

**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA Y GANADERIA**

**“LA SOBREEXPLOTACION Y LA INTRUSION SALINA EN EL  
ACUIFERO DE GUAYMAS, SONORA, MEXICO”**

**T E S I S**

**JUAN PABLO CORDOVA DURAZO**

**JULIO DE 2001**

# Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos  
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA Y GANADERIA**

**LA SOBREEXPLOTACION Y LA INTRUSION SALINA EN EL  
ACUIFERO DE GUAYMAS, SONORA, MEXICO**

**TESIS**

**JUAN PABLO CORDOVA DURAZO**

**JULIO DE 2001**

**LA SOBREEXPLOTACION Y LA INTRUSION SALINA EN EL  
ACUIFERO DE GUAYMAS, SONORA, MEXICO**

**SOMETIDA A LA CONSIDERACION DEL  
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA Y GANADERIA**

**DE LA**

**UNIVERSIDAD DE SONORA**

**POR**

**JUAN PABLO CORDOVA DURAZO**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO AGRONOMO EN:  
FITOTECNIA**

**JULIO DE 2001**



Esta tesis fue realizada bajo la dirección del Consejo Particular aprobada y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

**INGENIERO AGRONOMO EN:  
FITOTECNIA**

**CONSEJO PARTICULAR:**

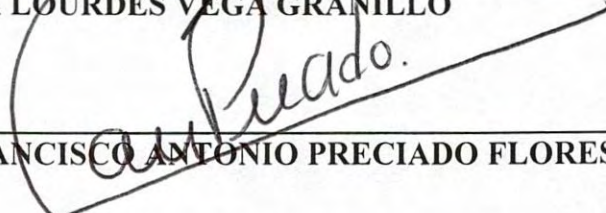
**PRESIDENTE:**

  
\_\_\_\_\_  
**D.E.A. JOSE CASTILLO GURROLA**

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. EVA LOURDES VEGA GRANILLO**

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
**ING. FRANCISCO ANTONIO PRECIADO FLORES**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por haberme dado vida, salud y permitirme ver realizado un sueño, terminar mi carrera profesional.

Al Departamento de Agricultura y Ganadería, por ofrecerme los medios necesarios para realizarme profesionalmente.

A mis maestros, por sus valiosas enseñanzas y apoyo brindado en su momento.

A los maestros D.E.A José Castillo Gurrola y M.I. Eva Lourdes Vega Granillo, por su dirección, revisión y apoyo incondicional en la realización de este trabajo de tesis. De la misma manera al Ing. Francisco Antonio Preciado Flores, por la revisión del documento.

A mis compañeros y amigos, por su amistad desinteresada, especialmente a Héctor Lugo, José M. Villa y Benedicto Araiza.

Al CONACYT, por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo de tesis.

## **DEDICATORIA**

**A MIS PADRES:** por los sacrificios de toda la vida por ver a sus hijos realizados, por su cariño, apoyo y comprensión, que siempre han mostrado en los momentos importantes de mi vida.

**A MIS HERMANOS:** por su cariño y apoyo que me han otorgado muchas gracias.

**A MIS MAESTROS Y AMIGOS:** por sus buenos consejos y amistad mostrada sin importar la situación y momento.



## CONTENIDO

|  | Pag. |
|--|------|
| INDICE DE CUADROS.....                               | vii  |
| INDICE DE FIGURAS.....                               | viii |
| RESUMEN.....   | ix   |
| INTRODUCCIÓN.....                                    | 1    |
| OBJETIVOS .....                                      | 3    |
| JUSTIFICACIÓN.....                                   | 4    |
| LITERATURA REVISADA.....                             | 5    |
| 1. Terminología utilizada.....                       | 5    |
| 2. Importancia del agua en el Mundo y en México..... | 9    |
| 3. El agua superficial en Sonora.....                | 12   |
| 4. El agua subterránea en Sonora.....                | 13   |
| 5. La Cuenca del Río Mátape.....                     | 15   |
| a.- Clima.....                                       | 16   |
| b.- Temperatura.....                                 | 18   |
| c.- Precipitación.....                               | 19   |
| d.- Hidrología superficial.....                      | 19   |
| 6. El Valle de Guaymas.....                          | 20   |
| a.- Límites geográficos.....                         | 20   |
| b.- Geología de superficie.....                      | 21   |
| c.- Geología del subsuelo.....                       | 22   |
| d.- Localización de pozos.....                       | 23   |
| e.- Evolución piezométrica del acuífero.....         | 25   |
| f.- Sobreexplotación del acuífero.....               | 28   |
| g.- Calidad del agua .....                           | 31   |
| h.- El fenómeno de la intrusión salina.....          | 35   |
| MATERIAL Y METODOS.....                              | 38   |
| 1. Ubicación de la zona de estudio.....              | 38   |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESULTADOS.....</b>                                 | <b>41</b> |
| <b>1. Evolución de la calidad del agua.....</b>        | <b>41</b> |
| a.- Calidad del agua para el año 1975.....             | 42        |
| b.- Calidad del agua para el año 1990.....             | 43        |
| c.- Calidad del agua para el año 1995.....             | 44        |
| d.- Calidad del agua para el año 1997.....             | 45        |
| e.- Calidad del agua para el año 1998.....             | 45        |
| <b>2. Sobreexplotación en el Valle de Guaymas.....</b> | <b>46</b> |
| a.- Piezometría en el año 1950.....                    | 46        |
| b.- Piezometría en el año 1970.....                    | 47        |
| c.- Piezometría en el año 1975.....                    | 48        |
| d.- Piezometría en el año 1990.....                    | 48        |
| e.- Piezometría en el año 1995.....                    | 49        |
| f.- Piezometría en el año 1998.....                    | 49        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>                              | <b>50</b> |
| <b>1. Recomendaciones.....</b>                         | <b>51</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                               | <b>52</b> |
| <b>APENDICE.....</b>                                   | <b>55</b> |

## INDICE DE CUADROS

|  | Pag. |
|--|------|
| Cuadro 1. Recarga y descarga de los acuíferos en Sonora.....     | 15   |
| Cuadro 2. Tipos de climas secos de la Cuenca del Río Mátape..... | 18   |
| Cuadro 3. Temperaturas de la Cuenca del Río Mátape.....          | 19   |
| Cuadro 4. Precipitación de la Cuenca del Río Mátape.....         | 19   |
| Cuadro 5. límites máximos permitidos para cloruros y STD.....    | 41   |
| Cuadro 6. Clases de agua de acuerdo a STD.....                   | 41   |

## INDICE DE FIGURAS

|   | Pag. |
|---|------|
| Figura 1. Localización de la Cuenca del Río Mátape.....         | 17   |
| Figura 2. Localización de pozos del Valle de Guaymas.....       | 24   |
| Figura 3. Volúmenes extraídos en el Valle de Guaymas.....       | 29   |
| Figura 4. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1975.....      | 56   |
| Figura 5. Isovalores de STD (ppm) en el año 1975.....           | 57   |
| Figura 6. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1990.....      | 58   |
| Figura 7. Isovalores de STD (ppm) en el año 1990.....           | 59   |
| Figura 8. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1995.....      | 60   |
| Figura 9. Isovalores de STD (ppm) en el año 1995.....           | 61   |
| Figura 10. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1997.....     | 62   |
| Figura 11. Isovalores de STD (ppm) en el año 1997.....          | 63   |
| Figura 12. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1998.....     | 64   |
| Figura 13. Isovalores de STD (ppm) en el año 1998.....          | 65   |
| Figura 14. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1950..... | 66   |
| Figura 15. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1970..... | 67   |
| Figura 16. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1975..... | 68   |
| Figura 17. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1990..... | 69   |
| Figura 18. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1995..... | 70   |
| Figura 19. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1998..... | 71   |



## RESUMEN

El agua es un recurso importante en todas las regiones del mundo, sin embargo, este patrimonio tiene una importancia extraordinaria en regiones áridas y semiáridas debido a su escasez e irregular distribución.

Dentro del ciclo hidrológico poco menos del 3% del agua dulce fluida disponible, se encuentra en forma superficial, concretamente en ríos y lagos. Se han construido obra muy notables como embalses artificiales, canales de riego, diques, etc.

En México, el agua subterránea constituye uno de los recursos hidráulicos más importantes, principalmente para sus regiones áridas y semiáridas cubren mas del 60% del área del país. En dichas zonas su aprovechamiento a sido en forma intensiva, siendo la base, en muchos casos, del auge económico alcanzando en ellos.

La explotación intensiva del agua subterránea en México y sin ser la excepción Sonora, se inició a partir de 1950.

El presente trabajo, muestra los cambios que han ocurrido en el acuífero Valle de Guaymas, debido a la explotación intensiva e irracional desde su apertura a principios de los 50's.

Entre los efectos que ha traído consigo esta sobreexplotación se pueden mencionar el descenso en los niveles piezométricos, la contaminación al acuífero por la entrada de agua marina al continente y el encarecimiento en los costos de bombeo al tener que extraer el líquido a profundidades cada vez mayores.

En este estudio se decidió utilizar el ion cloruro y a los sólidos totales disueltos como indicadores de la presencia de agua de mar en el continente.



En los años de 1997 y 1998. Se participo en un proyecto de investigación financiado por el CONACYT y junto con la Comisión Nacional del Agua, se hicieron muestreos de agua subterránea para su posterior análisis, también, participó durante el paro general bombeo para determinar los niveles estáticos en el Valle con el uso de sondas eléctricas.

En el presente estudio se detectaron concentraciones del ion cloruro mayores a 5,000 ppm y de STD valores superiores a 10,500 ppm.

## INTRODUCCION

El agua subterránea en México se explota actualmente por aproximadamente unos 150,000 pozos, de los cuales 70,000 se utilizan para riego y de estos se extrae un volumen anual estimado en 27,156 Mm<sup>3</sup>, lo que corresponde a un caudal de 861 m<sup>3</sup>/s. El 70% de este volumen se dedica a la agricultura, el 20% a usos urbanos e industrial y el resto se destina a otros usos.

México está constituido por 37 regiones hidrológicas distribuidas en 3 vertientes. En Sonora se encuentran las Regiones Hidrológicas 8 y 9 principalmente, porque de las Regiones Hidrológicas 7, 10 y 34 sólo una pequeña extensión se encuentra en el Estado. Las regiones hidrológicas se dividen en cuencas, contando Sonora con 41 cuencas hidrológicas; una de ellas, la Cuenca del Río Mátape incluye en su parte baja al Valle de Guaymas, objeto del presente estudio.

Sonora, situado al Noroeste de México tiene una escasa precipitación y altas temperaturas, lo que origina que gran parte de su territorio explote el agua subterránea como único recurso para sus actividades. Tiene una superficie de 182,052 km<sup>2</sup> (INEGI, 1993) y si se considera una precipitación media anual de 450 mm, da un volumen de agua de 83 km<sup>3</sup>/año.

La precipitación media anual en el Estado, pasa de los valores mínimos de 50 mm, en la zona del Desierto de Altar, a valores medios de 600 mm en los límites con el Estado de Sinaloa, hasta llegar a valores máximos de 1000 mm en la región de Yécora.

La disponibilidad del conjunto de presas tiene una capacidad de almacenamiento de 9,200 Mm<sup>3</sup>, lo que da un 11 % del volumen precipitado.

En Sonora se tienen identificados unos 17,000 pozos de los cuales alrededor de 6,300 son destinados a la agricultura; 4,800 son para uso pecuario; alrededor de 310

pozos son usados para uso industrial y el resto se destinan para consumo humano y servicios.

Sólo en los Distritos del Yaqui y Mayo se cuenta con grandes volúmenes de agua superficial, aunque en ocasiones también se utiliza el agua subterránea.

A partir de 1950 se abrieron los distritos de riego por bombeo de la Costa de Hermosillo, Guaymas, Caborca y San Luis Río Colorado.

Debido a la fuerte extracción realizada en los últimos 40 años, estos acuíferos han sufrido un abatimiento drástico en los niveles del agua subterránea, resultando que en los Valles de Guaymas, Costa de Hermosillo y Caborca se haya invertido el flujo del mar hacia el continente (gradiente hidráulico invertido), afectando grandes áreas de cultivo.

Con respecto a la contaminación de acuíferos de Sonora, el problema más serio es el de la intrusión salina, principalmente en el acuífero del Valle de Guaymas, en donde el avance es de aproximadamente 15 km de la línea de costa hacia continente adentro.

En el Valle de Guaymas, el abatimiento y la intrusión salina ocurrieron porque sin conocerse la potencialidad del acuífero se inició una explotación intensiva. En 1957 el nivel piezométrico ya había descendido por debajo del nivel del mar, originando en consecuencia el avance tierra adentro del agua marina y con esto la inutilización de terreno cultivable. Actualmente, los niveles se hallan alrededor de los 60 m abajo del nivel del mar.

Una de las posibles soluciones a este problema es extraer un volumen menor al que entra por recarga (tanto de aguas superficiales como subterráneas), que ha sido estimado en  $100 \text{ Mm}^3$  anuales. Otra sería construir una barrera de pozos en la línea de costa para disminuir la velocidad de entrada de la intrusión salina.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Conocer el estado de explotación y de avance de la intrusión salina en el acuífero del Valle de Guaymas, Sonora mediante el análisis de datos históricos y actuales.

### **Específicos**

1. Hacer una revisión de los datos históricos de piezometría y calidad del agua (sólidos totales disueltos y cloruros) de los años 1950, 1970, 1975, 1990, 1995 y 1996
2. Hacer un muestreo hidrogeoquímico y realizar mediciones de los niveles estáticos del agua por lo menos de 2 años consecutivos
3. Graficar la información histórica y actual mediante el programa Surfer
4. Analizar los datos hidrogeológicos y determinar el estado actual del acuífero en cuanto a explotación e intrusión salina se refiere.



## JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

Debido a las bajas precipitaciones que se presentan en el Estado de Sonora, se ha recurrido al uso del agua subterránea para dotar de este recurso a las actividades domésticas, agrícolas, ganaderas, industriales y mineras.

A partir de los años 50's se inició la explotación de los acuíferos costeros para el desarrollo de actividades agrícolas principalmente. Se establecieron los distritos de riego en extensas zonas a lo largo de la costa explotando sin control el recurso del subsuelo. Debido a esta explotación intensiva y a las escasas precipitaciones que traen consigo, baja recarga a los acuíferos, los niveles estáticos del agua comenzaron a descender, hasta llegar en nuestros días, a alarmantes posiciones de decenas de metros abajo del nivel del mar. Este descenso aceleró también la entrada de agua marina al continente, invadiendo e inutilizando los mantos de agua dulce. A este fenómeno se le conoce como intrusión salina o marina.

Entre los acuíferos más afectados se encuentran el de Caborca, Costa de Hermosillo y Guaymas, siendo éste último objeto del presente estudio. La importancia del acuífero del Valle de Guaymas radica en que no sólo provee de agua al Distrito de Riego 084 Valle de Guaymas con una superficie promedio regada en la actualidad de 17,000 ha, sino que también surte de agua para uso doméstico y de servicio a las ciudades de Guaymas y Empalme con alrededor de 185,000 habitantes.

Los resultados del presente estudio permitirán conocer la sobreexplotación y contaminación por intrusión salina que ha sufrido el Valle de Guaymas.

## LITERATURA REVISADA

### 1. Terminología utilizada

Antes de abordar el tema de investigación, se presenta la terminología utilizada, con el fin de facilitar al lector los conceptos tratados.

**1) Transmisividad.** La Transmisividad ó Transmisibilidad del acuífero sirve para calcular la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de una anchura unitaria, por el grosor saturado del acuífero, bajo un gradiente hidráulico de 1. Matemáticamente, la transmisividad se expresa como el producto de la conductividad hidráulica por el espesor saturado del acuífero:

$$T = K b$$

donde,  $T$  = transmisividad ( $m^2/s$ )

$K$  = conductividad hidráulica ( $m/s$ )

$b$  = espesor saturado del acuífero ( $m$ )

Para un acuífero con varias capas, la transmisividad total es la suma de las transmisividades de cada una de las capas.

**2) Coeficiente de almacenamiento.** Representado como  $S$ , se define como el volumen de agua que un acuífero deja o toma del drenaje por área unitaria de superficie del acuífero por unidad de carga. Matemáticamente, es el producto del coeficiente de almacenamiento específico ( $S_s$ ) por el espesor del acuífero ( $b$ ). No tiene unidades. El coeficiente de almacenamiento para un acuífero no confinado (libre), corresponde a su rendimiento específico y se expresa en porcentaje. ( $S_y$ ).

