiento en la computadora y el tiempo de cálculo.

4.5 Programa básico de simulación de acuíferos

El listado del programa básico de simulación de acuíferos está codificado en Fortran IV para resolver los sistemas de ecuaciones por columnas y por renglones (ecuaciones 4.4.3' y 4.4.4, respectivamente) y es el que se muestra anexo al final del texto.

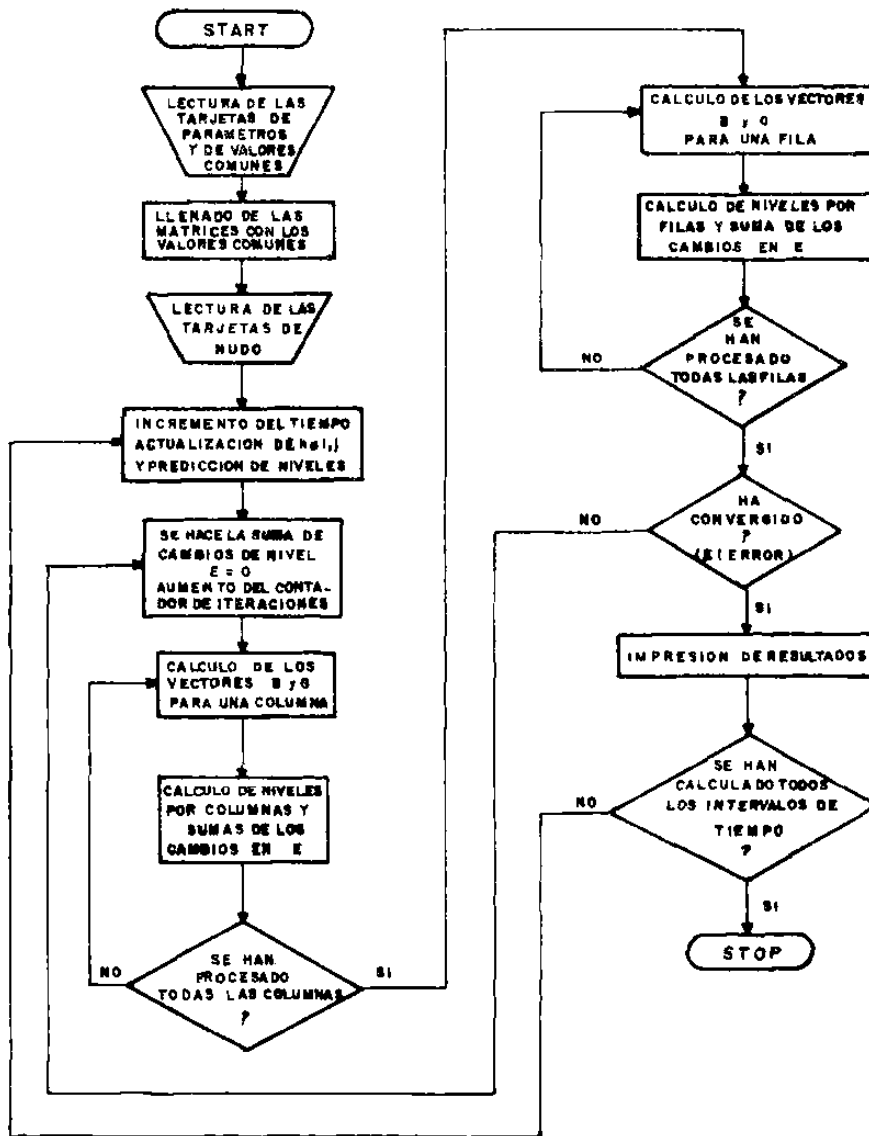
El diagrama de flujo (lámina 9) describe la lógica del programa hasta llegar a la predicción de la carga piezométrica para un cierto período de tiempo ($t + \Delta t$), partiendo de la elevación que se tiene en el tiempo t y para las condiciones de explotación y recarga que tenga lugar durante el incremento de tiempo. Para obtener este tipo de predicciones es necesario conocer la distribución de la transmisibilidad y del coeficiente de almacenamiento en el acuífero y el tipo de fronteras, si son impermeables su transmisibilidad es cero y si son de carga constante se asigna un coeficiente de almacenamiento muy grande. La información necesaria para el desarrollo del modelo es la descrita anteriormente, ésta es, a cada vértice se le asigna una transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, nivel piezométrico, extracción de agua subterránea y recarga. Otros datos necesarios son el número de columnas y renglones, el tamaño de las celdas, el incremento de tiempo, el número de incrementos de tiempo y la tolerancia de error.

El programa básico tiene tres partes principales. La primera, prepara a la computadora para el problema y se encarga de la entrada de datos, la segunda es la simulación propiamente dicha y por último la impresión de resultados.

En la primera parte se dimensionan los parámetros que lo necesitan, utilizándose la subrutina ERRSET para evitar los problemas que se presentan cuando los descensos del nivel piezométrico son muy pequeños, entonces los anula. Se llenan los vectores y matrices anteriormente definidos con los valores comunes que darían lugar al modelo de un acuífero de propiedades uniformes y en el cual cada vértice tuviera los mismos niveles iniciales y los mismos caudales de bombeo. Con el segundo READ se cambia cualquiera de los valores que intervienen como datos en los vértices deseados.

La segunda parte comienza con la variable (TIME) igual a cero, ésta sólo se utiliza para la impresión de rótulos de

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA BASICO DE SIMULACION (IADI)



salida y enseguida se hace una predicción de niveles piezométricos para el siguiente intervalo de tiempo; esta parte del programa predice el comportamiento piezométrico del acuífero en el futuro de acuerdo con su comportamiento en los intervalos de tiempo anteriores y cuya inclusión aumenta significativamente la convergencia de la solución, bajo la hipótesis de que la relación entre las diferencias de nivel piezométrico presentes y anteriores, F , será igual a la relación entre diferencias de nivel piezométrico futuras y presentes. Puesta en forma de ecuación, la relación de predicción es:

$$F = D/DL_{i,j} \quad \dots\dots(4.5.1)$$

donde:

$$D = h_{i,j} - h_{\emptyset i,j}; DL_{i,j} = D \text{ anterior} \quad (4.5.2)$$

entonces hacemos la predicción:

$$h_{i,j} = h_{i,j} + D * F \quad \dots\dots(4.5.3)$$

Cuando F no está definida, como sucede por ejemplo en los dos primeros intervalos de tiempo, se hace igual a 1.0 y también se previene el error de división por cero, al restringir el valor de F a cifras razonables, haciéndose enseguida el cálculo de las ecuaciones por columnas de la forma dada por la ecuación (4.4.3'). Durante las iteraciones impares se procesan las columnas siguiendo el orden de números de columna crecientes y en los pares los números de columna decrecientes. Este método de cálculo es mucho más eficiente que el cálculo por columnas siguiendo siempre el mismo orden.

Después de los cálculos de los vectores G y B , se hallan los niveles piezométricos de los vértices de cada columna siguiendo un orden contrario al llevado por el cálculo de G y B . Se añaden al término E los niveles, manteniendo en E la suma de dichos cambios, al final del cálculo de todas las columnas por el procedimiento anterior, el programa calcula por renglones los niveles de los vértices de la misma forma usando la ecuación (4.4.4).

Al final del cálculo por renglones se comparan E y $ERROR$ y si E es mayor que $ERROR$ (valor límite escogido leído en la tarjeta de parámetros), la solución todavía no es satisfactoria y se regresa el programa a hacer una nueva iteración, hasta que los resultados queden dentro de la tolerancia, pasándose entonces a la impresión de resultados al final de este intervalo de tiempo; posteriormente, se regresa a calcular los niveles para el siguiente intervalo de tiempo tomando los últimos resultados como datos y así sucesivamente hasta terminar con todos los intervalos de tiempo.