**3) Coeficiente de permeabilidad.** Es el caudal que circula a través de una área unitaria, transversal al flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Simbolizado por  $K$ , depende tanto de las propiedades del medio poroso como del fluido que circula por él. Esto

implica que  $K$  también se podrá expresar por un coeficiente que sea independiente de aquellas propiedades que gobiernan el flujo, es decir:

$$K = f(\mu, \gamma, d)$$

donde,  $K$

$K$  = coeficiente de permeabilidad (m/s)

$d$  = diámetro de grano representativo (m)

$\gamma$  = peso específico del agua ( $\text{g/m}^2 \text{s}^{-2}$ )

$\mu$  = viscosidad dinámica del agua ( $\text{g/m s}$ )

**4) Recarga.** Todo acuífero tiene mecanismos naturales de recarga y descarga, que pueden ser modificados mediante recarga y/o descarga artificiales. La recarga natural del acuífero ocurre por la infiltración de agua de lluvia en formaciones permeables, aunque no toda el agua que se infiltra llega al acuífero, debido a que una parte de ella es retenida por las formaciones que se encuentran arriba del nivel freático. El acuífero puede ser recargado también artificialmente, mediante la infiltración de agua a través de obras (pozos, repesos, bordos, etc) construidas con ese fin.

La recarga es el volumen renovable de los acuíferos; por que en general, es más o menos representativa de la disponibilidad permanente de agua subterránea. De aquí que sea importante cuantificar su orden de magnitud con la mayor precisión posible, ya que es uno de los principales factores limitantes que deben considerarse al contemplar el aprovechamiento de un acuífero. Su sobreestimación puede dar lugar a una sobreexplotación perjudicial que, a largo plazo, daña a la economía de la zona afectada, y su subestimación puede retrasar o frenar el desarrollo de la misma (UACH, 1987).

**5) Descarga.** La descarga natural tiene lugar a través de manantiales y cauces; por evapotranspiración en áreas con nivel freático somero, o subterráneamente al mar o a cualquier masa de agua superficial (laguna, lago, o vaso). La descarga artificial se lleva a cabo a través de pozos de bombeo, los cuales pueden tener características variables (diámetro de descarga, profundidad, potencia de la bomba, etc).



El conocimiento de los mecanismos de recarga y descarga de un acuífero, es indispensable para cuantificar su potencialidad, planear su explotación racional y requiere de la observación continua del comportamiento de los niveles de agua en pozos distribuidos en el área considerada.

El agua se mueve en el acuífero de las zonas de recarga a las de descarga, siguiendo las trayectorias de menor resistencia y a una velocidad que depende de la permeabilidad de las rocas y del gradiente hidráulico. Dicho de otra manera, el agua subterránea se mueve de los niveles energéticos más altos a los más bajos, de aquí que su energía proceda prácticamente de las diferencias de presión y nivel.

La velocidad puede variar desde unos cuantos centímetros por año en materiales arcillosos, hasta varios cientos de metros por año en gravas; aunque en algunas rocas volcánicas y calizas, puede llegar a ser de varios kilómetros por año.

**6) Niveles freáticos y piezométricos.** Se define como el límite bajo el cual, todos los poros del medio granular están llenos de agua. Se conoce como nivel piezométrico o potenciométrico al nivel del agua medido en un pozo o piezómetro. Estos niveles oscilan continuamente respondiendo a la recarga y descarga del acuífero. Si el nivel del agua (freático o piezométrico) no está afectado por la operación de una captación, se le llama **nivel estático**; en caso contrario, se le llama **nivel dinámico** (UACH, 1987).

**7) Gradiente hidráulico.** Se simboliza como  $i$  y se define como el cociente entre el diferencial de carga hidráulica ( $\Delta h$ ) y el diferencial de longitud o distancia ( $\Delta l$ ) entre dos puntos. En pocas palabras, es la pendiente del agua. En condiciones de gradiente hidráulico normal, el agua subterránea se mueve de un gradiente mayor hacia uno menor, siguiendo más o menos la superficie del terreno hacia el mar.

**8) Inversión del gradiente hidráulico.** Éste se genera cuando la carga hidráulica del mar es mayor que la del acuífero; esto sucede si el nivel piezométrico del acuífero es abatido por diversas causas, a profundidades bajo el nivel del mar. Cuando el gradiente



es hacia el mar, existe el flujo del agua hacia él, y se considera como gradiente hidráulico normal. En el caso de que dicho gradiente o pendiente del agua, sea del mar hacia tierra adentro, se establecerá un flujo de agua hacia el continente y a esto se le conoce como gradiente hidráulico invertido.

**9) Intrusión salina.** Los acuíferos en islas y áreas costeras están propensos a la intrusión de agua marina, porque el agua salada es más densa que el agua dulce (gravedad específica de 1.03 y 1.0 respectivamente, según Evett y Liu, 1987), y podría invadir acuíferos que estén hidráulicamente conectados al océano. Bajo condiciones naturales, la recarga de agua dulce forma un lente el cual flota por encima del agua marina. Esta condición de equilibrio puede ser afectada por cambios en la descarga y/o condiciones inducidas de bombeo y recarga artificial (Maidment, 1993).

El lente de agua dulce que flota sobre el agua de mar se denomina *Lente de Ghyben-Herzberg*, nombre de los dos descubridores del fenómeno. Dichos autores encontraron que se necesitan aproximadamente 40 m de agua dulce por debajo del nivel del mar para mantener el equilibrio hidrostático en una columna de agua dulce de 1 m situada por encima de ese mismo nivel. Sin embargo, el verdadero equilibrio no puede existir bajo una capa freática que presente un gradiente hidráulico, puesto que debe ocurrir flujo bajo la acción del mismo. Por consiguiente, existirá una superficie de filtración de agua dulce hacia el mar y una zona de mezcla a lo largo de la superficie de separación de las dos aguas conocida como zona de transición o interfase. Una tasa de recarga variable, el bombeo de pozos y la acción de las mareas pueden perturbar el equilibrio agua dulce-salada (Linsley et al., 1979).

Como se ha dicho, el agua subterránea se mueve bajo el terreno de las partes más altas a las más bajas, bajo una pendiente o gradiente hidráulico normal. Cuando el agua dulce llega a la línea de costa, se mezcla con el agua salada del mar, quedando el agua salada abajo, debido a su gravedad específica. La línea o zona que divide el agua dulce de la salada, es conocida como la interfase, y se puede decir que existe un equilibrio natural en ella. El problema ocurre cuando se rompe este equilibrio y se invierte este

gradiente hidráulico, produciéndose la intrusión salina o marina.

El problema de la intrusión marina empezó a producirse en zonas costeras con alta densidad de población donde la demanda de agua dulce era apremiante. La creciente salinización de las aguas extraídas en los pozos, fue notada ya en 1885 en Londres y Liverpool. Hoy día el problema de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros se puede encontrar en muchos países del mundo y desafortunadamente está presente en la mayoría de los acuíferos en la Costa de Sonora, México (Vega y Castillo, 1998).

**10) Detección de la intrusión salina.** Lo que más delata el comienzo o el establecimiento de un estado de intrusión marina es una rápida elevación del contenido del ion cloruro. El agua de mar tiene como característica interesante su bajo contenido de bicarbonato. La relación cloruro-bromuro puede ser también importante, pero el agua debe estar muy salinizada para que el contenido de bromuro sea medible con la suficiente precisión. La relación  $Cl/HCO_3$  también se emplea como un índice cuya rápida elevación puede traducirse en signo de intrusión marina. El alto valor de la relación  $Mg/Ca$  (5) y el bajo valor para las aguas dulces (0.2 a 1) es también un posible índice.

## **2. Importancia del agua en el Mundo y en México**

El agua es un recurso importante en todas las regiones del mundo, sin embargo, este patrimonio tiene una importancia extraordinaria en regiones áridas y semiáridas debido a su escasez e irregular distribución (Mayer, 1997).

° Cuantitativamente, dentro del ciclo hidrológico poco menos del 3 % del agua dulce fluida disponible, se encuentra en forma superficial, concretamente en ríos y lagos. Como ésta es la forma más tangible, se han construido obras de ingeniería muy notables, como embalses artificiales (presas), canales de riego, diques, etc.

El 97 % restante del agua dulce (sin contar la que se encuentra en la atmósfera), se encuentra en el subsuelo y se conoce como agua subterránea; ésta es generalmente



agua almacenada, acumulada a través de mucho tiempo y que por efecto de las lluvias, en forma natural aumenta gradualmente su volumen. En cambio el agua superficial, se encuentra sujeta a mayores variaciones y en general es agua en tránsito (Velasco, 1979).

Por agua subterránea se entiende el agua que ocupa todos los vacíos dentro de un estrato geológico. La mayor cantidad de agua subterránea proviene de aquélla infiltrada a través de los diferentes estratos del suelo, aunque una mínima parte de la misma puede tener otros orígenes, el proceso por medio del cual se incrementa el volumen de agua subterránea se conoce como recarga, la cual ocurre principalmente en época de lluvias (Springall, 1970).

Históricamente, las aguas superficiales han recibido mayor atención respecto al desarrollo y uso en la agricultura. Esto se debe a la relativa facilidad de su obtención para el riego y el almacenamiento, a partir de los ríos próximos a llanuras aluviales.

Durante los últimos 100 años, el desarrollo de los motores de combustión interna, motores eléctricos y bombas sumergibles ha puesto de manifiesto una nueva fuente de agua: la subterránea. Una de las principales dificultades que hubo en el pasado fue la localización de aguas subterráneas. El más importante problema en la actualidad es determinar la cantidad y calidad del agua, así como aprender a manejar los recursos de acuerdo con los principios de hidrología (Borgo, 1998).

En la actualidad casi no existe un lugar en el mundo donde se haga uso de este recurso, que no tenga problemas de sobreexplotación, contaminación y en algunos casos, problemas legales hasta de tipo internacional.

Aún en los países en donde las aguas superficiales son abundantes, se hace uso de las aguas del subsuelo porque presentan las siguientes ventajas: no están sujetas a pérdidas por evaporación, no requieren tratamientos de decantación ó son aguas de fácil tratamiento para uso humano e industrial, la contaminación bacteriológica no es frecuente y se puede evitar diseñando bien el pozo, puede ser el medio más rápido y económico para uso inmediato de las aguas sin necesidad de obras adyacentes; otras



ventajas son la temperatura constante y capacidad de almacenamiento, entre otras (Castillo, 1997).

El agua subterránea en México constituye uno de los recursos hidráulicos más importantes, principalmente para sus regiones áridas y semiáridas, que cubren más del 60 % del área del país, motivo por el cual su aprovechamiento en dichas zonas se ha llevado a cabo en forma intensiva, siendo en muchos casos la base del auge económico alcanzado en ellas.

La explotación intensiva del agua subterránea en México se inició a partir de 1950, cuando se crearon los más importantes Distritos de Riego del país, de los que se obtiene el 50 % de la producción agrícola; sin embargo, en ese entonces no se contaba con la tecnología adecuada para determinar el comportamiento de los acuíferos y a raíz de ello su aprovechamiento se efectuó sin control, siguiendo únicamente la política de satisfacer las necesidades que generaba el desarrollo de las zonas agrícolas (Tinajero, 1982).

En materia de aguas subterráneas la sobreexplotación de los mantos es un problema muy grave y ampliamente extendido en México. Hay una gran dificultad para determinar desde la administración pública, los volúmenes de extracción eficientes y apropiados para cada usuario, además de que es muy complejo e incluso imposible verificar que la extracción corresponda al volumen asignado, ya que siempre hay incentivos para exceder las cuotas. Y algo peor, los derechos aplicables no se cobran en su mayor parte, dando por resultado que algo muy escaso y valioso para la sociedad (como es el agua) sea casi gratuito para los individuos que la explotan. La sobreexplotación es tan grave que ha llegado al grado de que los acuíferos se contaminan con sales tóxicas del subsuelo, como es el caso del arsénico en la Comarca Lagunera, o bien a su inutilización total como resultado de la intrusión salina del mar \*(Cespedes, 1998).

En aproximadamente 115 acuíferos de México, el bombeo excede a la recarga natural anual, lo que provoca que los niveles en los pozos de extracción estén

\* Cita de Internet <http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/cuadernos/c7.html>.

disminuyendo más de 2 m/año. La sobreexplotación ha ocasionado que más de 80 acuíferos del Norte y Noroeste del país y las Cuencas de los Ríos Lerma y Balsas, presenten intrusión salina y daños prácticamente irreversibles como hundimientos de tierra y presencia de arsénico, además de costos de extracción inalcanzables. En el Valle de México, la sobreexplotación de los mantos acuíferos es la culpable del hundimiento del centro del Distrito Federal y de grietas que afectan obras hidráulicas y edificios \*(Cespedes, 1998).

El principal efecto de la sobreexplotación de los acuíferos es el abatimiento en los niveles piezométricos debido a la diferencia entre los volúmenes que alimentan o recargan a éstos y los volúmenes que se extraen. También influyen las características hidrológicas, principalmente la transmisibilidad, que es la capacidad del acuífero para permitir el flujo del agua subterránea. Otro efecto alterno es el aumento en los costos de extracción, dado que se necesita un equipo de bombeo más grande y sobretodo un mayor consumo de energía eléctrica (Castillo et al., 1998).

### **3. El agua superficial en Sonora**

Sonora se ubica al Noroeste de México; limita al Norte en una extensión de 588 km con los Estados Unidos de Norteamérica, al Este con Chihuahua en 420 km, al Sureste con Sinaloa en 100 km, al Noroeste con Baja California en 90 km y al Oeste con el Mar de Cortés en 860 km. Su extensión territorial es de 182,052 km<sup>2</sup> y su posición geográfica se localiza en los paralelos 26° 14' a 32° 29' de Latitud Norte y meridianos 108° 27' a 115° 03' de Longitud Oeste (INEGI, 1993).

Sonora ocupa un lugar preponderante en el país por su desarrollo económico, basado principalmente en la agricultura y ganadería a pesar de que está situado en la porción más árida del territorio nacional. La disponibilidad del conjunto de presas del Estado tiene una capacidad de almacenamiento de 9,200 Mm<sup>3</sup> (INEGI, 1993).

La entidad comprende las siguientes regiones hidrológicas: RH-7 Río Colorado; RH-8 Sonora Norte; RH-9 Sonora Sur; RH-10 Sinaloa y RH-34 Cuencas Cerradas del Norte. Dichas regiones pertenecen a la Vertiente Occidental o del Pacífico (cuencas

\* Cita de Internet <http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/cuadernos/c7.html>.

exorreicas), a excepción de la última que corresponde al sistema de regiones que conforman la Vertiente Interior (cuencas endorreicas).

De las anteriores regiones hidrológicas resalta por su importancia la número RH-9, Sonora Sur, pues da cabida a los principales ríos de la entidad (Mayo, Yaqui, Mátape, Sonora y Bacoachi) y de sus cuencas se capta el 98.9 % del volumen total de almacenamiento del Estado. El principal uso que se le da a dicha agua es el agrícola, en segundo término el doméstico y comercial, y finalmente el pecuario e industrial (Arámbula y Palomino, 1991).

#### **4.- El agua subterránea en Sonora**

El agua subterránea en Sonora se empieza a explotar por medio de pozos en los años cincuentas, dando origen a polos de economía basados principalmente en la agricultura intensiva, teniendo como cultivos principales el trigo, algodón, frutales y hortalizas.

Así es como nacen los Distritos de Riego: Valle del Yaqui, Valle del Mayo, Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas, Sahuaral, Caborca, San Luís Río Colorado y Sonoyta principalmente. Se tienen identificadas 44 zonas acuíferas en el Estado, con características geohidrológicas propias.

Básicamente se distinguen 2 grupos de acuíferos: los costeros y los intermontanos; entre los primeros tenemos la Mesa Arenosa de San Luís Río Colorado, Caborca, Costa de Hermosillo, Guaymas, Yaqui y Mayo; entre los segundos están los acuíferos de los Valles de Magdalena, Río Sonora, Mátape, Moctezuma, Bavispe, Sahuaripa, San Bernardino y Cuchujaqui, entre otros.

También se denominan como acuíferos fronterizos por su localización geográfica y su manejo, a los que se localizan en la frontera entre México y Estados Unidos, como el de Sonoyta, Nogales, Santa Cruz, San Pedro, Agua Prieta y Rusbayo.



En Sonora existen aproximadamente unos 17,000 aprovechamientos de agua subterránea, ya sea por medio de pozos profundos y someros ó norias. De este número, aproximadamente el 38 % se usan en agricultura y son los que extraen la mayor parte del agua; un 28 % se utilizan en la ganadería con diámetros pequeños de descarga de 1" a 2"; para agua potable se destina un 31 %; sólo el 3 % lo manejan la industria, servicios, etc. \*(Macías, 1999).

Para 1990, la extracción anual de agua subterránea en el Estado era de 2,854.4 Mm<sup>3</sup>, de los cuales el 93 % se empleaba en actividades agrícolas, pecuarias y uso doméstico, 1.5 % en la industria y 0.7 % en otros fines (INEGI, 1993).

La recarga media anual de los embalses subterráneos de la entidad es del orden de los 2,556.2 Mm<sup>3</sup> (CNA, 1995 *in* Castillo et al., 1999) cifra que comparada con la descarga de 2,854.4 Mm<sup>3</sup> (INEGI, 1993), produce un déficit de 298.2 Mm<sup>3</sup> resultando una sobreexplotación del agua subterránea principalmente en las zonas de la Costa de Hermosillo, Caborca, Río Sonoyta y Guaymas. Resultado de lo anterior, en la mayoría de los acuíferos costeros en Sonora, se advierte el fenómeno de la intrusión salina, a distintos niveles de afectación del acuífero, desde una calificada como leve en Caborca, hasta una grave como la de Guaymas, donde se han abandonado la mitad de los pozos y superficies de cultivo.

De acuerdo con estudios geohidrológicos existentes, la recarga total a los acuíferos en Sonora es de 2,556.2 Mm<sup>3</sup>, cuya distribución se muestra en el Cuadro 1.

\* *Comunicación personal.*

**Cuadro 1.- Recarga y descarga de los acuíferos en Sonora**

| Acuífero              | Recarga (Mm <sup>3</sup> ) | Descarga (Mm <sup>3</sup> ) | Observación         |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| San Luís Río Colorado | 100                        | 100                         | Equilibrio          |
| Santa Cruz            | 51                         | 53                          | 50% Mina de Cananea |
| Río Sonoyta           | 35                         | 42                          | Sobreexplotado      |
| Río Asunción          | 558                        | 834                         | Sobreexplotado      |
| Río Sonora            | 826                        | 909                         | Sobreexplotado      |
| Río Mátape            | 154                        | 185                         | Sobreexplotado      |
| Río Yaqui             | 619                        | 277                         | Subexplotado        |
| Río Mayo              | 163                        | 163                         | Equilibrio          |
| Otros ríos            | 50.2                       |                             |                     |

Fuente: CNA (1995) *in* Castillo et al.(1999)

### 5. La Cuenca del Río Mátape

Se encuentra en la porción central de la entidad y al Oeste de la Región Hidrológica RH-9; comprende un área de 9,043 km<sup>2</sup> localizada íntegramente dentro del Estado de Sonora (Fig. 1). cuenta con una precipitación total anual de 342 mm y pendiente general que oscila de media a baja.

El dren principal de la cuenca es el Río Mátape, el cual tiene su nacimiento al Noreste de Villa Pesqueira (Mátape) desde donde inicia su trayectoria de 107 km hasta descargar sus aguas en el vaso de la Presa Ignacio L. Alatorre (Punta de Agua), cuyas aguas se aprovechan en la parte alta de la zona agrícola del Valle de Guaymas. Durante este recorrido, el Río Mátape observa una pendiente media de 0.0038 y dirección general Noreste-Suroeste, siendo sus afluentes una gran cantidad de arroyos de carácter intermitente (Arámbula y Palomino, 1991).

La única estación hidrométrica ubicada en la cuenca, es la Punta de Agua, situada sobre el Río Mátape a 9 km aguas arriba del vaso de la Presa Ignacio L. Alatorre, la cual se encuentra actualmente fuera de servicio, y llegó a registrar un volumen promedio de escurrimiento de 35.7 Mm<sup>3</sup> anuales, aunque hubo años con registros nulos (Arámbula y Palomino, 1991).



Las presas Ignacio L. Alatorre (Punta de Agua) y la Haciendita, ambas sobre el Río Mátape, representan las obras de almacenamiento de mayor importancia, con volúmenes de almacenamiento de 28 Mm<sup>3</sup> y 10 Mm<sup>3</sup> respectivamente (Arámbula y Palomino, 1991).

#### a. Clima

El clima que domina en la Cuenca del Río Mátape es del grupo de los secos (B) según la Clasificación de Köppen (Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981a), los cuales se dividen en varios tipos, que van de lo menos seco a lo muy seco. De manera general, se diferencian 4 tipos de climas en la cuenca, que se resumen en el Cuadro 2.

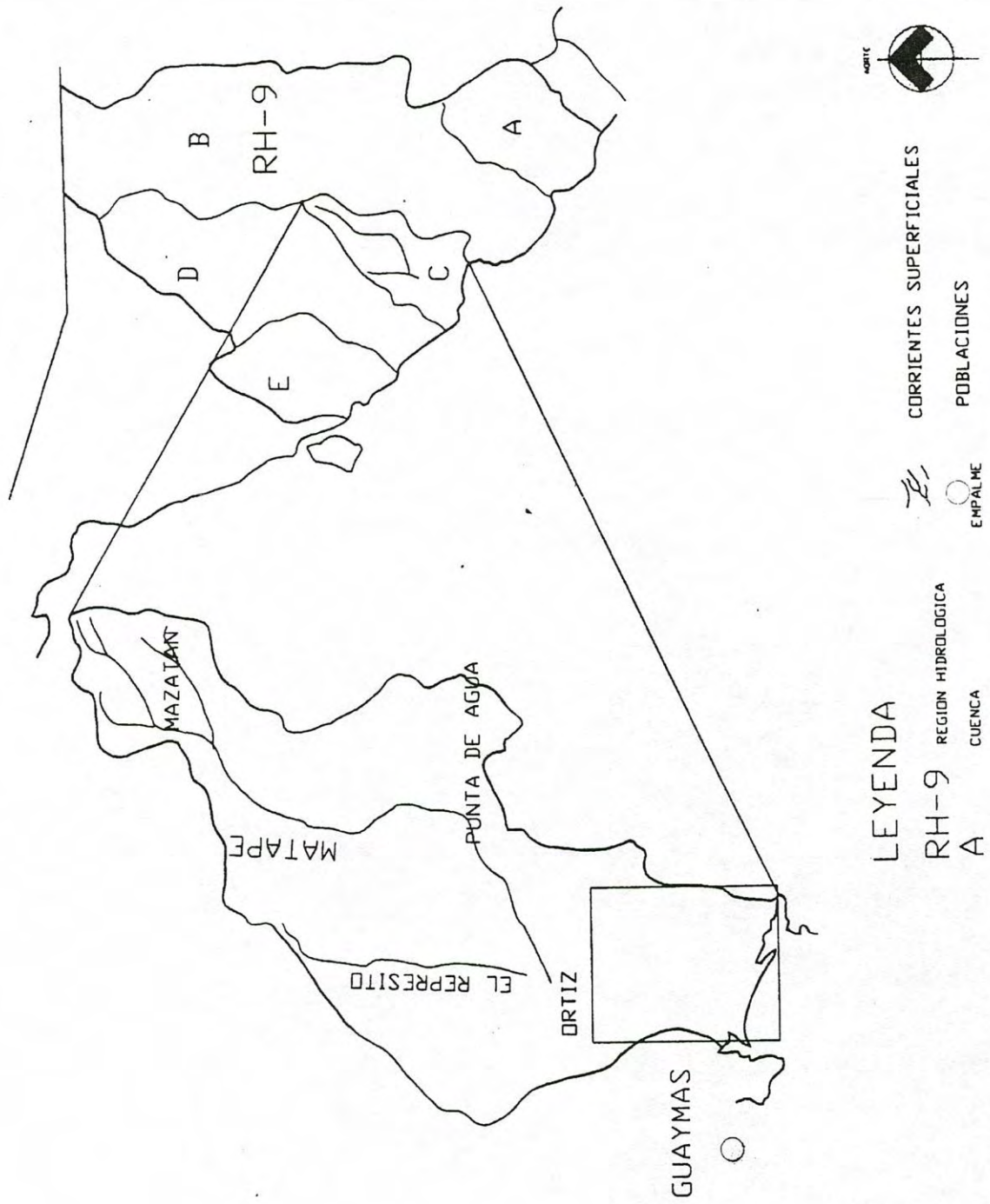
**Cuadro 2.- Tipos de climas secos de la Cuenca del Río Mátape**

| <b>Clasificación</b>    | <b>Tipo</b>               | <b>Subtipo</b>                       | <b>Descripción</b>                      |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|
| BS <sub>0</sub> hw (x') | BS <sub>0</sub> seco      | hw (x') seco semi-cálido             | Lluvias de verano, pp invernol > 10.2 % |
| BS <sub>1</sub> hw (x') | BS <sub>1</sub> semi-seco | hw (x') semiseco-semicálido          | Lluvias de verano, pp invernol > 10.2 % |
| BS <sub>0</sub> (h') hw | BS <sub>0</sub> seco      | (h') hw seco muy cálido y cálido     | Lluvias de verano, pp invernol 5-10.2 % |
| BW (h') hw              | BW muy seco               | (h') hw muy seco muy cálido y cálido | Lluvias de verano, pp invernol 5-10.2 % |

Fuente: SPP (1981a) *in* Vega (1992)



Fig. 1: Localización de la Cuenca del Río Mátape



La característica de los climas secos es que las lluvias se presentan en verano y son escasas a lo largo del año. En la porción noroeste de la cuenca predomina el tipo B S<sub>0</sub> hw (x') en los poblados y rancherías de Cobachi, La Colorada, San José de Pimas, Moradillas y Las Canoas.

Al Noreste de la cuenca se puede observar el clima B S<sub>1</sub> hw (x') en Mazatán, La Vuelta Colorada, Los Vasitos, Nácori Grande y Mátape.

En San Marcial y la Presa Punta de Agua, al centro de la cuenca predomina el tipo B S<sub>0</sub> (h') hw.

En el valle, aguas abajo de la presa, se tiene el tipo BW (h') hw, en La Misa, Lázaro Cárdenas, Mariano Escobedo, Ortiz, Maytorena, Guaymas y Empalme. En el centro-sur las precipitaciones invernales se hallan entre el 5-10.2 % del total.

### b. Temperatura

Las temperaturas del área varían de los 18 a los 22 °C limitadas en 3 zonas por isotermas como se observa en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.- Temperaturas de la Cuenca del Río Mátape**

| Isoterma media anual (°C) | Localidades   |
|---------------------------|---|
| 18 – 20                   | Sierra Mazatán, La Vuelta Colorada, El Pozo, Pozo Nuevo                                 |
| 20 – 22                   | Nácori Grande, Mazatán, Cobachi, San José de Pimas, La Colorada, Moradillas, Las Canoas |
| 22                        | San Marcial, Presa Punta de Agua, La Misa, Ortiz, Maytorena, Guaymas, Empalme           |

Fuente: SPP (1981a) *in* Vega (1992)

### c. Precipitación

La cuenca es atravesada de Norte a Sur por las isoyetas 200 a 500 mm, cuyos datos de precipitación se toman en varias estaciones meteorológicas a cargo de la Comisión Nacional del Agua, algunas de las cuales cuentan con información recabada por más de 30 años. Cuadro 4.

**Cuadro 4.- Precipitación de la Cuenca del Río Mátape**

| Isoyeta media anual (mm) | Localidades  |
|--------------------------|--|
| 200 – 300                | La Misa, Mariano Escobedo, Lázaro Cárdenas, Ortiz, Maytorena, José María Morelos, Mi Patria es Primero, Guaymas, Empalme |
| 300 – 400                | La Colorada, Moradillas  |
| 400 – 500                | Cobachi, San José de Pimas, Las Canoas, San Marcial, Presa Punta de Agua   |
| 500 – 600                | Mazatán, Nácori Grande   |

Fuente: SPP (1981a) *in* Vega (1992)

Como generalmente ocurre, los mayores volúmenes de precipitación se presentan en las partes topográficas más altas (Mazatán, Nácori Grande) y los menores en el valle, cerca de la costa (Guaymas, Empalme).

### d. Hidrología superficial

Una cuenca hidrológica es la superficie que proporciona agua a una corriente, río ó arroyo. La Cuenca del Río Mátape es considerada como una de las más pequeñas del Estado de Sonora, sin embargo enfrenta serios problemas debidos a la degradación, principalmente inducida, de los recursos naturales (Peña et. al., 1996). La principal corriente de la cuenca, es el Río Mátape que es un río intermitente y sólo lleva agua durante períodos de lluvia, aún cuando se ha encontrado agua en el subálveo del lecho del río en toda época del año. Su nacimiento ocurre aguas arriba del poblado de Mátape (Villa Pesqueira) pasando por Mazatán, Cobachi, San José de Pimas y San Marcial hasta



la Presa Ignacio L. Alatorre (Punta de Agua). De aquí en adelante toma el nombre de San Marcial ramificándose varias veces hacia el Valle de Guaymas.

La cuenca tiene forma alargada irregular orientada sensiblemente Norte-Noreste. El área total de la cuenca es de 9,043 km<sup>2</sup>. El área de una cuenca se puede medir directamente con un planímetro o mediante el uso de programas de computadora como el AutoCAD.

La pendiente de la cuenca fue calculada por Vega (1992) usando el Criterio de Alvord que se basa en la fórmula siguiente:

$$Sc = D L / A$$

donde, Sc = pendiente de la cuenca

D = desnivel constante entre las curvas de nivel (km)

L = longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Del mapa topográfico base, escala 1:250,000 se obtuvieron los siguientes datos:

D = 0.25 km

L = 1,046 km

A = 7,450 km<sup>2</sup>

$$Sc = 0.25 (1,046) / 7,450 = 0.0351 = 3.51 \%$$

La longitud de las curvas de nivel se midió con un curvómetro y el área se tomó de los planos de aguas subterráneas del INEGI, escala 1:250,000.

## 6. El Valle de Guaymas

### a. Límites geográficos

Esta zona abarca una superficie de 844 km<sup>2</sup>, se localiza en la parte centro-meridional del Estado de Sonora y hacia el Oeste de la Región Hidrológica RH-9, Sonora Sur. El Valle de Guaymas presenta límites naturales bien definidos: al Norte colinda con la Sierra San Antonio, al Este con la Sierra El Bacatete, al Sur con el Golfo

de California y al Oeste con las Sierras Santa Úrsula y El Pozo (Arámbula y Palomino, 1991).

### **b. Geología de superficie**

A continuación se describen las unidades geológicas que afloran en el Valle de Guaymas (Fig. 1) según Vega y Castillo (1998):

K (Gr). Granito del Cretácico Superior. Constituye los primeros emplazamientos plutónicos que afectaron las secuencias paleozoicas y mesozoicas. En ocasiones está cubierto por rocas volcánicas terciarias y sedimentos clásticos continentales. Forma lomeríos de poca altura, también se halla en zonas planas o con poca pendiente. Aflora en la Sierra Santa Ursula al Oeste del valle y en pequeños afloramientos en la Sierra El Bacatete.

T (R-Ta). Riolita y toba ácida del Terciario. Esta unidad está formada por la intercalación de derrames riolíticos y tobas de composición ácida. Los derrames presentan textura brechoide y las tobas son muy compactas y muestran pseudoestratificación. Esta unidad subyace a basaltos y conglomerados. Constituye la mayor parte de la Sierra El Bacatete al Este del valle.

T (R). Riolita del Terciario. Subyace a conglomerados y basaltos y también pertenece a los eventos volcánicos terciarios. Forma sierras abruptas y constituye gran parte de la Sierra Santa Ursula.

Q (B). Basalto Cuaternario. Los basaltos de color negro con intemperismo café se encuentran fuertemente fracturados. Cubren a las secuencias volcánicas ácidas del Cretácico. Esta unidad toma la forma de las unidades sobre las que se encuentra y en ocasiones forma mesas. Aflora en la parte central del valle, en la Sierra San Francisquito, en la porción Sur de la Sierra El Bacatete y en la porción oriental de la Sierra Santa Ursula.



T (cg). Conglomerado del Terciario. Esta unidad comprende los sedimentos gravosos depositados desde el Terciario Tardío hasta principios del Cuaternario. Está formada por conglomerados continentales. Cubre a rocas ígneas y forma los remanentes de antiguos abanicos aluviales en los bordes de las sierras. Está muy distribuida en toda el área, aflorando de manera extensiva en la porción central-norte del valle, desde la Presa Punta de Agua hasta el Ejido Adolfo de la Huerta.

Q (al). Sedimentos aluviales del Cuaternario. Son depósitos que representan el evento sedimentario más reciente en las cuencas continentales originados por movimientos postorogénicos. La unidad incluye depósitos gravosos relacionados con abanicos aluviales recientes y el retrabajo de conglomerados terciarios, coluviones en los márgenes de las sierras y depósitos aluviales en los valles intermontanos. Constituye la mayor parte del valle, en la porción central limitada por las Sierras Santa Ursula y El Bacatete.

### c. Geología del subsuelo

En esta área, existen dos paquetes acuíferos conformados por material granular, los cuales están separados por una capa arcillosa de origen marino. El primer paquete denominado **acuífero superior**, es considerado del tipo libre con transmisibilidades que van de  $1 \times 10^{-3}$  a  $7.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$ . Tiene un espesor promedio de 160 m y se constituye por depósitos aluviales del Reciente, representados por capas interdigitadas de boleas, gravas, arenas y arcillas, dispuestas en forma errática. Dentro de este acuífero se tiene la presencia de una lenticula arcillosa de origen continental.