CAPITULO 5. INFORMACION REQUERIDA POR EL MODELO

5.1 Geometría

Para determinar el área que abarca el modelo se analizaron las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero del valle del Yaqui, definiéndose las fronteras siguientes, (lámina 10).

- a) Al sur se encuentra la costa, definiéndose ésta como frontera de carga constante de elevación del nivel estático igual a cero.
- b) Al norte y noreste, fronteras impermeables con transmisibilidad cero definidas por los afloramientos de rocas ígneas.
- c) Al oeste, frontera de carga constante porque dentro del período considerado no presenta variación en la elevación del nivel estático y además la zona de explotación del agua subterránea está distante.
- d) Al este, frontera de carga constante por estar distante de la zona de explotación y no contar con información piezométrica.

El área que abarca el modelo es de 3,408 Km² y el tamaño de las celdas es de 4 Km x 4 Km., lo cual nos dá un total de 213 celdas.

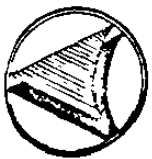
5.2 Período seleccionado para la calibración

El período seleccionado para la calibración del modelo es de 6 años siendo éstos de Octubre de 1970 a Octubre de 1976, dentro de los cuales se tiene la información más confiable, aún cuando la más antigua es la que utilizó Icatec (1970) en su estudio, corresponde a los años 1968-1969, la más reciente son las configuraciones de elevación del nivel estático desarrolladas en el presente estudio, siendo éstas las de Octubre de 1977, Marzo y Octubre de 1979 (Láminas 5, 6 y 11, respectivamente), de 1978 no se tiene información.

La elevación del nivel estático de 1970 (lámina 12) es la inicial para el modelo y a partir de ella se calcularon las elevaciones anuales hasta 1976, comparándolas con las observadas hasta obtener una simulación del comportamiento del acuífero. Este proceso constituye la calibración del modelo y en el capítulo 6 se comenta más ampliamente.

5.3 Características hidrodinámicas, volúmenes de extracción y de recarga asignados a cada celda

A cada celda se le asignó una carga hidráulica inicial, una transmisibilidad, un coeficiente de almacenamiento y un volumen de extracción, calculado considerando el volumen de agua extraído en cada celda por los pozos que están dentro de ella. Los datos variables para cada uno de los ciclos considerados para el empleo y calibración del modelo fueron los volúmenes extraídos en cada celda y los volúmenes de recarga, habiéndose tomado inicialmente una recarga anual media uniforme en toda el área abarcada por el modelo; posteriormente al comparar los resultados calculados con los observados, se fue modificando la recarga por celda hasta lograr simular el comportamiento del acuífero.

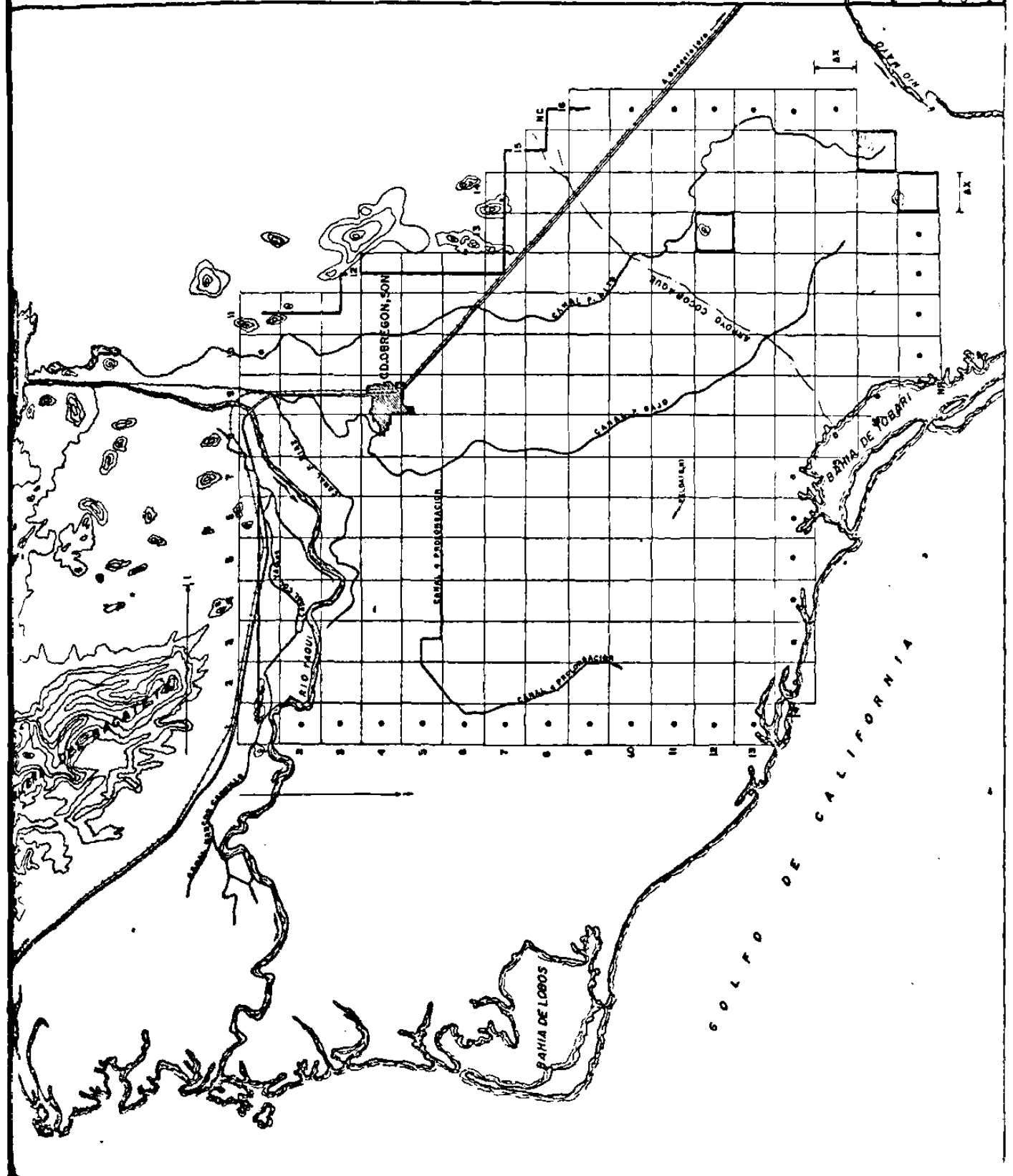


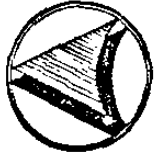
SIMBOLOGIA

- POBLACION: [Symbol: Shaded rectangle]
- CARRIQUERA: [Symbol: Dashed line]
- FERRICARRIL: [Symbol: Solid line with cross-ticks]
- CANAL: [Symbol: Solid line]
- RIO: [Symbol: Wavy line]
- ARROYO: [Symbol: Dashed wavy line]
- FRONTERA DE CARGA CONSTANTE: [Symbol: Line with small circles]
- FRONTERA IMPERMEABLE: [Symbol: Line with larger circles]

ESCALA 1:400 000
KILOMETROS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 DIVISION DE ESTUDIOS DE GRADUACION
 VALLE DEL YAGUACAPAN, SOMORA
 MALLA DEL MODELO Y TIPO DE FRONTERAS
 TESIS DE MAESTRIA: Aplicación del método de diferencias finitas a orillas de un acuario continuo
 EFRAIN SALINAS SALINAS





SIMBOLOGIA

- POBLACION
- CARRERA
- FERROCARRIL
- CANAL
- RIO
- ARROYO
- CURVA DE IGUAL ELEVACION
- DEL NIVEL ESTÁTICO EN MAR

ESCALA 1:400 000
KILOMETROS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES
VALLE DEL YABUT, SONORA
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO
OCTUBRE 1979 (OBSERVADA)
TESIS DE MAESTRÍA Aplicación del método de
diferencias finitas a las obras de un acueducto confinado
L. FRANK SALINAS SALAZAR