El segundo paquete, denominado **acuífero inferior**, presenta un funcionamiento característico de los acuíferos de tipo semiconfinado, con una transmisibilidad media de  $2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$ . Está constituido por intercalaciones de gravas, arenas, arcillas y conglomerados terciarios, con espesor de 180 m que descansan sobre rocas ígneas y metamórficas que representan el basamento impermeable de la región.



La capa que separa a ambos acuíferos, está caracterizada por arcilla intercalada con lentes de grava y arena, su espesor es de unos 160 m en las proximidades del litoral, acuñaéndose hacia el Norte hasta alcanzar un espesor de 30 m en la parte alta de la zona. Se establece que el límite superior de esta capa se encuentra en las inmediaciones del Bordo de Ortiz. Aguas arriba de este lugar, los acuíferos superior e inferior, se confunden en un solo paquete constituido por gravas, arenas y conglomerados, intercalados con derrames de rocas volcánicas básicas (Arámbula y Palomino, 1991).

#### **d. Localización de pozos**

El Valle de Guaymas carece de escurrimientos superficiales por lo que el desarrollo agrícola se ha basado en la explotación de agua subterránea. La agricultura en este valle se inició a principios de 1940, pero ésta era sólo en menor escala y el aprovechamiento del recurso agua era para fines domésticos y abastecimiento de agua potable las ciudades de Guaymas y Empalme; sin embargo, el auge agrícola que se registró entre 1954 y 1956, propició que se perforaran más de 100 pozos con una extracción aproximada de  $80 \text{ Mm}^3$  en ese período (Rodríguez y Pérez, 1991). Se estima que en el Valle de Guaymas, un 80% del agua subterránea se destina a la agricultura, un 15% al consumo humano y un 5% en industria y otros usos.

En los mapas de niveles estáticos elaborados para **1950**, se observan gradientes hidráulicos normales o positivos, es decir, todavía en ese año, los niveles de agua subterránea se hallaban en cotas positivas o arriba del nivel del mar, siguiendo la topografía de superficie. No había evidencia entonces de sobreexplotación.

Sin embargo; para el año de **1957**, y debido a la extracción generada con anterioridad, en algunos pozos se registraron niveles piezométricos por debajo del nivel del mar. También ocurrió que la calidad del agua de los pozos cercanos a la costa, fue afectada rápidamente por la invasión de agua de mar y se volvió práctica muy común la suspensión y relocalización de pozos (más de 50 pozos) con la inutilización de unas 8,000 ha entre 1954 y 1957 (Rodríguez y Pérez, 1991).





Según el plano elaborado en 1975 por la compañía Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. para la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos, los pozos se encuentran distribuidos en casi todo el Valle de Guaymas y también en el Valle de Boca Abierta, pero la mayor densidad de pozos ha estado presente casi siempre en el centro del Valle de Guaymas, principalmente alrededor de Maytorena, colindando con los ejidos: San Fernando de Guaymas, Mi Patria es Primero, Úrsulo Galván, José María Morelos y Pavón, Santa María de Guaymas, Triunfo Santa Rosa y Antonio Rosales, entre otros.

En el Valle de Boca Abierta o Cruz de Piedra, también se encuentran una buena cantidad de pozos, utilizados con anterioridad principalmente en actividades agrícolas y en la actualidad, para suministrar agua potable a las ciudades de Guaymas y Empalme (Martínez, 1999). En esta zona la intrusión salina no ha alcanzado el grado de avance que tiene en el Valle de Guaymas.

#### **e. Evolución piezométrica del acuífero**

La superficie piezométrica de un acuífero presenta variaciones naturales y artificiales de nivel en función del tiempo. Las **variaciones naturales**, que se deben principalmente a factores meteorológicos, hidrológicos o geológicos, presentan un carácter cíclico o accidental. Las oscilaciones cíclicas pueden ser estacionarias o secundarias o bien de corta duración. Estas últimas tienen por origen las precipitaciones, la evapotranspiración, la presión atmosférica, las mareas oceánicas, las mareas terrestres y los cambios en el nivel freático. El factor más importante es el constituido por las precipitaciones, que junto con la evapotranspiración, intervienen en las fluctuaciones cíclicas estacionales. Las variaciones accidentales tienen diversas causas, tales como temblores de tierra, derrumbes, movimientos de tierra, etc.

Las **fluctuaciones artificiales** son provocadas por la acción del hombre. Entre ellas, las más importantes son las modificaciones del nivel freático de las superficies de agua libre (en particular a causa de las presas o embalses) y la explotación intensiva e irracional de los mantos.



La explotación de las reservas de aguas subterráneas, así como la disminución de la alimentación, son las causas principales del rápido descenso del nivel piezométrico. El nivel freático puede ser modificado artificialmente por las presas y por el drenaje, por esta razón todo anteproyecto de gran obra de ingeniería debe incluir un estudio hidrológico sobre la situación actual del agua y su evolución posterior.

En el Valle de Guaymas dado que los volúmenes de extracción de agua subterránea superaron los volúmenes de recarga natural y por retornos de riego, se empezó a observar una evolución de la piezometría, la cual al inicio era paralela a la línea de costa y posteriormente se empezó a transformar en curvas concéntricas o radiales hacia las zonas donde la extracción era muy alta. Debido a esto, el acuífero perdió presión y la dirección de flujo se invirtió, porque al principio era del continente hacia el Mar de Cortés y en la actualidad es del mar hacia el continente. Las líneas de flujo del agua subterránea se mueven en dirección de las zonas en donde se han formado los conos de abatimiento.

Salmón y Cordova (1997), en su trabajo de tesis reportan el comportamiento de las curvas equipotenciales desde el año de **1967 a 1995** porque a partir de ese año es cuando se tiene información más ordenada (archivos de la Comisión Nacional del Agua) acerca de la explotación del acuífero. Los autores citados, recopilaron la información, la analizaron y la presentaron en mapas generados en el paquete computacional "SURFER V. 5.0" para WINDOWS que tiene, entre otras opciones, la de interpolar por diversos métodos, los datos capturados.

En el primer año que reportan (**1967**) mencionan que los niveles estáticos de la mayor parte de la zona estudiada, se encuentran por debajo del nivel medio del mar, a excepción de la zona norte del Valle de Guaymas (es decir la parte alta) donde se presentan las cotas de mayor nivel estático, algunas todavía superiores a los 25 msnm; la línea 0, atraviesa casi en su parte central el Valle de Boca Abierta. En ese año ya aparece la línea equipotencial de -25 msnm; esta depresión marcada se localizó en los ejidos de Maytoarena, Mi Patria es Primero, Cruz de Piedra y San Fernando.

También al Sur del valle se nota que el nivel estático es inferior al nivel del mar, lo que marca el desalojo de agua dulce de dicha región (que posiblemente fue la causa de la futura intrusión de agua de mar en años posteriores). Asimismo mencionan que la elevación más crítica del nivel estático registrada para ese año fue de - 26.45 mbnm y perteneció al pozo 41-M.

Después de ocho años, en **1975** los mismos autores mencionan un abatimiento considerable de los niveles estáticos, detectando en algunas captaciones elevaciones inferiores a los - 40 mbnm. La captación en la cual encontraron el valor más crítico, fue el pozo 40-M con - 42.68 mbnm. Vega y Longhini (1999), mencionan que para 1975 existía un cono de depresión en la región de Maytorena, pero con el valor más crítico encontrado de - 49.925 mbnm.

En su trabajo Salmón y Córdova (1997) describen la tendencia del movimiento de las curvas hacia el Sureste del valle, incrementándose los valores de las curvas, por ejemplo, donde antes se encontraba la línea equipotencial -5 mbnm en el año **1967**, aparece la línea con valor de -10 mbnm en **1975**. Lo mismo sucedió en la zona del Ejido Maytorena donde la curva de -20 mbnm, fue sustituida por la curva de - 40 mbnm en un lapso de ocho años. También describen el comportamiento de los niveles piezométricos para ciertos años; es así como en el año de **1981**, aparece la curva - 50 mbnm; seis años después, en **1987**, las curvas equipotenciales - 55 mbnm y - 60 mbnm hicieron su aparición. En el año de **1990**, citan que la cota - 60 mbnm casi desaparece ya que no encontraron dichos niveles en los sondeos de los pozos que tienen influencia en esa región. Además, en la parte norte, que es la zona de recarga, queda una pequeñísima área con valores piezométricos positivos, quedando casi toda la zona en estudio por debajo del nivel del mar. El cono de depresión todavía permanece en la región del Ejido Maytorena con un valor de la curva de - 55 mbnm.

Los mismos autores, mencionan la presencia de un cono local formado en el pozo 110 para el año de **1995**, puntualizan posibles recuperaciones (por el comportamiento de las curvas - 45 mbnm y - 50 mbnm) o reacomodo del agua

subterránea. Finalmente, nos dicen que el comportamiento en el cambio de posición de las curvas equipotenciales o isopiezas es congruente o lógico, pues el cono de abatimiento se mantiene año con año en las zonas más afectadas.

Corroborando lo dicho por Salmón y Cordova (1997), Vega y Longhini (1999), también mencionan fuertes depresiones para el año de **1995**, con la lectura más crítica de - 54.61 mbnm en el Valle de Guaymas y de - 18.83 mbnm en el Valle de Boca Abierta.

La posición de la curva cero al Norte del Valle de Guaymas ha sido poco afectada, puesto que permanece casi en el mismo sitio que se encontraba en 1967. En el Valle de Boca Abierta, aún se tienen valores piezométricos positivos en una área restringida.

#### **f. Sobreexplotación del acuífero**

Debido a la sobreexplotación de los acuíferos se generan efectos indeseables, entre éstos: el incremento de los consumos de energía, a medida que las profundidades de bombeo son mayores, y en general los equipos y eficiencia de los pozos disminuyen. Lo anterior se demuestra en dos estudios realizados en la Región Lagunera, el primero en 1986 y el segundo en 1991, con los resultados promedio siguientes: se midieron 195 pozos con un nivel de bombeo a 85 m, un caudal de extracción de 33.4 L/s, resultando una eficiencia electromecánica de 44% (Castillo, 1999).

En la actualidad, existen en el Estado de Sonora alrededor de 20 vedas que impiden la extracción sin control del agua subterránea, las cuales cubren más del 50 % de la extensión superficial. Estas se derivan de la necesidad de regular el aprovechamiento del recurso, ante la excesiva extracción que se llegó a realizar y que aún se efectúa en algunas regiones, provocando la sobreexplotación (Castillo et. al., 1999). Los mismos autores consideran que la problemática de los acuíferos en Sonora se puede resumir en tres aspectos: la sobreexplotación, la contaminación y la legalidad.

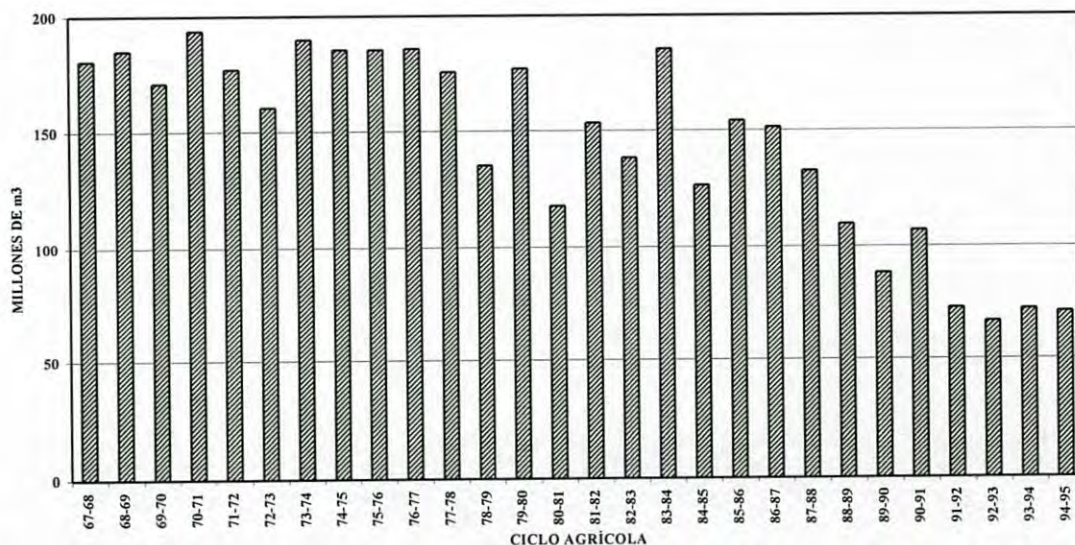


La sobreexplotación observada en los acuíferos de la parte costera de Sonora, por ejemplo el acuífero de Caborca de **1970 a 1990**, presentó un descenso promedio de los niveles piezométricos de 17.7 m; en la Costa de Hermosillo se observó un descenso igualmente fuerte para el mismo período; y en el Valle de Guaymas se reporta un abatimiento que ha alcanzado hasta - 60 mbnm (Castillo et al., 1997).

En este valle, el volumen promedio de extracción es de  $157.5 \text{ Mm}^3/\text{a}$ , principalmente del acuífero superior con la operación de aproximadamente 159 pozos profundos con un gasto promedio de 70 L/s. Si consideramos que el volumen de recarga se estima en  $100 \text{ Mm}^3/\text{a}$  ( $40 \text{ Mm}^3/\text{a}$  por infiltración de aguas usadas en agricultura,  $30 \text{ Mm}^3/\text{a}$  por flujo horizontal,  $20 \text{ Mm}^3/\text{a}$  del acuífero inferior y  $10 \text{ Mm}^3/\text{a}$  de infiltración de agua de lluvia), tenemos un 57.5 % de sobreexplotación (INEGI, 1993 *in* Mayer, 1997).

Córdova y Salmón (1997) muestran una gráfica con los volúmenes de extracción del Valle de Guaymas de 1967 a 1995 (Fig. 3). En esta gráfica se puede apreciar que en Algunos años han extraído mayores volúmenes de agua subterránea respecto a los que entran como recarga, estimados en  $100 \text{ Mm}^3$ . También es conveniente señalar, que los volúmenes mostrados no incluyen  $23.3 \text{ Mm}^3$  de agua potable.

**Fig. 3: Volúmenes extraídos en el Valle de Guaymas**



Sin conocerse la potencialidad del acuífero, a principios de los 50's se inició en el Valle de Guaymas una explotación intensiva, cuyos perjudiciales efectos se reflejaron en un rápido abatimiento de los niveles piezométricos, que en condiciones normales se encontraban varios metros arriba del nivel del mar. Se tiene evidencia de que para 1957, los niveles del agua dulce ya habían descendido abajo del nivel del mar, originando la inversión del gradiente hidráulico y el consecuente avance tierra adentro de agua marina. Este problema generalizó una práctica muy común: la suspensión y relocalización de pozos, provocando la inutilización de unas 8,000 ha entre los años de 1954 y 1957 (Salmón y Cordova, 1997).

Entre las acciones adoptadas por los agricultores del Valle de Guaymas en fechas recientes, se cuenta con la implementación de sistemas de riego presurizado como el goteo y la microaspersión. Otra acción son los programas del Gobierno Federal para mejorar la eficiencia en el uso y manejo del agua de riego. En algunos casos, esta acción de los usuarios agrava el problema de la sobreexplotación, ya que extraen mayores volúmenes de agua que los de recarga, al hacer más eficientes sus equipos de bombeo.

Otra medida es la de reducir el área regada, para lo cual se requiere cambiar el tipo de cultivo, de manera que en el área reducida se tenga de preferencia un mejor ingreso. Esto se ha conseguido en los Valles de Caborca y Guaymas, con buenos resultados. En Guaymas, por ejemplo, hace 20 años se cosechaban alrededor de 23,000 ha, extrayendo un volumen de 186 Mm<sup>3</sup>, actualmente se cosechan solamente 13,000 ha, utilizando un volumen alrededor de 100 Mm<sup>3</sup>, pero con una mayor utilidad que la obtenida en los años setenta. En realidad la productividad de la tierra aumentó 2.56 veces, ya que en 1977 el 85 % eran cultivos anuales y actualmente, la mitad del área cosechada son frutales y hortalizas.

En general, se concluye que el mantenimiento de prácticas de extracción similares a las actuales en la producción agrícola, conducen a la inviabilidad económica de la agricultura regional.



### **g. Calidad del agua**

El agua subterránea contiene varios iones en solución, siendo los más comúnmente analizados:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$ , ya que con ellos se pueden definir familias de aguas. Si estos iones se encuentran excediendo los límites máximos permitidos para los diversos usos, se puede considerar que el agua está contaminada. Deben reconocerse dos tipos de contaminación: la natural y la antropogénica (generada por actividades humanas). Toda la información hidrológica, debe integrarse en modelos matemáticos y computacionales, que permitan predecir el flujo de agua, el transporte y difusión de material que afecta la calidad del agua (Vega, 1992).