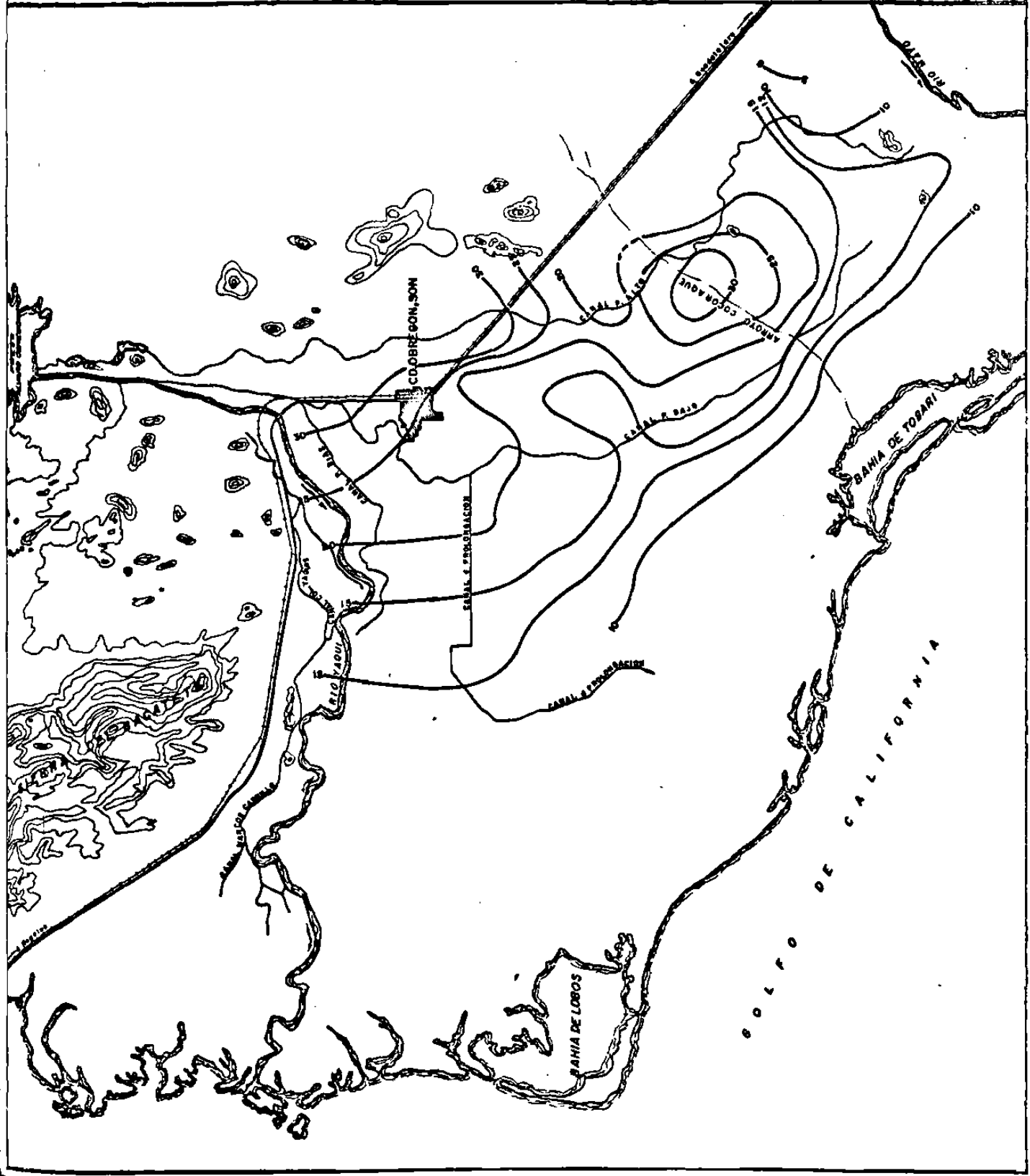


SIMBOLOGIA

- POBLACION: [Symbol: solid black shape]
- CANINETERA: [Symbol: dashed line]
- FERRUCARRIL: [Symbol: line with cross-ticks]
- CANAL: [Symbol: solid line]
- RIO: [Symbol: wavy line]
- AMOTO: [Symbol: line with dots]
- CURVA DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO EN M.S.N.M.: [Symbol: solid contour line]

ESCALA 1:400 000
0 1 2
KILOMETROS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DIVISION DE ESTUDIOS SUFICIENTES
VALLE DEL TAOUI, SONORA
ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO
OCTUBRE 1970 (S.F.A.R.M.A.)
TESIS DE MAESTRIA, Aplicacion del metodo de
diferencias finitas al estudio de un valle con fines
EFRAIN SALINAS SALINAS



CAPITULO 6. CALIBRACION DEL MODELO

6.1 Consideraciones Generales

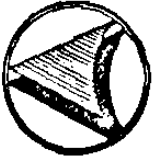
La calibración de los modelos matemáticos que simulan el comportamiento de un acuífero consiste en variar dentro de un cierto rango las características supuestas inicialmente (coeficiente de almacenamiento, transmisibilidades, recarga vertical del acuífero por celda, etc.), de manera que la evolución obtenida se fuera ajustando a la historia piezométrica observada.

Para el acuífero del valle de Yaqui la calibración del modelo consistió en la predicción de la elevación del nivel estático de 1976 partiendo de la elevación del nivel estático observada en Octubre de 1970. Para obtener lo anterior se modificó principalmente la recarga media anual por celda, ya que se observó que ésta se presenta en la zona de los canales principales y del arroyo Cocoraque, teniéndose que su magnitud es de $277 \times 10^6 \text{ m}^3$ la cual es un 10% mayor que la calculada anteriormente. Otro dato que se varió para la calibración del modelo es la transmisibilidad, aunque en menor grado. El coeficiente de almacenamiento se consideró el mismo en casi todo el acuífero a excepción del norte del área considerada donde a ocho celdas se les asignó un coeficiente de almacenamiento menor, para poder reproducir la evolución piezométrica que se presenta en ellas esta consideración concuerda con las características hidrodinámicas de la zona, ya que se presentan afloramientos de rocas ígneas y menor coeficiente de almacenamiento en sus proximidades.

6.2 Calibración y error

La calibración del modelo se logró con la distribución de la recarga que se presenta en la lámina 20, y tal como se mencionó anteriormente, se aprecia que ésta se presenta en la zona de los canales principales, arroyo Cocoraque, canal 4 prol. y el río Yaqui. El grado de calibración del modelo se puede apreciar al comparar la configuración del nivel estático calculada para 1976 por el modelo (lámina 13) con la observada para ese año, (lámina 14).

Otra herramienta para visualizar el grado de ajuste del modelo son las configuraciones de la evolución de la elevación del nivel estático correspondiente a las celdas que se muestran en las láminas (15 a 18). En ellas se aprecia también la tendencia de la evolución de la elevación del nivel estático a disminuir con el tiempo como uno de los efectos de la sobreexplotación.

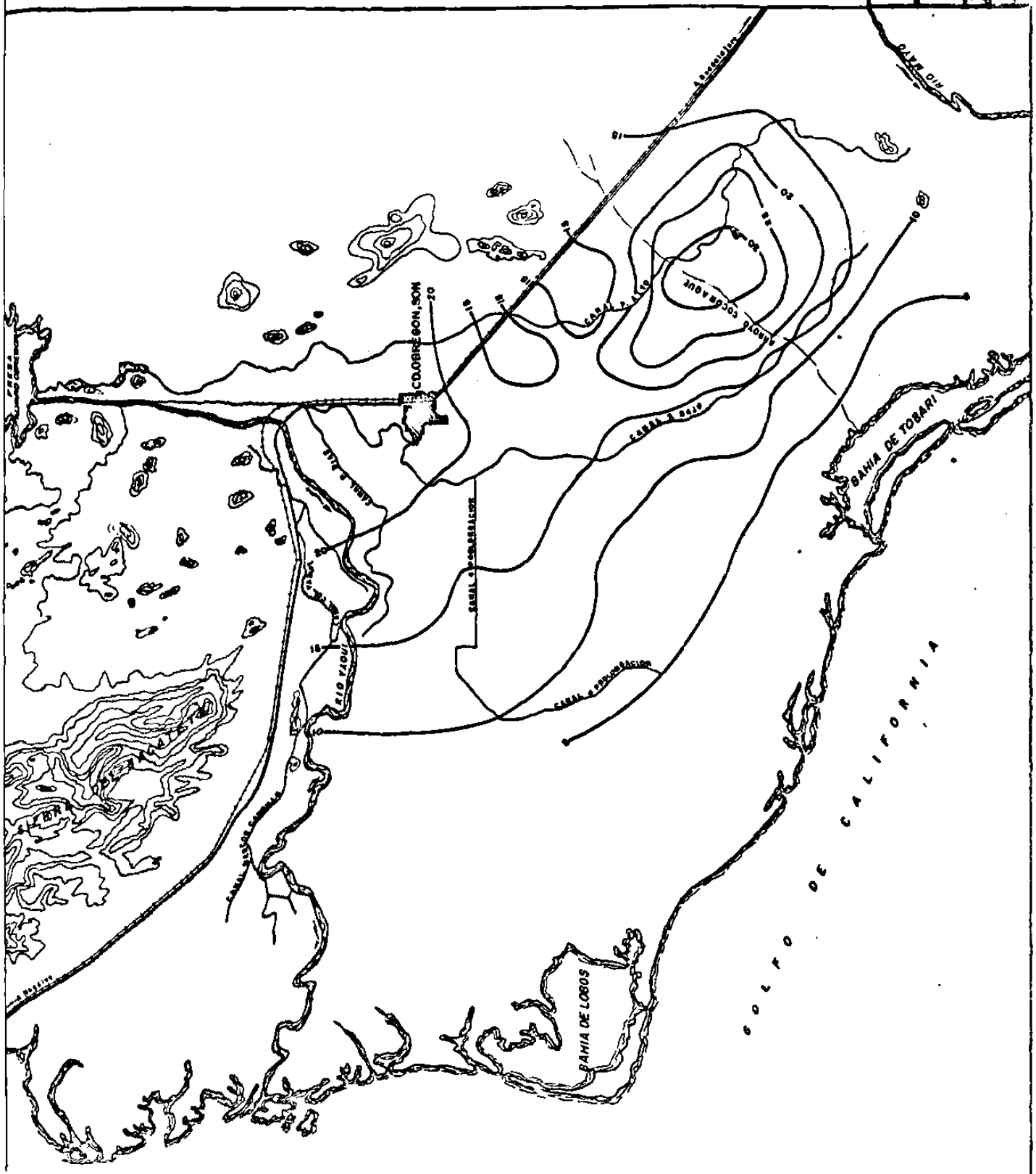


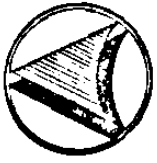
SIMBOLOGIA

- POBLACION
- CARRETERA
- FERRICARRIL
- CANAL
- RIO
- APROYO
- CURVA DE NIVEL ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO EN METROS

ESCALA 1:400 000

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
 DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES
 VALLE DEL TABUÍ, SONORA
 ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO
 1976 (CALCULADA)
 TESIS DE MAESTRIA: Aplicación del método de
 mínimos cuadrados al estudio de un curso continuo
 EFRAIN SALINAS SALINAS





SIMBOLOGIA

- POBLACION _____
- CARRETERA _____
- PERICARRIL _____
- CANAL _____
- RIO _____
- ARROYO _____
- CURVA DE IGUAL ELEVACION _____
- DEL NIVEL ESTADISTICO EN M.S.N.M. _____

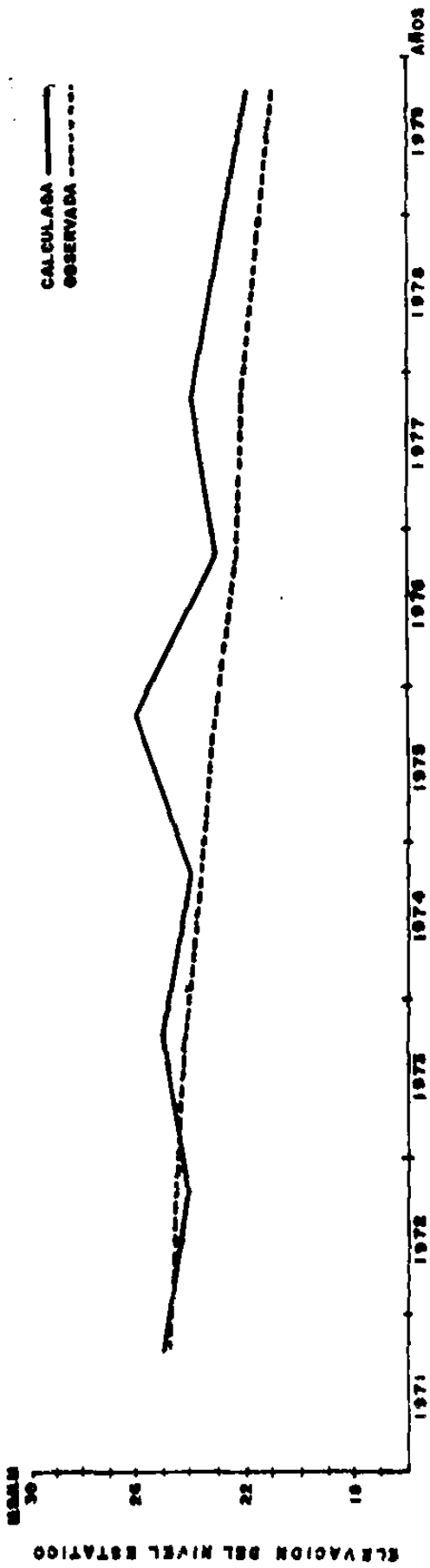
ESCALA 1:400 000
KILOMETROS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES
VALLE DEL YAGUI, SONORA
ELEVACION DEL NIVEL ESTADISTICO
OCTUBRE 1976 (OBSERVADA)
TESIS DE MAESTRIA. Aplicacion del metodo de
diferencias finitas al analisis de un acuífero en el fondo de
EFRAIN SALINAS SALINAS