En el Valle de Guaymas se han realizado varios estudios tratando de explicar la evolución de la calidad del agua subterránea así como el avance del frente salino, varios de ellos utilizaron las Clasificaciones de Piper-Hill-Langelier, Wilcox y Stiff para reconocer zonas y familias de agua. También se han utilizado iones trazadores como el yodo, boro, bromo, entre otros, porque se encuentran en cantidades considerables en las salmueras y aguas muy mineralizadas, constituyéndose por ello en indicadores seguros de agua de mar. Aquí se presentan resúmenes breves de dichos estudios tratando de mostrar la evolución de la calidad del agua a través del tiempo.

En el estudio hidrogeológico realizado por Ariel Construcciones, S.A. en 1968, se muestran valores de cloruros para ese mismo año que van desde 35.5 ppm al Oriente del Valle de Guaymas (aguas procedentes del Noreste de la región que pasan por los ejidos: Adolfo de la Huerta, Francisco Márquez, Triunfo Santa Rosa y Úrsulo Galván), hasta 71 y 106.5 ppm hacia el Poniente del valle. Hacia el Sur de la zona en estudio, se observan las curvas con valor de 1,065 y 1,775 ppm, que indican la presencia de agua de mar. Mencionan al pozo 44 con contenido de 8,380 ppm al Sur del valle, que evidencia la intrusión salina.



Según Vega y Castillo (1998) para el año de **1975** se reporta que la concentración de cloruros para el Sur del valle, ya excedía los límites máximos permitidos para el agua de riego (hasta 800 ppm Cl), lo que motivó la relocalización de pozos alejándolos de la costa y el cambio en el patrón de cultivos. También mencionan que las aguas bicarbonatadas dominaban con respecto a las cloruradas-sulfatadas. Los mismos autores señalan que 21 años después, en 1996, las aguas cambiaron de composición tornándose cloruradas-sulfatadas en su mayoría.

Vega y Longhini (1999) revisando los análisis químicos de agua realizados por la CNA en **1975**, encontraron una concentración máxima de 2,043 ppm Cl, ubicando el aprovechamiento hacia la línea de costa. Además, señalan que el agua de mala calidad para uso agrícola había llegado al Poblado de Maytoarena (aproximadamente a 17 Km hacia el Norte de la costa). En lo que respecta a los sólidos totales disueltos (STD) para el año en mención, la concentración máxima encontrada fue de 3,840 ppm.

Para el año de **1980** la Secretaría de Programación y Presupuesto, a través del INEGI muestra en sus Cartas Hidrológicas de Aguas Subterráneas, H12-11 y G12-2, Escala 1:250,000 una concentración máxima de cloruros para el Valle de Boca Abierta de 134.9 mg/L, con un máximo para los sólidos totales disueltos de 500 mg/L. En lo referente a la calidad de agua para riego se encontró que todas las muestras resultaron con una conductividad media y bajas en sodio (C2-S1), además de que son reportadas como aguas agresivas e incrustantes.

En dichas cartas hidrológicas, se muestra que en la parte central y baja del valle se encuentran las concentraciones máximas de cloruros y STD de 647.9 mg/L y 1,210 mg/L respectivamente. También se observa que la mayoría de las aguas tienen salinidad media y son bajas en sodio (C2-S1), aunque aparecen varios pozos con aguas altamente salinas y bajas en sodio (C3-S1). La mayor parte de las muestras son clasificadas como aguas agresivas. En base a los análisis químicos efectuados a las muestras de agua colectadas, determinaron que hacia la porción occidental del Valle de Guaymas, se

ubican las familias sódica bicarbonatada-clorurada y hacia la porción central, es calcosódica bicarbonatada-clorurada.

En la parte alta del valle los valores máximos encontrados fueron 234.3 mg/L y 567 mg/L de cloruros y STD respectivamente, con calidades de agua para riego, en su mayoría de conductividad media y sodio bajo (C2-S1), pero también encontrando muestras con conductividad alta y sodio de medio a alto (C3-S2 y C3-S3). Las muestras de esta zona en un 70% tienen comportamiento de aguas agresivas.

Vega et. al. (1996) utilizaron la Clasificación de Piper-Hill-Langelier en el Valle de Guaymas y encontraron para el año de **1983** las 5 familias de agua siguientes, observando una sección de Sur (mar) a Norte (continente): clorurada cálcico-magnésica (Ca-Mg Cl), sulfatada-clorurada sódica (Na SO<sub>4</sub>-Cl), bicarbonatada sódica (Na HCO<sub>3</sub>), de nuevo sulfatada-clorurada sódica (Na SO<sub>4</sub>-Cl) y bicarbonatada cálcico-magnésica (Ca-Mg HCO<sub>3</sub>). De cada familia escogieron 3 pozos representativos, ubicados al poniente, centro y oriente del valle y graficaron su calidad de agua en diagramas columnares. Analizaron los resultados y observaron que para 1983, los pozos ubicados hacia la porción occidental del valle (zona más explotada) extrajeron aguas con concentraciones de iones más altas que las extraídas de los pozos ubicados en la porción oriental del área (zona menos explotada).

Los mismos autores utilizando la Clasificación de Wilcox, reconocieron 3 zonas de familias de agua (denominadas I, II y III) convenientes para uso agrícola, todas con bajo contenido de sodio. Para ello se calculó la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) con las concentraciones de los cationes Na, Ca y Mg (miliequivalentes por litro) y se graficó este valor contra la conductividad eléctrica (micromhos por milímetro) en un diagrama rectangular. La Zona I (aguas clasificadas como C3-S1, C4-S1, C4-S2) presenta en general conductividades eléctricas (CE) de altas a muy altas, con bajo contenido de sodio. Es paralela a la línea de costa. Es agua altamente salina y no puede usarse en suelos con drenaje deficiente. Puede ser usada solamente para plantas, bastante tolerantes a sales, como palmas datileras, betabel, algunos zacates, etcétera. La Zona II

(C3-S1, C3-S2, C2-S1, C2-S2) muestra un patrón que sigue el antiguo cauce del Río Mátape, pasando por los Poblados de La Misa y Lázaro Cárdenas hasta Maytorena. Presenta CE de media a alta y contenido de sodio de bajo a medio. Estas aguas no pueden usarse en suelos con drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado, se requiere un tratamiento especial para el control de la salinidad y pueden usarse solamente para plantas bastante tolerantes a las sales. La Zona III (C2-S1) se ubica en la parte central del valle. Sus aguas se caracterizan por CE medias y bajo contenido de sodio. Estas aguas pueden usarse si se hacen lavados moderados. Permiten el cultivo de plantas moderadamente tolerantes a las sales en la mayoría de los casos, sin efectuar prácticas especiales para el control de la salinidad.

En general, la porción occidental contiene aguas con CE de altas a muy altas, debido a que el antiguo paso del río por esta zona debió haber aportado más sólidos a las aguas subterráneas que hoy se extraen mediante pozos profundos. Esta conclusión puede aplicarse a los resultados obtenidos con la Clasificación de Piper-Hill-Langelier.

Para reconocer la variación de la calidad del agua, tanto en el espacio como en el tiempo, los mismos autores escogieron pozos a lo largo de una sección longitudinal y compararon datos de análisis químicos efectuados durante 1984 a 1994. Para determinar las variaciones relativas al Cl calcularon el índice Cl/Ca+Mg para el agua de cada pozo en los diferentes años. Para seguir la evolución del agua en el acuífero también calcularon el índice Na/Ca+Mg. Encontraron que con excepción de una muestra las variaciones de la calidad del agua a través del espacio obedecen siempre al mismo patrón general: las muestras ubicadas cerca de la costa (Empalme) mostraron concentraciones de iones más altas que las ubicadas hacia el Norte del valle. A través del tiempo (de 1984 a 1994), la concentración de las aguas subterráneas aumentó, habiéndose encontrado una concentración máxima total de 72 meq/L en 1984, contra 112.6 meq/L en 1995.

Los índices Cl/HCO<sub>3</sub> calculados muestran un incremento de 1984 a 1994, lo que les indicó un avance hacia el norte del frente salino.



Vega y Longhini (1999) al revisar los archivos de calidad de agua de la CNA para el año de **1995**, encontraron concentraciones máximas de 1,656 ppm Cl y de 5,760 ppm STD. En los mapas de cloruros que elaboraron se muestra la línea de los 150 ppm (límite máximo permitido para agua de uso agrícola) con una dirección N-S al Norte del valle, girando hacia el Sureste, y atravesando la Sierra San Francisquito en su parte central. También señalan que en el Valle de Boca Abierta, aún se tiene agua de buena calidad para la agricultura. Es de este valle ubicado en la porción oriental del Valle de Guaymas, de donde actualmente se están surtiendo de agua potable las ciudades de Guaymas y Empalme.

Los investigadores Vega y Castillo (1998) determinaron que para el año de **1996** se observa un avance del frente salino del SE al NE, siendo más intenso hacia el poniente del valle (más de 3,000 ppm Cl). Prácticamente toda la franja costera está inutilizada por agua de mar (15 Km tierra adentro).

#### **h. El fenómeno de la intrusión salina**

En el Valle de Guaymas, el avance de la intrusión salina se debe principalmente a la exagerada explotación del agua subterránea que los usuarios han realizado. La sobreexplotación de agua dulce en el valle ha provocado además de los descensos extremos de los niveles del agua (niveles estáticos de -55 msnm), que se rompa el equilibrio de la interfase, moviéndose hacia el continente y permitiendo la entrada del agua de mar o "intrusión salina". Esta agua salada ha inutilizado la mayoría de los pozos ubicados cerca de la costa, dentro de una franja de alrededor de 20 km de ancho. Por supuesto los daños causados al almacenamiento del acuífero y a las actividades que derivan de su explotación, son irreversibles.

Durante **1975**, la Compañía Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. realizó un trabajo sobre un modelo matemático de intrusión salina en del Valle de Guaymas, Sonora. Adaptaron un modelo de Pinder y Gray a las condiciones geohidrológicas y geoquímicas del valle, para régimen transitorio del efecto de difusión y dispersión del agua salada y para régimen establecido del movimiento del agua en el

acuífero. Se procesaron 4 alternativas de extracción de las que resultó para estos autores, que para **1985** se presentarían condiciones piezométricas muy similares en una franja de 10 km de ancho, propiciando el mismo transporte de agua salada de mar tanto si se mantuviera la misma extracción del ciclo agrícola **1974-1975** durante 10 años, que si se suspendiera la extracción en todo el valle. Al Norte de la zona de extracción, la velocidad de la invasión marina está gobernada por la profundidad y presencia de la depresión piezométrica central del acuífero. No recomiendan perforar pozos de más de 300 m de profundidad en el valle, ya que aumenta la probabilidad de encontrar mantos salados. También que se deberán localizar las nuevas perforaciones de pozos lejos de la línea de costa para garantizarles una vida útil mayor de 25 años. Para el año **2010** estimaron que la salinidad habrá avanzado hasta 20 km de la costa (más al Norte del Ejido Maytorena). Respecto a las características hidrogeoquímicas, los mismos autores señalan a la intrusión de agua de mar, como la causa principal del deterioro de la calidad del agua subterránea de la región. Para definir el avance del frente salino, usaron configuraciones de STD y cloruros. Entre **1973** y **1983** encontraron un avance de 2 km de la curva de 2000 mg/L Cl en la porción oriental del valle y de 5 km en la porción occidental.

Para el año de **1989**, Rodríguez y Pérez (1991), muestran en su plano del Valle de Guaymas la concentración de STD con valores que varían de 307 hasta 8,000 ppm correspondiendo este último valor a las áreas cercanas a la costa. Los pozos que presentaron las mayores concentraciones fueron: el 60, 66, 78, 82, 34-CP, 29 y 34, con valores que fluctúan entre las 3,000 y 8,500 ppm.

Las mismas autoras, en su plano de evolución de STD correspondiente al período **1986-1989**, observan el aumento en la concentración de STD en un área bien definida ubicada al Sur de Maytorena, y señalan un avance de 2 km en este período tan corto, de la curva 4,000 ppm STD al centro del valle.

Entre las medidas de control de la intrusión salina se mencionan en la bibliografía: la reducción de las extracciones, la inducción de recarga artificial, la



construcción de fronteras impermeables, y la instalación de barreras con pozos de bombeo y/o barreras con pozos de inyección (Vega y Longhini, 1999).



## MATERIAL Y METODOS

El presente trabajo de tesis forma parte de un proyecto de investigación financiado por el CONACYT intitulado: *“Desarrollo de un modelo matemático para determinar el avance de la intrusión salina en el Valle de Guaymas, Sonora”* en el cual participan maestros y alumnos de la Universidad de Sonora.

### 1. Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio consiste en un rectángulo comprendido entre las coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) de la zona 12: 520,000 m E a 550,000 m E y 3,080,000 m N a 3,124,000 m N.

El Valle de Guaymas o Distrito de Riego 84, es parte de la Región Hidrológica RH-9 denominada Sonora Sur y constituye la parte baja de la Cuenca del Río Mátape; se halla limitado al Norte por la Sierra de San Antonio, al Sur por el Golfo de California, al Este por la Sierra del Bacatete y al Oeste por la Sierra de Santa Ursula y El Pozo.

### 2. Material

En gabinete, se utilizaron las siguientes cartas del I.N.E.G.I. editadas en diferentes años: geológicas (Escala 1:250,000), topográficas (Escala 1:50,000), hidrológicas superficial y subterránea (Escala 1:250,000), para conocer las características del acuífero. La investigación bibliográfica incluyó datos de los archivos internos de la Comisión Nacional del Agua publicados en tesis, así como la consulta de trabajos profesionales elaborados para la propia comisión.

Como parte del trabajo de campo del proyecto de investigación, se participó en un estudio geofísico que aún no concluye. Para ello se empleó equipo de geofísica tal como magnetómetro, para conocer la profundidad del acuífero y resistividad eléctrica

para determinar las características de los diferentes estratos geológicos y calidad del agua del subsuelo.

El muestreo hidrogeoquímico se realizó durante 1997 y 1998. Primeramente, se seleccionaron los pozos a muestrear y se acudió al terreno a tomar las muestras de las descargas de los pozos, para ello se utilizaron botellas de plástico de 1 L de capacidad, con tapadera, las que fueron etiquetadas y trasladadas de inmediato al laboratorio. Los análisis químicos fueron realizados en el Laboratorio de Agua del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora. En el sitio de muestreo, se utilizaron: potenciómetro para medir el pH; conductímetro para medir la conductividad eléctrica del agua; termómetro para medir la temperatura del agua en el momento de la toma de la muestra, así como un Sistema de Posicionamiento Geográfico (GPS) utilizado para la localización geográfica de pozos y puntos importantes del Valle de Guaymas.

Dentro de los recorridos de campo, se participó en los años de 1997 y 1998, en las mediciones de niveles estáticos que la Comisión Nacional del Agua realiza durante el paro que cada año decreta a los agricultores, en el cuál deberán suspender el bombeo durante una semana, para que el acuífero se estabilice y la medición sea confiable. Para ello, se acompañó al personal de esa dependencia utilizando sondas eléctricas en las mediciones.

Para el tratamiento y análisis de los datos colectados, se usaron los paquetes computacionales: SURFER, EXCEL, WORD y AutoCAD.

### **3. Metodología**

La metodología utilizada incluyó la revisión exhaustiva de la información generada por la Comisión Nacional del Agua (CNA), sobre la hidrogeología y la calidad del agua de los últimos treinta años (1967-1998) del acuífero del Valle de Guaymas, localización de pozos en cartas topográficas y verificación de su ubicación en cada año

de estudio; revisión de la piezometría o los niveles de agua de cada pozo en los diferentes años a estudiar; de la elevación de los brocales de los pozos con respecto al nivel medio del mar; características físicas y químicas del agua, etc.

Durante los años de 1997 y 1998, se realizó trabajo de campo en el Valle de Guaymas consistente en: a) mediciones geofísicas, b) muestreo de agua subterránea para su posterior análisis físico-químico, c) sondeos para determinar la posición de los niveles estáticos y d) censo y posicionamiento de los aprovechamientos.

Toda la información generada, se capturó en hojas de trabajo de los programas EXCEL y SURFER, después se analizó para eliminar posibles errores. Los datos se plotearon en el programa SURFER y una vez que se determinó que los planos no tenían errores, se pasaron al programa AutoCAD para darles una mejor presentación. El texto fue tratado en WORD.



## RESULTADOS

### 1. Evolución de la calidad del agua

En este trabajo se decidió utilizar al ion Cloruro y a los Sólidos Totales Disueltos (STD) como indicadores de la presencia de agua de mar en la zona continental de agua dulce. Se tomaron los datos de análisis químicos realizados por la CNA durante los años de 1975, 1990, 1995 y 1996. El primer año se tomó como punto de partida para comparar el avance de la intrusión salina alrededor de 20 años después.

Los planos de 1997 y 1998 se realizaron con resultados obtenidos de muestreo de agua subterránea para el presente trabajo de tesis. Los fondos para el trabajo de campo y de laboratorio fueron aportados por el CONACYT a través de un proyecto de investigación que llevan a cabo los Departamentos de Agricultura y Ganadería y de Geología de la Universidad de Sonora, en conjunto con la Universidad Tecnológica de Michigan.