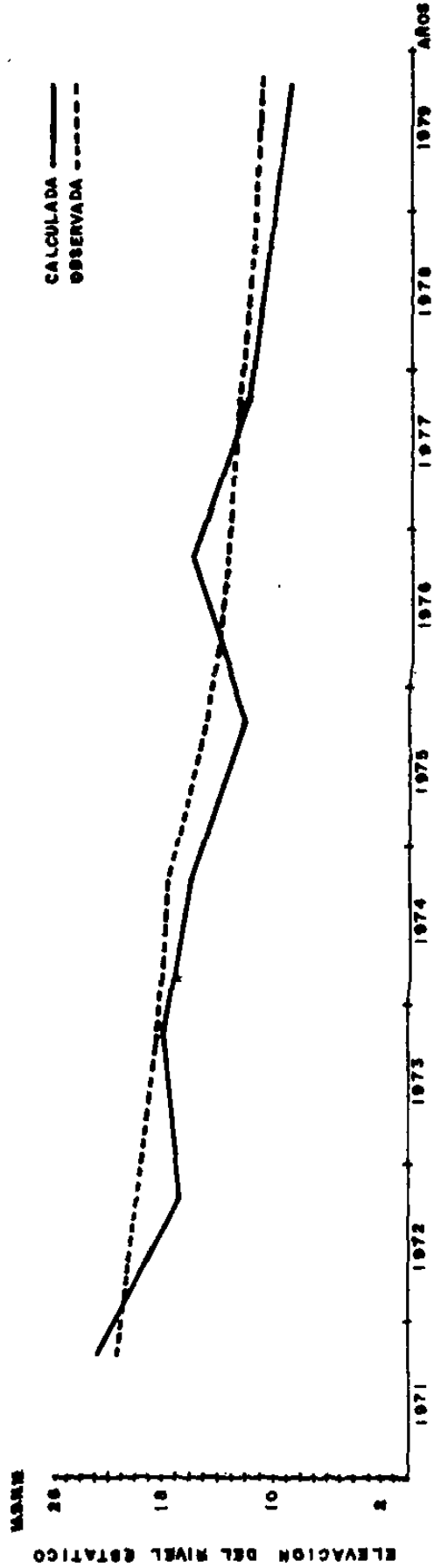
EVOLUCION DEL NIVEL ESTATICO

CELDA No 7-2



EVOLUCION DEL NIVEL ESTATICO

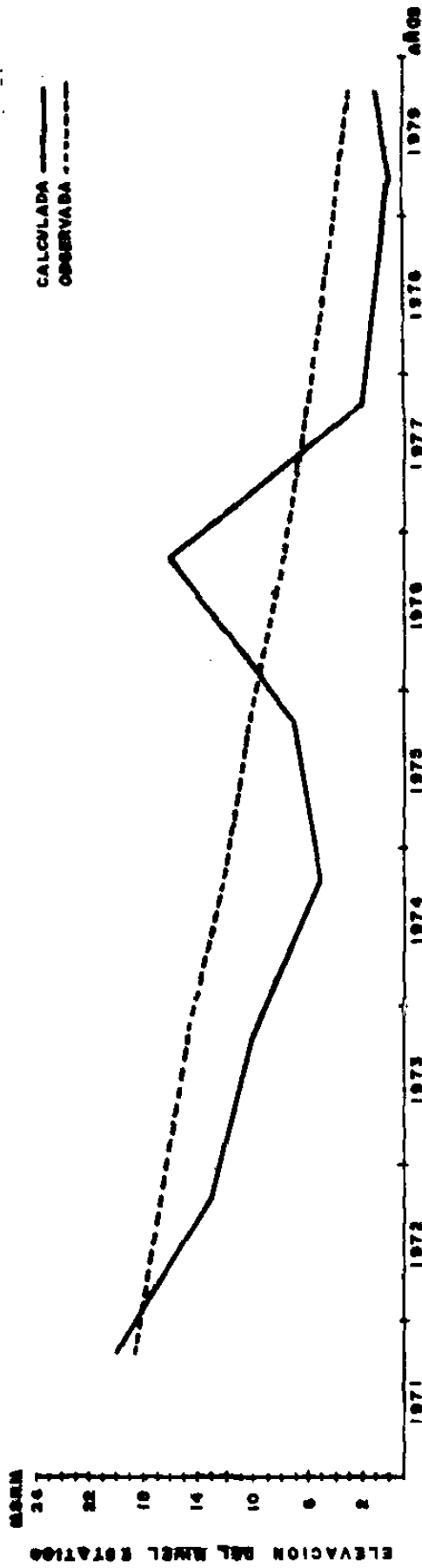
CELDA N.º 105-B



1020091239

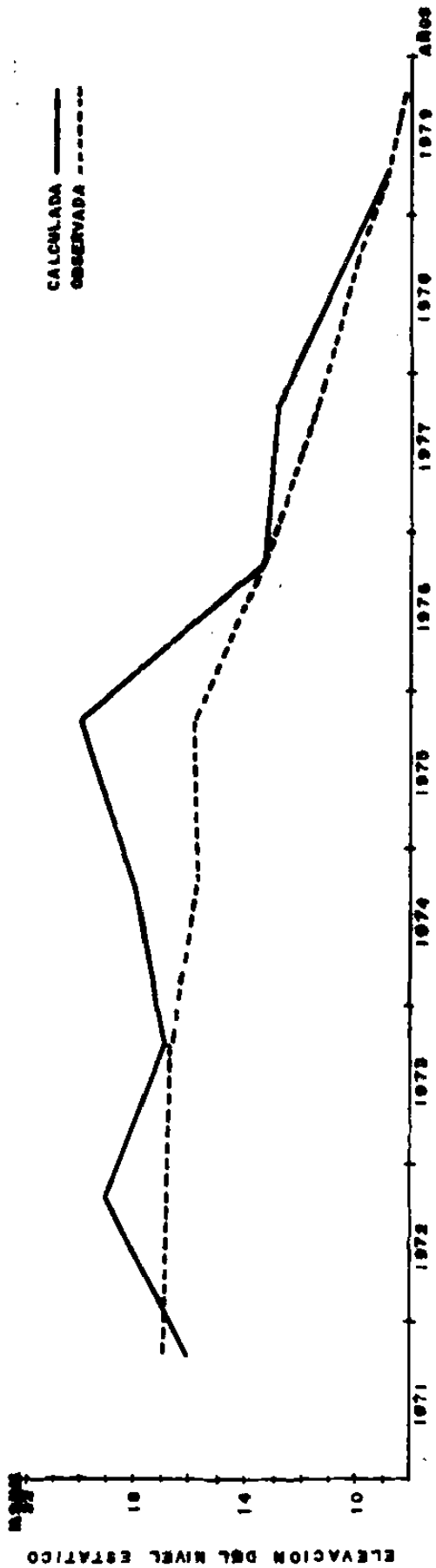
EVOLUCION DEL NIVEL ESTATICO

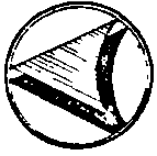
CELDA N.º 123



EVOLUCION DEL NIVEL ESTATICO

CELDA N.º 3-II

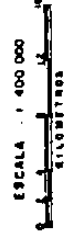




SIMBOLOGIA

- POBLACION _____
- CANETERA _____
- FERRICARRIL _____
- CANAL _____
- RIO _____
- ARROYO _____
- CURVA DE IGUAL ELEVACION _____
- DEL NIVEL ESTÁTICO EN M.N.M. _____

Condición de Extracciones Constantes desde el Cícto 1975-1976 (360:10m)



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES
 VALLE DEL TAQUI, SONORA
 ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO
 1983 (CALCULADA)

TESIS DE MAESTRIA: Aplicación del método de
 diferentes límites de análisis de un acuífero confinado
 EFRAIN SALINAS SALINAS

LAMINA No. 18



El principal problema que presenta la calibración de un modelo es la confiabilidad y cantidad de información con que se cuenta, ésto va a determinar la confiabilidad del modelo.

6.3 Potencial del modelo

Una vez calibrado el modelo se pueden hacer predicciones de la evolución piezométrica para diferentes políticas de explotación de agua subterránea.

En el presente estudio sólo se hizo la predicción de la elevación del nivel estático de 1985, (lámina 19), con la suposición de que la distribución y magnitud de las extracciones de agua subterránea permanece constante desde el ciclo de 1975-1976. Esto se hizo porque no se contó con la información de las extracciones de 1976 a la fecha. De esta configuración se aprecia la formación de dos zonas con elevaciones por abajo del nivel del mar y en general en toda el área un descenso de la piezometría del acuífero.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

1. Las principales fuentes de recarga del acuífero del valle del Yaqui son: Los canales principales, el arroyo Cocoraque y el río Yaqui en menor grado. La magnitud de la recarga media anual del acuífero es de 275 millones de m³.
2. El incremento en la explotación del agua subterránea ha ocasionado un descenso continuo en la piezometría del acuífero y en algunas zonas, el nivel estático se encuentra por abajo del nivel del mar.
3. El cono de abatimiento que se presenta en el canal principal Alto se debe a los grandes volúmenes de agua subterránea que extraen y a las bajas transmisibilidades de esa zona, teniéndose que desde Octubre de 1977 presenta niveles estáticos por abajo del nivel del mar.
4. De continuar la sobreexplotación de este acuífero, el fenómeno de la intrusión salina se presentará en él.

7.2 Recomendaciones

1. Continuar con la toma periódica de niveles piezométricos y de los volúmenes de extracción, insistir en la instalación de medidores en todos los equipos de bombeo y reparar los que actualmente no funcionan.
2. Disminuir las extracciones de agua subterránea en el área donde se forma el cono de abatimiento.
3. Usar las técnicas de trazadores para verificar si efectivamente la principal recarga del acuífero es por infiltración del agua de los canales principales y arroyo Cocoraque. Calcular la magnitud de estas pérdidas y las zonas donde se presentan.
4. No incrementar las extracciones de agua subterránea.

5. Realizar el uso conjunto de los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos contemplándolos como fuentes alternativas uno del otro y distribuir espacialmente las extracciones evitando la concentración de pozos, cuyas extracciones son las que producen los conos de abatimiento locales.

6. Para lograr una mejor simulación del comportamiento de los niveles piezométricos del acuífero de valle del Yaqui, es necesario hacer la calibración del modelo cada año, encontrando así, una magnitud de recarga del acuífero para cada ciclo anual estudiado.

BIBLIOGRAFIA

- Bear, J. "Dynamics of fluids in porous media". American Elsevier Environmental Science Series, New York, 1972.
- Cruickshank, C. y Chávez, R. "Modelo Matemático 'DAS' para el estudio del comportamiento de acuíferos". Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XXII, 1969, No. 1.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. "Hidrología Subterránea". Ed Omega, S. A. Barcelona 1976.
- Davis, S.N. y De Wiest, R. "Hidrogeología", Ariel, Barcelona 1971.
- Mc Whorter, D. y Sunada, D. K. "Ground-Water Hydrology and Hydraulics" Water Resources Publications. Fort Collins. 1977.
- Peaceman, D. W. y H. H. Rachford, Jr. "The numerical solutions of parabolic and elliptic differential equations, Journal Society of Industrial and Applied Mathematics" V. 3: 28-41, 1955.
- Pinder, G. F. "An Iterative Digital Model for Aquifer Evaluation" U.S. Geological Survey, 1971.
- Pinder, G. F. y Bredehoeft, J. D. "Applications of the Digital Computer for Aquifer Evaluation". Water Res. Vol. 4, Num. 5, 1069-1094, 1968.
- Prickett, T. A. y Lonquist, C. G. "Selected Digital Computer Techniques for Ground Water Resources Evaluation" Illinois State Water Survey, Bull 55, Urbana, 1971.
- Remson, I., Hornberg, G. M. y Molz, F. S. "Numerical Methods in Subsurface Hydrology". Wiley-Interscience. New York, 1971.
- Richardson, L. F. "The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations with an application to the stresses in a masonry dam" Phil. Trans. Royal Soc., A210, 307-357, 1910.
- Todd, D. K. "Ground Water Hydrology". John Wiley & Sons. New York, 1959.
- Trescott, P. C. y Larson, S. P. "Comparison of Iterative Methods of Solving two dimensional ground water flow equations". Water Resources Research. (USA) Vol. 13, No. 1, p.125-136, 1977

"Estudio Geohidrológico del valle del Yaqui, Sonora" (Icatec, Mayo de 1970).

"Explotación Adicional, Exploración y Estudio de los Acuíferos del Sur y del Norte y Centro de Sinaloa" (CPNH, Proyecto IA 167, Febrero de 1978).

"Geofísica de los Valles del Yaqui y del Mayo, Sonora" (Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S. A., 1978).

Síntesis de los datos hidrogeológicos del acuífero del Yaqui, Sonora para la realización de un modelo matemático (Service Geologique Regional ALSACE), Diciembre de 1978.

A N E X O

Listado del programa básico de simulación de acuíferos,
datos utilizados por celda y resultados de 1970 a 1979. .

```

PROGRAM IAD1 INPUT,OUTPUT,STOPS=INPUT*TIME&OUTPUT
ILLINOIS STATE WATER SURVEY
PROGRAM IAD1) PARA SIMULACION DE AGUAS SUBTERRANEAS
DEFINICION DE VARIABLES

```

```

10 I=1,N1-----ELEVACION TIBIAL
11 J=1,N2-----ELEVACION FIJAL

```

```

12 F1(I,J)=FACOR DE ALZAMIENTO (H000/24) *5 *AX**2
13 F2(I,J)=FACOR DE EXTRACCION POR TUBO (H000/24)
14 T(I,J)=TRANSMISIVIDAD ENTRE 1.0 Y 1.0+1 (H000/24)
15 T(I,J)=TRANSMISIVIDAD ENTRE 1.0 Y 1.0+1 (H000/24)

```

```

16 AA=0.006, D=CONCENTRACION EN LAS ECUACIONES DEL BALANCE DE AGUA
17 RR-----D. DE RECARGAS EN EL KOPFL
18 NGTES-----D. DE GOLPES EN EL KOPFL
19 DELTA-----PERIODO DE TIEMPO
20 H(I,J)=VALORES DE CORRECCION
21 I-----TIEMPO DE GOLPE
22 J-----TIEMPO DE GOLPE

```

```

23 DIFERENCIA S1(I,2)=H(20,2)-T(20,2)+H(20,2)+R(20)+G(20)+
24 IOL(20,2)+T(20,2)+P(20,2)+Q(20,2)+U(20,2)

```

```

25 ELEVACION DE POSIBLES UNDEFLEWS

```

```

26 CALL FDSSET(20,25,1,1)

```

```

27 LECTURA DE LAS TUBIAS DE PARALELOS Y
28 VALORES CORRECCION

```

```

29 READ(5,10) STOPS,DELTA,ERROR,UNDS,IX
30 FORMAT(10,5F5.2,15,F1.2)

```

```

31 READ(5,11) NO,TRIT,SI,FI,DO,PO
32 FORMAT(10,5F5.2)

```

```

33 LLENDO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES CORRECCION

```

```

34 DO 20 I=1, N1
35 DO 20 J=1, N2

```

```

36 TR(I,J)=T
37 SF1(I,J)=S1

```

```

38 H(I,J)=H
39 T(I,J)=TR

```

```

40 R(I,J)=RR
41 S(I,J)=SI

```

```

42 LEE DATOS DE LOS TUBOS

```

```

43 DO 21 I=1, N1
44 READ(5,40) H(I,1),TR(I,1),H(I,2)

```

```

45 FORMAT(214,14,5F5.2,5F5.2)
46 CONTINUE

```

```

47 READ(5,41) NO
48 READ(5,42) H(I,SI),R=1,PO

```

```

49 FORMAT (10,5F5.2)

```

```

60 WRITE(6,2)10
   FORMAT(100,20X,'TRAY DISTIBLINDO (100/56)100 -200')
   DO 921 J=1,10

```

```

921 WRITE(6,3)10,(TR(I,0)+I=1,10)
   WRITE(6,4)10

```

```

943 FORMAT(100,20X,'COEFICIENTE DE ALGEBRAICIDAD')
   DO 944 J=1,10

```

```

944 WRITE(6,5)10,(SF1(I,0)+I=1,10)
945 FORMAT(15,5X+1F6,2/10X18F6,2)
   WRITE(6,6)10

```

```

922 FORMAT(15,5X+1F6,1/10X18F6,1)
923 FORMAT(100,20X,'ELEVACION DE LOCAL 19700')
   DO 924 J=1,10

```

```

924 WRITE(6,3)10,(H(I,0)+I=1,10)
   DO 931 I=1,10
   DO 931 J=1,10

```

```

931 TR(I,0)=T(I,0)+0.0000
   ROT=0.0
   DO 76 I=1,30
   DO 76 J=1,30

```

```

75 ROT=ROT+T(I,0)
   IF(OT(I,0)+T(I,0)) GOTO 77
   IF(OT(I,0)+T(I,0)) GOTO 77

```

```

90 SF1(I,0)=SF1(I,0)*(6.6667)
   IF((TR(I,0)+I=1,10)+.5) GOTO 77
   IF((TR(I,0)+I=1,10)+.5) GOTO 77

```

```

75 T(I,0,1)=1.0*OT(I,0)+T(I,0)+1)/OT(I,0)+T(I,0)+1)
   IF((TR(I,0)+I=1,10)+.5) GOTO 76
   T(I,0,2)=1.0*OT(I,0)+T(I,0)+1)/OT(I,0)+T(I,0)+1)
   GOTO 78