En general, los cloruros pueden provenir de la disolución de las rocas y suelos. Se encuentran en grandes cantidades en antiguas salmueras, evaporitas y aguas de mar. También pueden proceder de actividades humanas como desagües y desechos industriales. Grandes concentraciones de este elemento aumentan el poder corrosivo del agua y en combinación con el sodio, da un sabor salado al líquido.

Los sólidos totales disueltos (STD) pueden ser determinados al evaporar un volumen conocido de muestra y pesar el residuo. Los STD se estiman sumando las concentraciones de los iones individuales. Este método no toma en cuenta los sólidos disueltos de iones no reportados en los análisis o de otras sustancias disueltas (ejemplo, sílice disuelto).

La concentración media de los cloruros en el agua de mar es de 18,980 ppm y de STD de 34,481 ppm. Los límites máximos permitidos de dichos elementos de acuerdo a su uso, se muestran en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.- Límites máximos permitidos para cloruros y STD.**

| Elemento | Potable | Agrícola | Pecuario | Recreativo |
|----------|---------|----------|----------|------------|
| Cl       | 250     | 147.5    | 250      | 250        |
| STD      | 500     | 500      | 500      | 500        |

Fuente: CNA, *in* Ríos, J y R. Ferrer, 2000.

Según la Clasificación de Aguas Nacionales respecto al contenido de Sólidos Totales Disueltos (STD) las clases de agua se muestran en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.- Clases de agua de acuerdo a STD**

| Clase    | STD (ppm)        |
|----------|------------------|
| Dulce    | 0 – 1,000        |
| Salobre  | 1,000 – 10,000   |
| Salina   | 10,000 – 100,000 |
| Salmuera | > 100,000        |

Para este capítulo se elaboraron en el Programa Surfer, mapas de los diferentes años haciendo notar con línea de mayor grosor, el límite máximo permitido (ppm) para uso agrícola del elemento en cuestión. Las descripciones siguientes corresponden a dichos mapas.

#### **a. Calidad del agua para el año 1975**

### **CLORUROS**

El plano elaborado muestra para este año que la curva que determina los límites máximos permitidos para uso agrícola de 150 ppm, había avanzado mas allá de los

Ejidos Cruz de Piedra y San Fernando de Guaymas alrededor de 15 km al Norte de la línea de costa. Dicha curva se encontraba muy cercana a los Ejidos Maytorena y Mi Patria es Primero; en la zona norte del área de estudio, los valores son menores a los 150 ppm lo que significa agua de buena calidad respecto a cloruros. El máximo valor de este elemento para 1975, lo reportó el pozo 55 con 1340 ppm. La entrada de agua salada tiene forma de lengüeta y una dirección invertida de flujo del SW hacia el NE, llegando al Sur del Ejido Maytorena para luego devolverse hacia la línea de costa. Esto se debe a que el pozo 6-SJG tenía una concentración de 145 ppm Cl (baja en relación a los pozos aledaños) lo que hace que la curva de las 150 ppm se devuelva hacia el sur (Fig. 4).

## **STD**

En cuanto a los STD, se puede apreciar en el plano elaborado, que la curva de las 500 ppm atraviesa el Valle de Guaymas de NW a SE hasta el Valle de Boca Abierta, pasando al norte de los Ejidos San Fernando de Guaymas, Cruz de Piedra y Maytorena considerándose toda esta zona como no apta para la agricultura, debido a que se excede el límite máximo permitido para STD. En este mapa se pueden observar zonas concéntricas con valores de STD mayores a las 1000 ppm (agua salobre) en la cota 3'100 000 m N o al sur del Ejido Mi Patria es Primero (Fig. 5).

### **b. Calidad del agua para el año 1990**

## **CLORUROS**

Para este año, la curva 150 ppm se ubicaba al Norte del Ejido Mi Patria es Primero y al Sur de Maytorena, observándose una tendencia todavía NE-SW. Sin embargo esta línea ya no se devuelve hacia la línea de costa como en 1975, debido a que el pozo 6-SJG reporta valores muy altos de cloruros de 997 ppm. El flujo de agua subterránea presenta forma de lengüeta moviéndose del SW hacia el NE, con conos concéntricos hasta de 3000 ppm (Fig. 6).



## **STD**

En el mapa de 1990 se notan diferencias respecto al de 1975. Una de ellas es que los ejidos Santa María de Guaymas y José María Morelos y Pavón, antes con agua de buena calidad, presentan aguas contaminadas por STD o dentro de la curva de las 500 ppm. Asimismo, en el Valle de Boca Abierta, se nota un avance hacia el norte de dicha curva, lo que indica un avance de la intrusión salina en ese sentido. Otra diferencia significativa es que en el plano de 1990 se forman patrones concéntricos con valores mayores a las 6000 ppm STD reportados por los pozos 32 y 34 que de 1920 y 960 ppm STD en 1975 pasan a 6400 y 7360 ppm STD en 1990 respectivamente. La mejor calidad del agua se encuentra en la parte este y norte de la zona de estudio (Fig. 7).

### **c. Calidad del agua para el año 1995**

## **CLORUROS**

En este plano no se aprecia gran diferencia con respecto al del año 1990, sin embargo la curva 150 ppm se continúa hacia el norte de Maytorena. La misma curva muestra un avance de unos 5 km hacia el Norte en el Valle de Boca Abierta. Al Norte del Ejido San Fernando de Guaymas persisten patrones concéntricos pero con concentraciones mayores de cloruros, respecto a las de 1990, llegando hasta las 5000 ppm. El agua de mejor calidad se encuentra en la parte este y noreste de la zona de estudio, en los Ejidos Francisco Márquez, Antonio Rosales y Junelancahui por mencionar algunos (Fig. 8).

## **STD**

El plano elaborado para este año muestra diferencias significativas con el de 1990. La línea de las 500 ppm STD se mueve hacia el centro del valle partiendo del Ejido Mi Patria es Primero en línea recta hacia el Norte, afectando con agua de mala calidad respecto a STD, a toda la porción oeste y sur del área de estudio. Otros puntos con valores altos de STD se presentan cercanos a los Ejidos Junelancahui y Antonio Rosales. Las aguas se tornan más concentradas para este año, llegando a valores superiores a las 10500 ppm STD y su movimiento subterráneo es de SW a NE (Fig. 9).

#### **d. Calidad del agua para el año 1997**

Los planos elaborados para 1997 y 1998 se hicieron con los resultados de los análisis químicos efectuados para la presente tesis. Los análisis físico-químicos fueron realizados por el Laboratorio del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora, con financiamiento del CONACYT.

##### **CLORUROS**

Este plano también muestra que en la parte oeste y noroeste de la zona de estudio, se encuentra arriba de los límites máximos permitidos para cualquier uso, ya sea agrícola, pecuario, humano y recreativo. Entre los Ejidos Santa María de Guaymas, Triunfo Santa Rosa y Antonio Rosales, se encuentra una curva cerrada con valor de 150 ppm. La mayor concentración de cloruros reportada para este año fue de 4600 ppm que corresponde a aguas peligrosas para uso agrícola (Fig. 10).

##### **STD**

Para este año, también se muestra la parte noroeste en su totalidad como aguas de mala calidad, la isolínea 500 ppm STD tiene el mismo comportamiento que en los años anteriormente analizados, pero en la parte alta de la zona de estudio la curva da un giro hacia el Noreste, en dirección del Ejido Guadalupe Victoria. En este año, las aguas de mejor calidad en lo referente a STD se encuentran en la parte noreste de la zona de estudio, en las inmediaciones de los Ejidos Junelancahui, Antonio Rosales, Triunfo Santa Rosa y Francisco Márquez. Las muestras analizadas se encontraron valores superiores a las 8,700 ppm STD o aguas salobres (Fig. 11).

#### **e. Calidad del agua para el año 1998**

##### **CLORUROS**

En este plano se aprecia que la isolínea 150 ppm Cl tuvo un avance hacia el Norte con referencia a la del año anterior, pero en general, es el mismo comportamiento. Sin embargo en el Valle de Boca Abierta la isolínea 150 tiene un movimiento de unos 10 km hacia el Norte evidenciando el avance salino en esa zona. Los Ejidos Junelancahui,

Antonio Rosales, Triunfo Santa Rosa, Francisco Márquez, Santa María de Guaymas y Guadalupe Victoria, siguen reportando aguas de buena calidad; en las muestras analizadas en este año el valor más alto fue superior a 4,100 ppm que corresponde a aguas peligrosas para las plantas por su alto contenido de cloruros (Fig. 12).

## **STD**

En este año, y debido a la distribución y escasez de las muestras, la curva 500 ppm STD retrocede hacia la parte noroeste de la zona de estudio y avanza hacia el Norte en el Valle de Boca Abierta hasta la cota 3'100 000 m N. Las aguas con la mejor calidad se encuentran en los alrededores de los ejidos arriba mencionados; en estas muestras se encontraron concentraciones mayores a las 8,200 ppm STD correspondientes a aguas salobres según la clasificación citada (Fig. 13).

## **2. Sobreexplotación en el Valle de Guaymas**

En la década de los cincuentas, inicia la explotación del acuífero en el Valle de Guaymas, observándose que las líneas equipotenciales tenían una orientación mas o menos paralela a la línea de costa y por lo tanto, las líneas de flujo de agua subterránea estaban orientadas en forma perpendicular a la costa y con dirección casi de Norte a Sur (del continente hacia el mar); pero debido al gran número de pozos que fueron perforados a mediados de los 50's y a las extracciones que se realizaron, superiores a la recarga , las líneas de flujo tuvieron un rápido cambio de dirección al invertirse el gradiente hidráulico.

### **a. Piezometría en el año 1950**

Como se mencionó anteriormente y como puede notarse en el plano elaborado para este año, las líneas equipotenciales tenían valores positivos, o sea, por arriba del nivel medio del mar. Para este año, se tiene la curva 25 msnm en la parte alta del valle, pero se reportan valores hasta de 28 msnm en la zona de estudio.



En los Ejidos San Fernando de Guaymas y Cruz de Piedra, cercanos a la costa, los valores piezométricos oscilaban alrededor de 4 msnm; en los Ejidos Maytorena, Mi Patria es Primero, Úrsulo Galván, José María Morelos y Junelancahui, que están ubicados en la parte central del valle, la piezometría se encontraba entre los 12 y los 17 msnm; en la zona norte del valle donde se ubican los Ejidos Santa María de Guaymas, Triunfo Santa Rosa, Antonio Rosales, Francisco Márquez y Guadalupe Victoria, los niveles piezométricos estaban entre los 19 y 26 msnm.

Para este año no se reportaron niveles piezométricos con valor negativo tanto para el Valle de Guaymas como para el Valle de Boca Abierta (Fig. 14).

#### **b. Piezometría en el año 1970**

Veinte años después, podemos apreciar que las curvas equipotenciales se cierran al centro del valle, en los Ejidos Maytorena, Mi Patria Es Primero, Úrsulo Galván y José Ma. Morelos, debido al cono de abatimiento formado por las elevadas extracciones, dado el gran número de pozos ubicados en esta zona donde se muestra la curva piezométrica con valor de -25 mbnm; en los ejidos más cercanos a la costa, tales como el Cruz de Piedra y San Fernando de Guaymas presentan valores negativos que fluctúan entre los -8 y -14 mbnm. Lo bueno para este año, es que en la parte alta de la zona de estudio se pueden apreciar valores piezométricos positivos, observándose la isolínea 20 msnm en una pequeña parte hacia el Noroeste. Se puede observar que la curva 0 (que corresponde al nivel medio del mar) situada a 15 km al Norte de la línea de costa en el Valle de Boca Abierta, sube en dirección del Ejido Junelancahui, da un giro en dirección noroeste, pasa entre los ejidos Antonio Rosales y Triunfo Santa Rosa, continúa y finaliza al Oeste de la zona de estudio, en la cota 3'115,000m N.

Los valores más críticos registrados para este año fueron de pozos pertenecientes al Ejido Maytorena (Fig. 15).

### **c. Piezometría en el año 1975**

Los Ejidos Cruz de Piedra y San Fernando de Guaymas han sido alcanzados por las isolíneas  $-10$  y  $-15$  mbnm respectivamente; el cono de abatimiento formado entre los Ejidos Maytorena, Mi Patria es Primero, Úrsulo Galván y José María Morelos ha superado los  $-40$  mbnm. Al Este del valle, en el Ejido Junelancahui, el nivel estático que en 1970 se encontraba por arriba del nivel del mar, para 1975 se observa alrededor de  $-5$  mbnm. Los Ejidos Santa María de Guaymas y Triunfo Santa Rosa, en este año se encuentran sobre la curva  $-20$  mbnm y  $-7$  mbnm respectivamente. Al Noreste de la zona de estudio donde se localiza el Ejido Guadalupe Victoria, se observan valores positivos de 5 msnm, casi 10 m menos que 5 años atrás. Las curvas de mayor valor se localizan al Noroeste del valle, donde todavía se aprecia la curva 20 msnm, lo que puede deberse a recarga por esa zona o a una menor extracción por bombeo (Fig.16).

### **d. Piezometría en el año 1990**

Para este año, el cono de abatimiento formado entre los Ejidos Maytorena, Mi Patria es Primero, Úrsulo Galván y José María Morelos, las curvas equipotenciales se encontraban entre  $-40$  y  $-55$  mbnm, llegando incluso a registrarse valores mayores a los  $-55$  mbnm. En los Ejidos Cruz de Piedra y San Fernando de Guaymas (más cercanos a la costa), los valores piezométricos fluctuaban entre los  $-14$  y  $-20$  mbnm. También los Ejidos Junelancahui y Antonio Rosales al Este del valle presentaron valores muy similares. Al Norte de los Ejidos Triunfo Santa Rosa y Santa María de Guaymas, se presentan variaciones muy drásticas en los valores de las curvas, que varían de  $-45$  mbnm hasta 5 msnm en una corta distancia, probablemente a causa del gran número de pozos presentes en esta zona y a las elevadas extracciones que los mismos realizan, aunado tal vez a bajos valores de transmisividad. En este año se observa la presencia de las curvas 0 y 5 msnm al Noreste de la zona de estudio en las inmediaciones del Ejido Guadalupe Victoria (Fig. 17).

#### **e. Piezometría en el año 1995**

En el Ejido Cruz de Piedra se presentan valores piezométricos semejantes a los de 1990, pero no así para el Ejido San Fernando de Guaymas, donde hubo una recuperación y el valor fue más o menos de  $-16$  mbnm. Aunque haya habido una recuperación, ésta no fue de agua dulce, sino de agua que emigró del mar al continente tratando de equilibrar o llenar los conos de abatimiento formados por la sobreexplotación. La depresión en los Ejidos Maytorena, Úrsulo Galván, y José María Morelos todavía permanece, pero ya no se tiene la isolínea  $-55$  mbnm como en 1990 y el área de la curva  $-50$  mbnm ha disminuido. El Ejido Antonio Rosales que 5 años atrás era atravesado por la isolínea  $-20$  mbnm, para este año ya había sido alcanzado por la curva  $-30$  mbnm. En el Ejido Guadalupe Victoria el valor piezométrico es similar al del año 1990. La curva con valor de  $5$  msnm al Norte de la zona de estudio, decrece su longitud notablemente en 1995 (Fig. 18).

#### **f. Piezometría en el año 1998**

Para el año de 1998, las curvas equipotenciales presentaron el siguiente comportamiento: en los Ejidos Cruz de Piedra y San Fernando de Guaymas el valor piezométrico es prácticamente igual al del año 1995; el comportamiento de las curvas en el centro de la zona de estudio conformada por los Ejidos Maytorena, José María Morelos, Úrsulo Galván, Mi Patria es Primero, Santa María de Guaymas y Triunfo Santa Rosa, es prácticamente el mismo que el observado en el año 1995; en los Ejidos Junelancahui y Antonio Rosales los valores van desde  $-16$  mbnm hasta  $-31$  mbnm. En el Ejido Guadalupe Victoria, que en el año 1995 era atravesado por una isolínea con un valor del nivel estático de  $-1$  mbnm, para el año 1998 fue de  $-6$  mbnm. En este año siguen apareciendo las curvas  $0$  y  $5$  msnm en la porción norte del área estudiada (Fig. 19).