```

```

77 Y(I,0,1)=R(I,0)
   GO TO 79
78 T(I,0,2)=T(I,0)
79 CONTINUE

```

```

90 ROT=ROT+0.005*1
   WRITE(6,7)10
925 FORMAT(100,10X,'CONDICION DELA CELDA EN 1970/1700')

```

```

940 WRITE(6,9)10,(O(I,0)+I=1,10)
941 FORMAT(15,5X+10F7,2/10X18F7,2)
   WRITE(6,10)10
942 FORMAT(100,20X,'COEFICIENTE ALGEBRAIC ='+SF1(1,0)+130)

```

```

100 CONTINUE DE LA SIMULACION
   C
   C
   C

```

```

105 TIME=0.0
   DO 320 ISTEP=1,10000
   TIME=TIME+DELTA

```

```

110 PRODUCCION DE HELIOS PARA EL SIGUIENTE
   INTERVALO DE TIEMPO
   C
   C
   C

```

```

   DO 70 I=1,10
   DO 76 J=1,10
   O=O(I,0)+O(I,0)
   H(I,0)=H(I,0)
   T=1.0
   T=OT(I,0)+T(I,0)

```

```

115 IF(I*J*J*G*J)F=0/DL(I,J)
    IF(I*G*J)F=5*J
    IF(I*LT*G*J)F=J*J
    GO BL(I,J)=1
    IL(I,J)=I*(I+J)+J*J
70 CONTINUE
    DO 113 J=1,N
    113 DO(I,J)=J*J
    READ(5,914) (I,J)
    914 FORMAT(I)
    READ(5,915) (I,J) (I,J), <=1, 200, 0)
    915 FORMAT(9(12,F,0))
    DO 916 I=1,IC
    916 DO 916 J=1,JC
    916 O(I,J)=O(I,J)+O(I,J)
C
C REFLECTIONS OF LAST COEFFICIENTS ON
C ELEMENTS IAOI
C
C IT=0
    DO 920 I=1,IC
    920 F=O,J
    IT=IT*IT*J+1
C
C CALCULOS POR SOLUCIONES
C
    DO 190 I=1,IC
    190 I=I
    IF(I*J*J*G*J)F=0/DL(I,J)
    DO 170 J=1,JC
C
C CALCULO DE LOS VECTORES X Y Z
C
    AB=SF1(I,J)/ZOLT
    DB=O(I,J)*SF1(I,J)/DELTA+O(I,J)
    AA=O*G
    CC=O*G
    IF(I-1)G=10*J*J
    90 AA=-7(I+J-1)
    BB=5*J*(I+J-1)
    100 IF(I-1)J=10*J*J
    110 CC=-7(I+J)
    2B=J*J*(I+J)
    120 IF(I-1)J=15*J*J
    130 2C=J*J*(I-1)
    140 IF(I-1)J=10*J*J
    150 2D=2*J*(I-1)
    160 2E=3*J*(I+1)
    170 3(D)=20/J
    3(D)=(20-AA*(I-1))/J
C
C RESTRACCION DE NIVEL
C
    Z=E+AS*H(I,J)-C(D)
    1(D)=20*(D)

```

```

175      H=H-1
180      YA=3*(D)-3*(D)*I(I,1+J)
185      E=E+ABS(FL)-H(I,J)
190      CONTINUE

```

```

C
C
C

```

```

180      CALCULATE FOR FILES

```

```

C

```

```

185      DO 300 JJ=1,NR
190      J=JJ
195      IF (JUR(I,STEPS+ITER,2).EQ.0) J=IR+J+1
200      DO 240 I=1,NC
205      T=ST(I,1,0)/DELTA
210      DO 260 K=1,1+I*ST(I,J)
215      B=20+T(I,0,1)
220      IF (I-1) 240,250,260
225      B=20+T(I-1,1,2)
230      AA=-T(I-1,1,2)
235      IF (I-1) 240,250,260
240      B=20+T(I-1,1,2)
245      AA=-T(I-1,1,2)
250      IF (I-1) 240,250,260
255      B=20+T(I,1,2)
260      CC=-T(I,1,2)
265      H=20-AA*H(I-1)
270      3(I)=20/2
275      3(I)=20/2
280      3(I)=(20-1)*3(I-1)/2

```

```

C

```

```

195      RESTRICTION OF ANGLES
198      E=C+ABS(FL)*D-6*(D)
200      H(I,0)=3*(H)

```

```

C

```

```

205      YA=3*(D)-3*(D)*I(I,1+J)
210      E=E+ABS(FL)-H(I,J)
215      CONTINUE

```

```

C

```

```

215      CALCULATE FOR FILES

```

```

C

```

```

220      DO 300 JJ=1,NR
225      J=JJ
230      IF (JUR(I,STEPS+ITER,2).EQ.0) J=IR+J+1
235      DO 240 I=1,NC
240      T=ST(I,1,0)/DELTA
245      DO 260 K=1,1+I*ST(I,J)
250      B=20+T(I,0,1)
255      IF (I-1) 240,250,260
260      B=20+T(I-1,1,2)
265      AA=-T(I-1,1,2)
270      IF (I-1) 240,250,260
275      B=20+T(I-1,1,2)
280      AA=-T(I-1,1,2)
285      IF (I-1) 240,250,260
290      B=20+T(I,1,2)
295      CC=-T(I,1,2)
300      H=20-AA*H(I-1)
305      3(I)=20/2
310      3(I)=20/2
315      3(I)=(20-1)*3(I-1)/2

```

```

C

```

```

220      RESTRICTION OF ANGLES
225      E=C+ABS(FL)*D-6*(D)
230      H(I,0)=3*(H)

```

```

C

```

```

230      CALCULATE FOR FILES

```

```

C

```

```

235      DO 300 JJ=1,NR
240      J=JJ
245      IF (JUR(I,STEPS+ITER,2).EQ.0) J=IR+J+1
250      DO 260 I=1,NC
260      T=ST(I,1,0)/DELTA
265      DO 280 K=1,1+I*ST(I,J)
270      B=20+T(I,0,1)
275      IF (I-1) 260,270,280
280      B=20+T(I-1,1,2)
285      AA=-T(I-1,1,2)
290      IF (I-1) 260,270,280
295      B=20+T(I-1,1,2)
300      AA=-T(I-1,1,2)
305      IF (I-1) 260,270,280
310      B=20+T(I,1,2)
315      CC=-T(I,1,2)
320      H=20-AA*H(I-1)
325      3(I)=20/2
330      3(I)=20/2
335      3(I)=(20-1)*3(I-1)/2

```

```

230      310 FORMAT(5H1I,2H2F1,3//6E20.7,2P15)
        WRITE(6,926) (LATIO)
926 FORMAT(1H0,13H"RELUCATION OF LEVEL POSITION OF 926")
        DO 320 I=1,78
320 WRITE(6,330) I,(C(I),D),I=1,90)
330 FORMAT(5H5E,20F5.1/10L6.2,2P5.1)
93 FORMAT(1H0,20H"MODEL EVALUATION OF ACCTING OF WALL OF YAOI
1,30H00000)
STOP
EID
    
```

SYMBOLIC REFERENCE MAP (R=1)