## CONCLUSIONES

1. La explotación intensiva del agua subterránea en México y en Sonora se inicia a partir de 1950 con la creación de los Distritos de Riego del país
2. La mayoría de los acuíferos costeros de Sonora, están sobreexplotados, lo que ha producido drásticos descensos de los niveles estáticos y la consecuente entrada de agua de mar al continente, esto ocurre en los valles de Caborca, Costa de Hermosillo y Guaymas
3. Respecto a la calidad del agua subterránea del Valle de Guaymas, se observa de 1975 a 1998 un gran avance de la contaminación por cloruros y sólidos totales disueltos, que comprende la porción sur y centro-oeste del valle, inutilizando esta agua para la agricultura
4. La piezometría del valle muestra de 1950 a 1998 grandes cambios en los gradientes hidráulicos, los cuales eran positivos para 1950 con dirección de flujo de NE a SW, invirtiéndose para 1998, formando un cono de depresión en la zona de Maytorena hacia donde confluye el agua, con valores de niveles estáticos hasta de - 60 mbnm
5. A pesar de que los agricultores de la zona han reducido el bombeo en forma dramática, no se ha podido evitar la intrusión salina. Otras medidas también se han adoptado, como: relocalización de pozos, implementación de riego presurizado, reducción del área regada y eficientización de los equipos de bombeo
6. En general, se concluye que el mantenimiento de prácticas de extracción similares a las actuales en la producción agrícola, conducen a la inviabilidad económica de la agricultura regional.

RIS TEY80

## **Recomendaciones**

1. Se recomienda conocer mejor los parámetros geohidrológicos, calcular la recarga natural al acuífero y realizar un balance de agua subterránea
2. Considerar los métodos para controlar la intrusión salina. Uno pudiera ser instalar una batería de pozos de extracción a lo largo de la línea de costa, con el fin de interceptar una parte del agua salada que se mueve hacia tierra adentro
3. Otra sugerencia sería sustituir cultivos no redituables por otros de alto valor económico

## BIBLIOGRAFÍA

- Arámbula, D. A. y J. C. Palomino. 1991. Panorama geohidrológico del Estado de Sonora. Universidad de Sonora. Departamento de Geología. Hermosillo, Sonora, México. p. 103. (Tesis Profesional).
- Ariel Construcciones S.A. 1968. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos del Valle de Guaymas, Sonora. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D.F. p 93.
- Borgo, V. G. 1998. El modelo matemático SHARP para el estudio de la intrusión salina en el acuífero del Valle de Guaymas, Sonora, México. Universidad de Sonora. Departamento de Matemáticas. Hermosillo, Sonora, México. p. 88 (Tesis Profesional).
- Castillo, G. J. 1997. Acuíferos de Sonora. *In* memorias del primer seminario de acuíferos costeros de Sonora. Hermosillo, Sonora, México. Ed. Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. pp. 1-9.
- Castillo, G. J., M. A. Ríos y A. Gutiérrez. 1999. La sobreexplotación de los acuíferos costeros en Sonora. *In* memorias del tercer seminario de acuíferos costeros. Hermosillo, Sonora, México. Ed. Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. pp. 14 - 26.
- CNA. 1990. Actualización del estudio geohidrológico del acuífero del Valle de Cuauhtémoc, Chihuahua. Citado en Ríos, J. y R. Ferrer, 2000. Estudio hidrogeoquímico del Valle de Guaymas, Sonora. Universidad de Sonora. Departamento de Geología. . p. 28. (Tesis Profesional).
- CNA. 1995. Programa Estatal Hidráulico. Gerencia Estatal de Sonora. Hermosillo, Sonora, México. p.156.
- Evet, J. B. y Ch. Liu. 1987. Fundamentals of fluid mechanics. Ed. Mc. Graw-Hill., Inc. New York, USA. p. 404
- INEGI. 1993. Estudio hidrológico del Estado de Sonora. Hermosillo, Sonora, México. p 186.
- Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados S.A. 1975. Elaboración y calibración del modelo matemático de intrusión salina en el Valle de Guaymas, Sonora, México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección General de Irrigación y Control de Ríos. Comisión de Desarrollo de Cuencas Centro y Norte del Estado de Sonora. Texto y Anexos.



- Linsley, P. K., M. A. Kohler y J. L. Paulhus. 1988. Hidrología para Ingenieros. Tr. Al español de la 4ta. Edición. Ed. Mc. Graw-Hill. México. p 386.
- Maidment, D.R. 1993. Handbook of hydrology. Groundwater flow. Ed. Mc. Graw-Hill, Inc. New York, USA. Chapter. 6.31-6.38.
- Martínez, M. y A. Canales. 1999. Determinación del grado de interconexión entre los acuíferos aluvial y de rocas volcánicas mediante la comparación de los componentes químicos del agua subterránea en la zona de Boca Abierta. *In* memorias del tercer seminario de acuíferos costeros. Empalme, Sonora, México. Ed. Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. Hermosillo, Sonora. pp. 33-34.
- Mayer, A. 1997. Contaminación de acuíferos costeros por intrusión de agua salina: ejemplos y aplicaciones de modelos matemáticos. *In* memorias del primer seminario de acuíferos costeros. Hermosillo, Sonora, México. Ed. Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. pp. 1-9.
- Peña, H. D. y colaboradores. 1996. Bosquejo morfoedafológico de la Cuenca del Río Mátape. *In* memorias del segundo seminario internacional de manejo de cuencas hidrológicas. Hermosillo, Sonora, México. Ed. University of Arizona. pp. 43-46.
- Rodríguez, B. y M. Pérez. 1991. Estudio hidrogeoquímico de la Costa de Hermosillo y el Valle de Guaymas en el Estado de Sonora. México, D.F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. p.200. (Tesis profesional).
- Salmón, A. y A. Cordova. 1997. Evolución de la piezometría del acuífero del Valle de Guaymas, Sonora, desde 1967 a 1995. Universidad de Sonora. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Hermosillo, Sonora, México. p.108. (Tesis Profesional).
- Secretaría de Programación y Presupuesto. Carta hidrológica de aguas subterráneas. Sierra Libre, H12-11 y Guaymas G12-2. Escala 1 : 250,000.
- Springall, R. 1970. Hidrología. México, D.F. Ed. UNAM. Instituto de Ingeniería. p. 210.
- Tinajero, J.A. 1982. Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea. México, D.F. SARH. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. p.233.
- UACH (Universidad Autónoma de Chapingo). 1987. Geohidrología. México, D.F. Ed. UACH. Departamento de Irrigación. p 170.
- Vega, E. L. 1992. Estudio hidrogeoquímico de la Cuenca Río Mátape, Sonora con énfasis en la presencia de Bario. Cd. Obregón, Sonora, México. Instituto Tecnológico de Sonora. Administración de Recursos Hidráulicos. p. 80. (Tesis de Maestría).

- Vega, E. L., J. Castillo y G. Borgo. 1996. Evolución de la calidad del agua subterránea del Valle de Guaymas, Sonora. Hermosillo, Sonora, México. Ed. Universidad de Sonora. Boletín Departamento de Geología. Vol. 13, No. 2, pp. 97-110.
- Vega, E. L. y J. Castillo. 1998. La contaminación por intrusión salina del acuífero del Valle de Guaymas, Sonora, México. *In memoria del segundo seminario de acuíferos costeros*. Hermosillo, Sonora. Ed. Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. pp. 59-74.
- Vega, E. L. y K. Longhini. 1999. Situación actual de la intrusión salina en el Valle de Guaymas. *In memorias del tercer seminario de acuíferos costeros*. Empalme, Sonora. Ed. Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería. Departamento de Geología. pp. 62-66.
- Velasco, I. 1979. Aspectos generales de la hidráulica de los pozos. México, D.F. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México. Boletín técnico número 8. p 2.

**APENDICE**



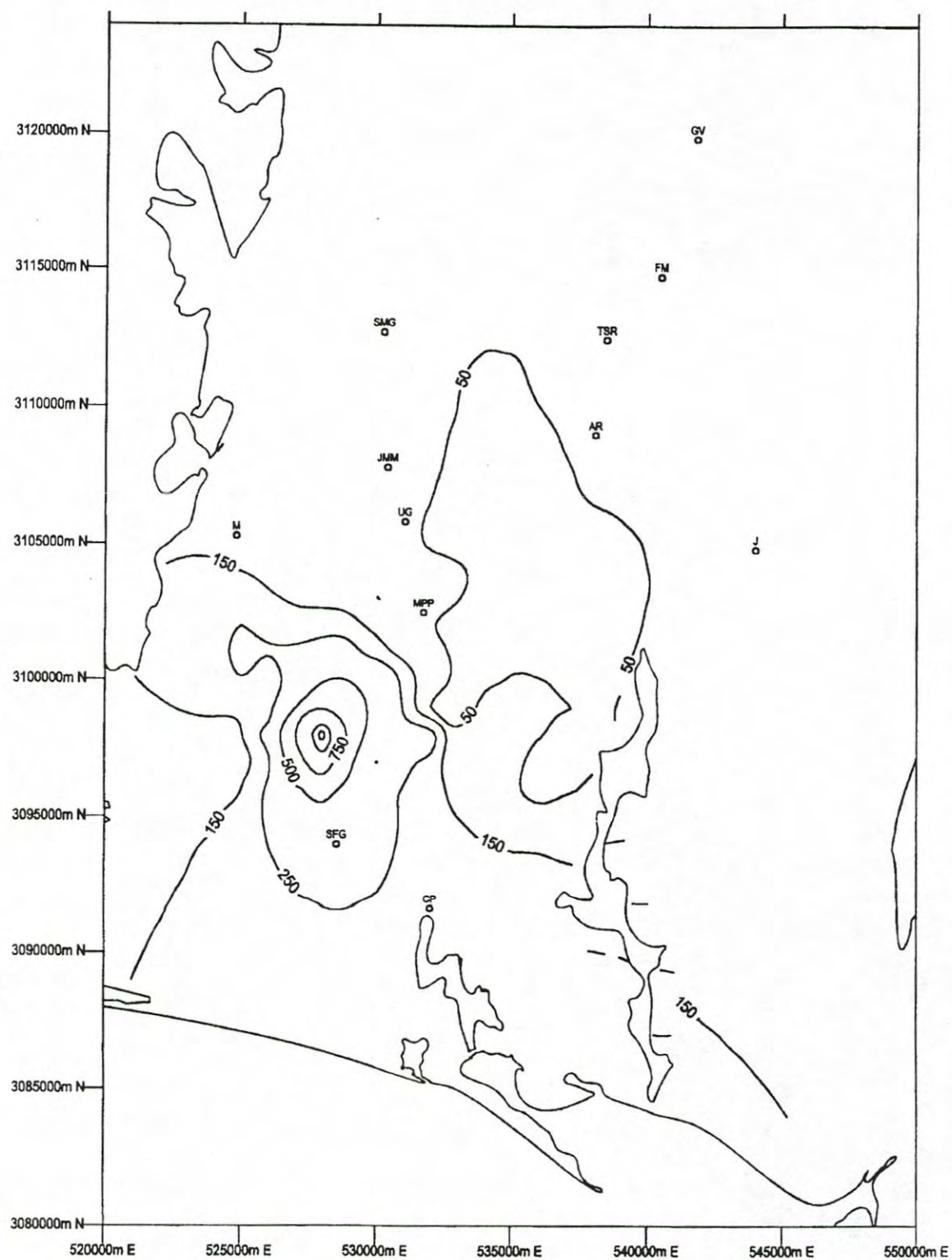
**Fig. 4. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1975.**

Fig. 5. Isovalores de STD (ppm) en el año 1975.

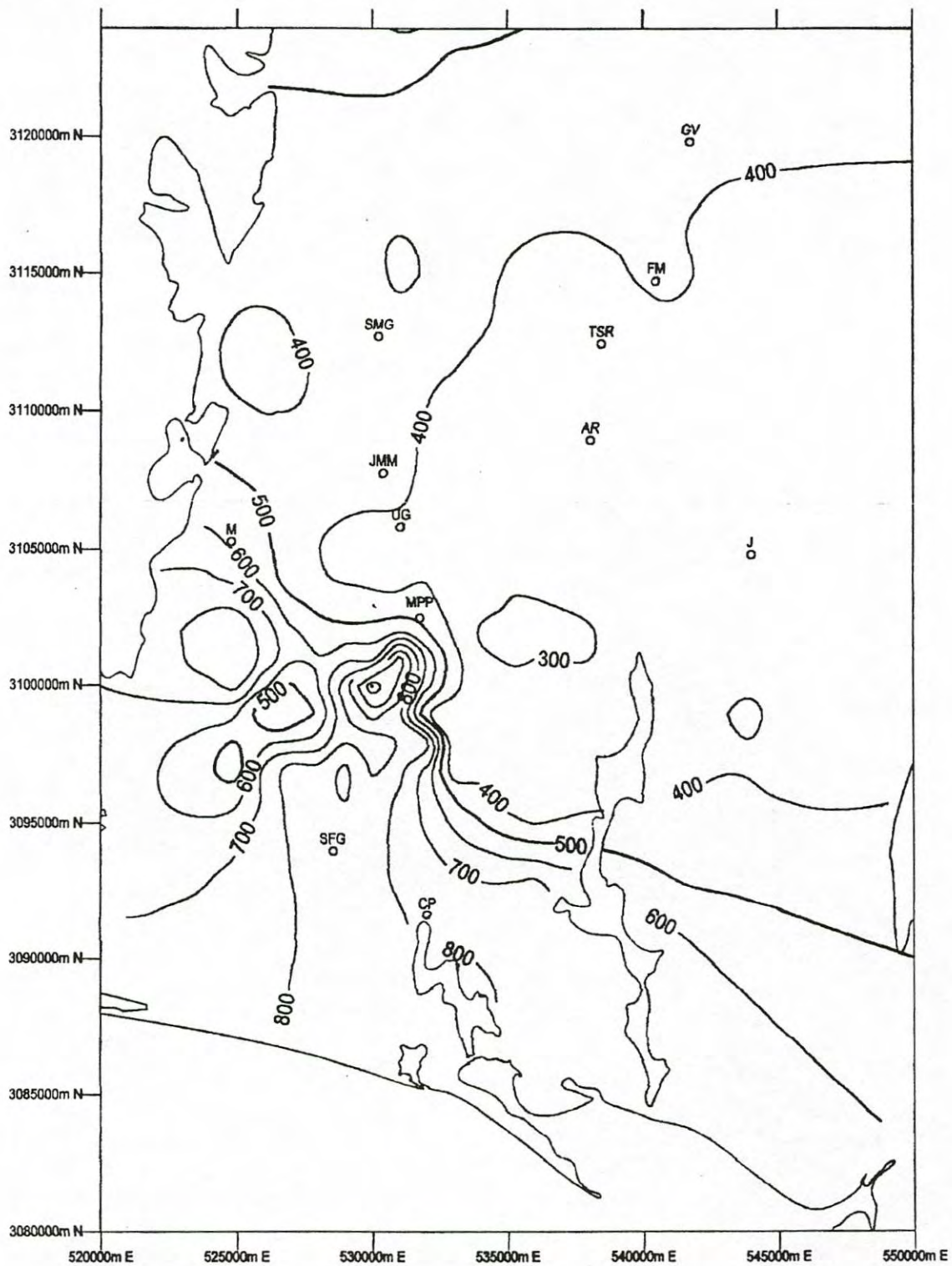


Fig. 6. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1990.

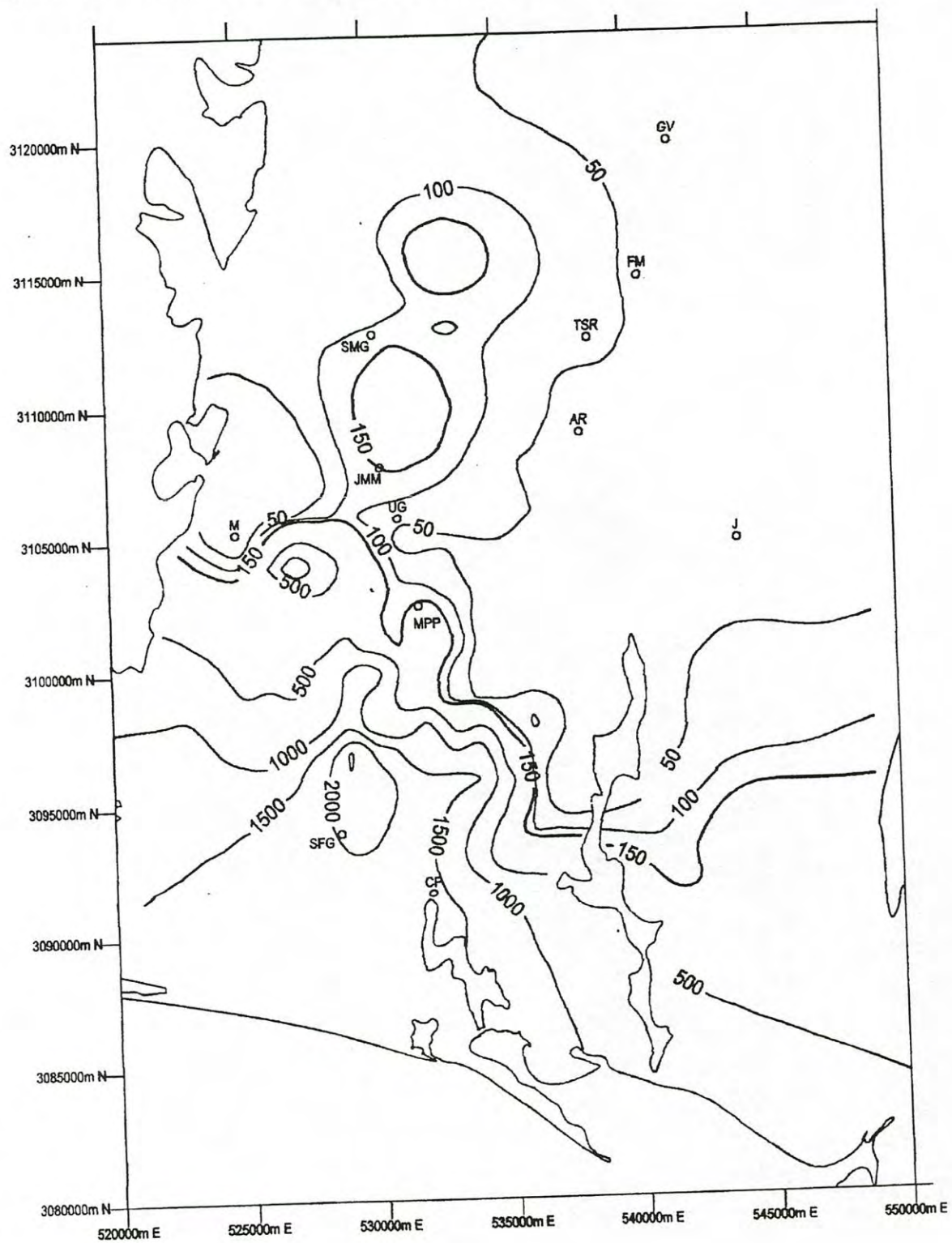




Fig. 7. Isovalores de STD (ppm) en el año 1990.