ENTRY POINTS

4116 IAOI

VARIABLES	SN	TYPE	RELUCATION
5414 AA		REAL	11344 1
5412 AB		REAL	13074 20
5415 CC		REAL	5404 0
5413 DD		REAL	5361 DELTA
11414 DL		REAL	5304 0X
5410 E		REAL	5322 8R000
5408 F		REAL	11370 5
1052+ H		REAL	5420 16
5371 I1		REAL	14314 10
517+ I		INTEGER	5411 11
5403 ISTEPS		INTEGER	5407 17EP
5175 J		INTEGER	5421 10
5176 K		INTEGER	5423 KA 20
5422 LATIO		INTEGER	5417 11
5345 MC		INTEGER	5306 10
5409 NS		INTEGER	5380 15TEPS
5377 N000		INTEGER	5405 2H0000
5363 N0005		INTEGER	6244 1
5372 OJ		REAL	13054 7
5373 RR		REAL	5401 170T
5424 SF1		REAL	5370 01
1064 T		REAL	5402 11F
1234 TR		REAL	5307 11
5416 V		REAL	

FILE NAMES MODE 2034 OUTPUT 0 14075 007 0054 14076 FMT

EXTERNALS TYPE AROS 4

TABLE FUNCTIONS TYPE AROS 1 11771 000 107000 2 11772

ELEVATION NFL (MVEL (STATIC)) IN 1972

1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	31.0	33.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	10.0	11.7	14.7	17.2	19.4	21.0	24.7	27.4	29.1	29.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	10.0	11.3	14.3	15.7	19.9	21.7	21.1	26.0	27.3	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.0	11.7	14.2	16.4	19.7	20.0	22.3	24.0	25.3	25.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	10.0	11.0	14.2	14.9	15.7	13.1	20.9	22.7	23.1	22.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	9.0	12.2	13.4	15.6	15.8	11.6	19.3	21.4	20.3	20.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	8.0	10.0	11.0	13.8	15.9	17.0	17.9	19.3	18.7	17.7	23.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	5.0	7.6	9.0	11.1	13.0	14.3	15.1	17.6	15.9	14.9	21.3	16.7	15.6	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	4.0	5.5	6.8	8.7	10.7	12.3	14.4	15.7	14.0	22.1	21.3	20.0	17.7	15.6	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0
10	3.0	4.1	5.3	5.5	7.5	11.4	11.0	16.1	17.3	23.3	30.2	29.0	24.7	18.3	15.3	13.0	0.0	0.0	0.0
11	2.0	3.0	3.9	4.4	5.1	3.0	19.3	13.7	16.8	16.3	20.6	12.7	24.1	20.3	17.9	14.0	0.0	0.0	0.0
12	1.0	1.9	2.4	2.7	3.3	5.0	9.1	12.0	15.0	20.9	27.3	31.3	0.0	23.4	19.2	15.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.9	1.1	1.2	1.4	3.0	4.9	9.1	10.5	13.0	21.0	22.2	22.5	20.2	15.4	14.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

EXTRACTION POP CELLS FOR 11/01/1972 A 1973

1	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2	11421.	6147.	0.	0.	0.	0.	0.	94.	7015.	5163.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3	3125.	7477.	1777.	7399.	0.	0.	0.	1693.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4	0.	2529.	0.	925.	0.	2114.	2502.	0.	2823.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
5	0.	0.	0.	12781.	270.	5332.	69134.	6656.	3251.	5477.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
6	0.	2347.	2103.	2137.	12749.	5461.	24251.	2121.	4972.	13390.	1771.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
7	0.	0.	11413.	1034.	0.	2594.	15403.	6997.	0.	3253.	4117.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
8	0.	0.	0.	1890.	591.	4917.	13061.	13552.	6455.	157.	10474.	4423.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9	0.	0.	4443.	6016.	20544.	5435.	306.	11236.	4265.	2442.	914.	13909.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
10	0.	0.	0.	0.	11005.	405.	19097.	4935.	1192.	14104.	11327.	9310.	1899.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
11	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	7102.	0.	1593.	2227.	14560.	9227.	6450.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
12	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	7589.	10744.	2434.	0.	1737.	973.	0.	0.	0.
13	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	5159.	2591.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
14	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3954.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
15	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	34.	4971.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
16	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1134.	112.	7166.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
17	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

6	7.0	12.3	17.7	15.7	14.5	17.0	19.3	20.3	19.0	17.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
7	4.0	10.3	12.4	13.0	15.7	10.4	17.1	13.0	14.0	17.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	5.0	7.0	10.3	11.4	13.1	14.0	15.4	17.0	16.7	19.0	19.5	12.0	15.7	15.3	0.0	0.0
9	4.0	5.0	7.5	4.7	10.5	12.0	13.1	15.0	14.0	20.0	20.0	10.0	11.7	16.3	14.0	0.0
10	3.0	4.2	5.5	5.7	7.9	11.0	11.3	11.0	15.7	27.0	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	13.0
11	2.0	3.0	3.0	4.7	5.0	2.0	16.3	11.0	15.7	20.0	31.0	20.0	20.0	20.0	10.0	14.0
12	1.0	1.0	2.0	2.0	1.6	5.0	1.3	11.7	14.0	21.0	27.0	37.1	0.0	25.7	22.1	15.0
13	0.0	0.0	0.0	1.1	1.3	1.6	2.7	4.4	0.0	13.3	23.3	29.0	23.7	22.1	15.0	14.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.7	10.0	12.1	17.0	12.4	11.0	11.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	4.5	11.6	13.4	13.0	12.0	10.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	10.5	12.4	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	7.0	10.0	0.0	0.0	0.0

EXTRACCION POR CELDA EN 11/2014, CICLO 1974 A 1975

1	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	12360.	402.	0.	0.	0.	0.	0.
2	8850.	6510.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1410.	5703.	3510.	0.	0.	0.	0.	0.
3	3950.	7307.	1330.	9007.	0.	0.	0.	0.	3721.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4	0.	4565.	0.	5030.	0.	333.	2001.	0.	5001.	0.	5001.	0.	0.	0.	0.	0.
5	0.	0.	0.	14730.	3003.	3021.	1051.	5520.	422.	0.041.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
6	0.	6062.	23470.	27035.	23764.	0.	22097.	7054.	5760.	31454.	110.	0.	0.	0.	0.	0.
7	0.	0.	13391.	5030.	0.	4005.	13710.	5773.	0.	2635.	1454.	0.	0.	0.	0.	0.
8	0.	0.	0.	1011.	2050.	10403.	13017.	10264.	7389.	200.	16721.	7024.	0.	0.	0.	0.
9	0.	0.	2077.	5717.	26053.	11924.	3030.	10062.	5375.	8131.	14200.	1700.	0.	0.	0.	0.
10	0.	0.	0.	0.	10710.	3020.	23050.	12060.	1397.	10222.	20050.	1111.	1.0	0.	0.	0.
11	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	7005.	0.	529.	4529.	20384.	10322.	0.0	0.	0.
12	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	12000.	0750.	0.0	0.	0.	0.
13	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3013.	5266.	0.	0.	0.	0.	0.
14	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	405.	2061.	0.	0.	1070.	10120.	0.
15	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	67.	5507.	0.	0.	0.	0.	0.
16	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1093.	5471.	0.0	0.	0.	0.
17	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

TIT= 1325.00

1620682E+00 6 5

ELEVACION DEL NIVEL (ESTADIC) DE 1975

1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	31.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	10.0	11.0	14.0	17.0	17.0	21.0	23.0	26.0	27.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	10.0	11.5	14.3	16.0	19.7	20.0	24.7	24.7	25.0	25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.0	11.4	14.2	16.0	19.0	19.0	21.0	21.0	21.4	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	10.0	11.0	14.3	14.7	14.0	18.5	20.7	20.4	14.0	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	9.0	11.7	13.1	14.0	15.0	18.1	19.7	14.4	15.2	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	10.0	12.0	13.0	15.0	17.0	19.0	19.0	19.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