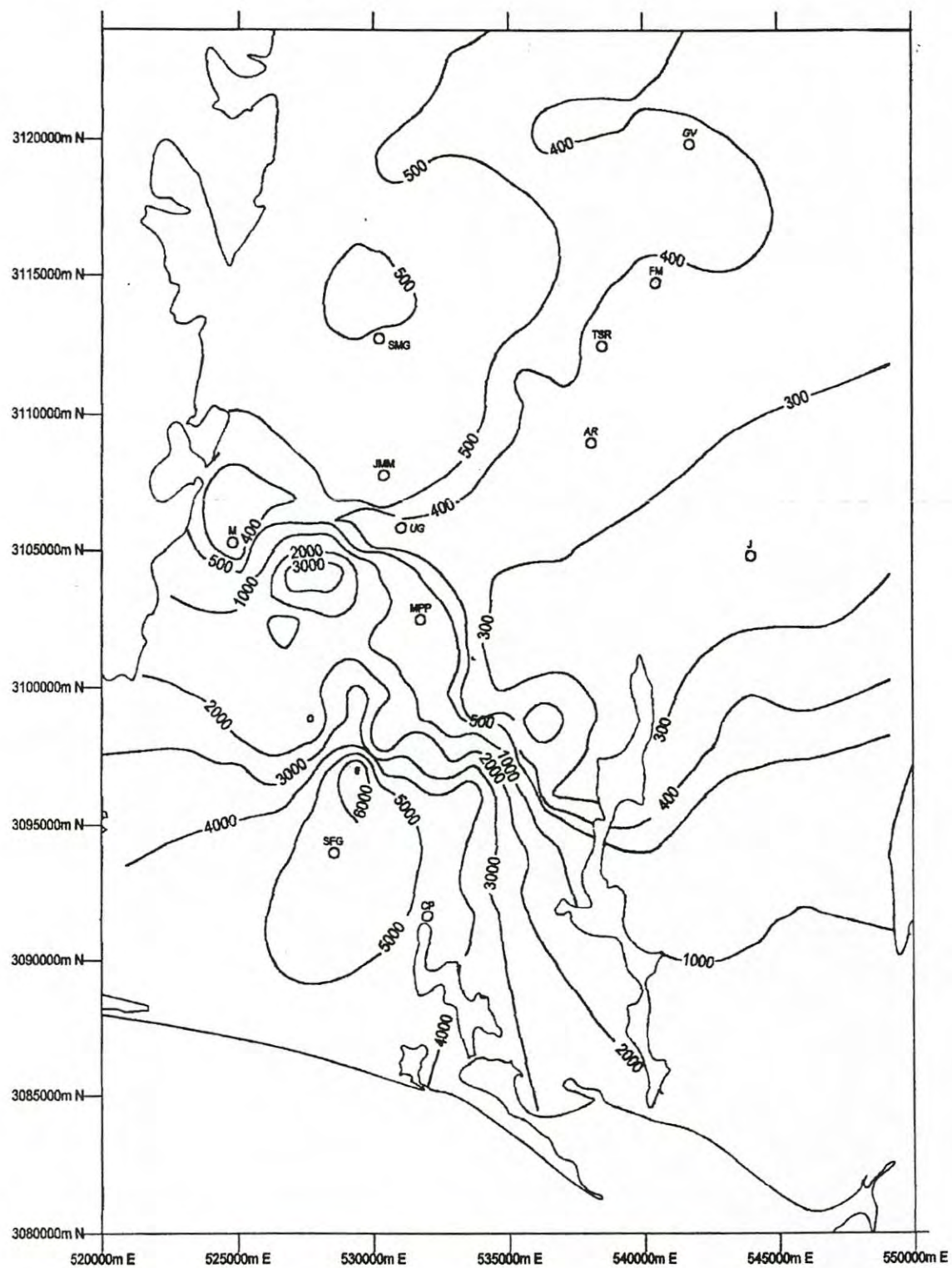


Fig. 8. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1995.

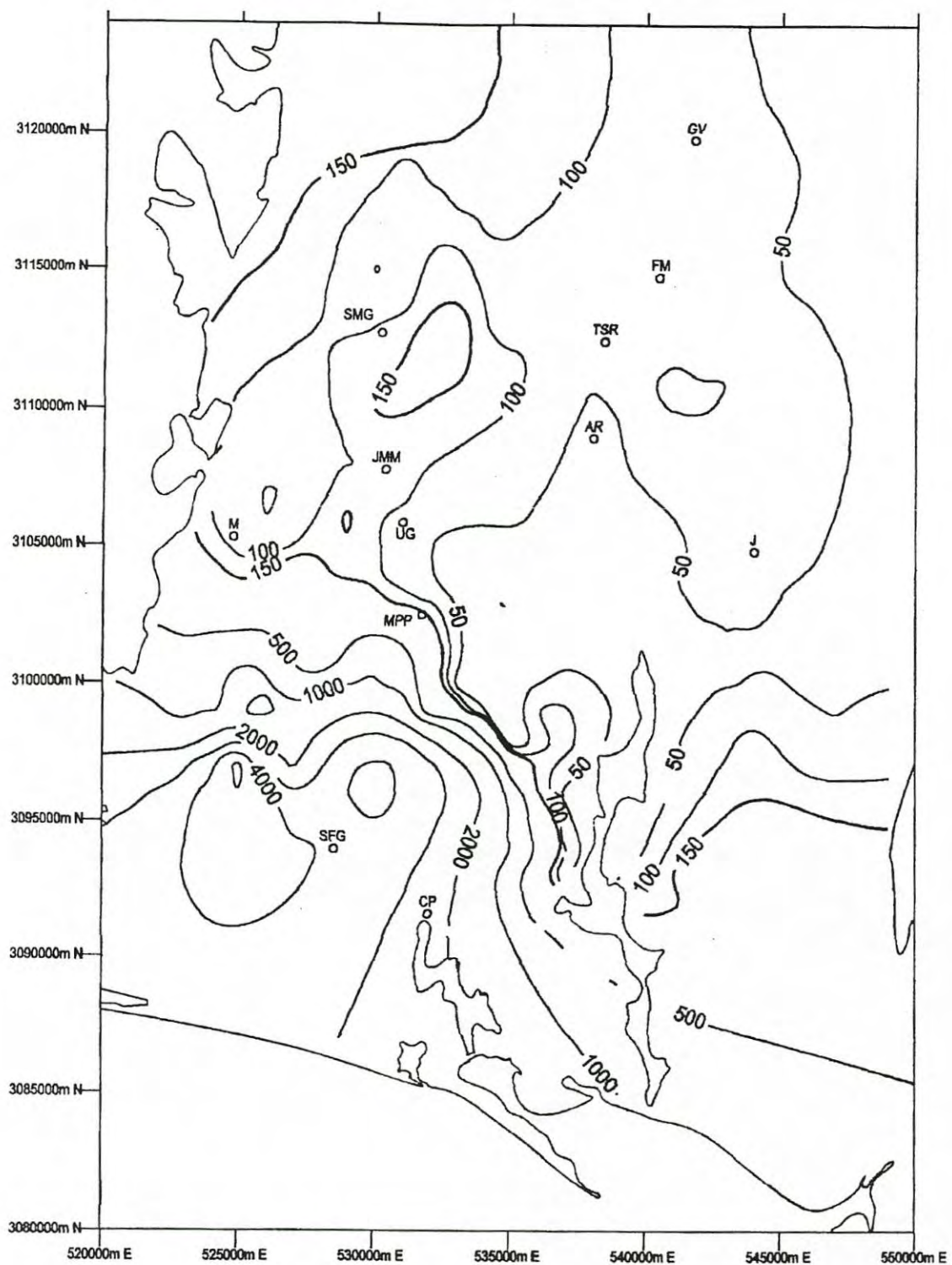
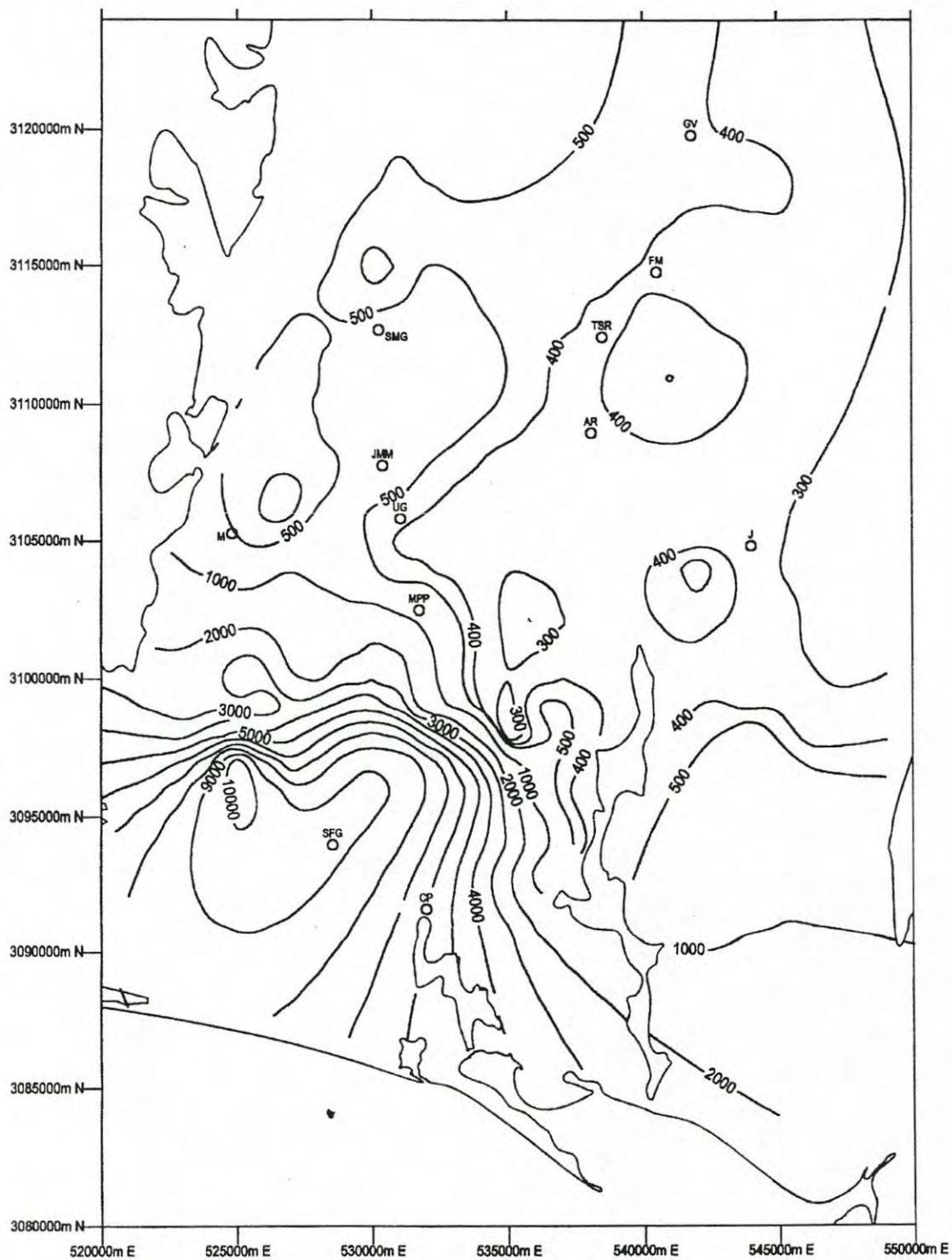
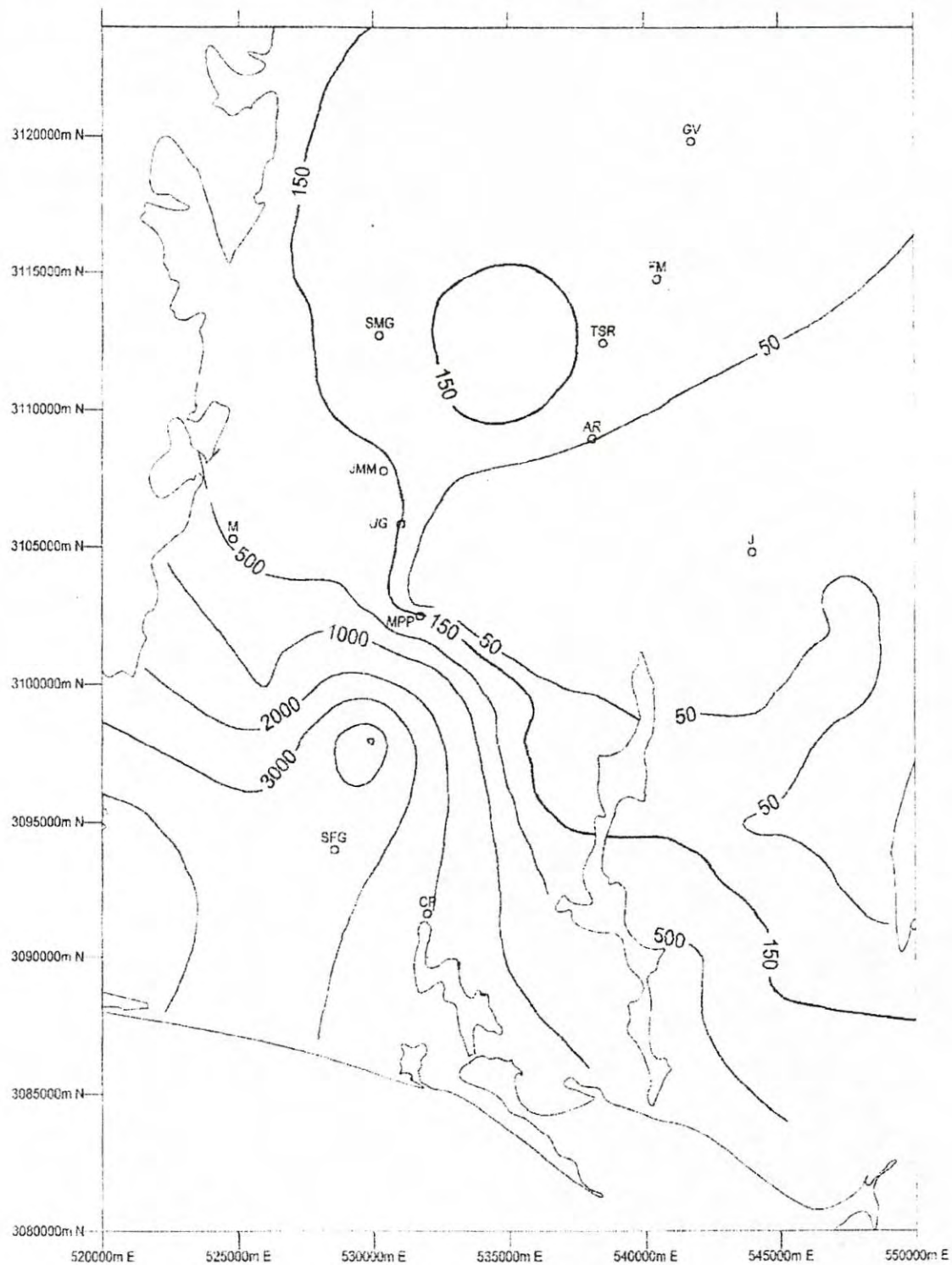


Fig. 9. Isovalores de STD (ppm) en el año 1995.





**Fig. 10. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1997.**

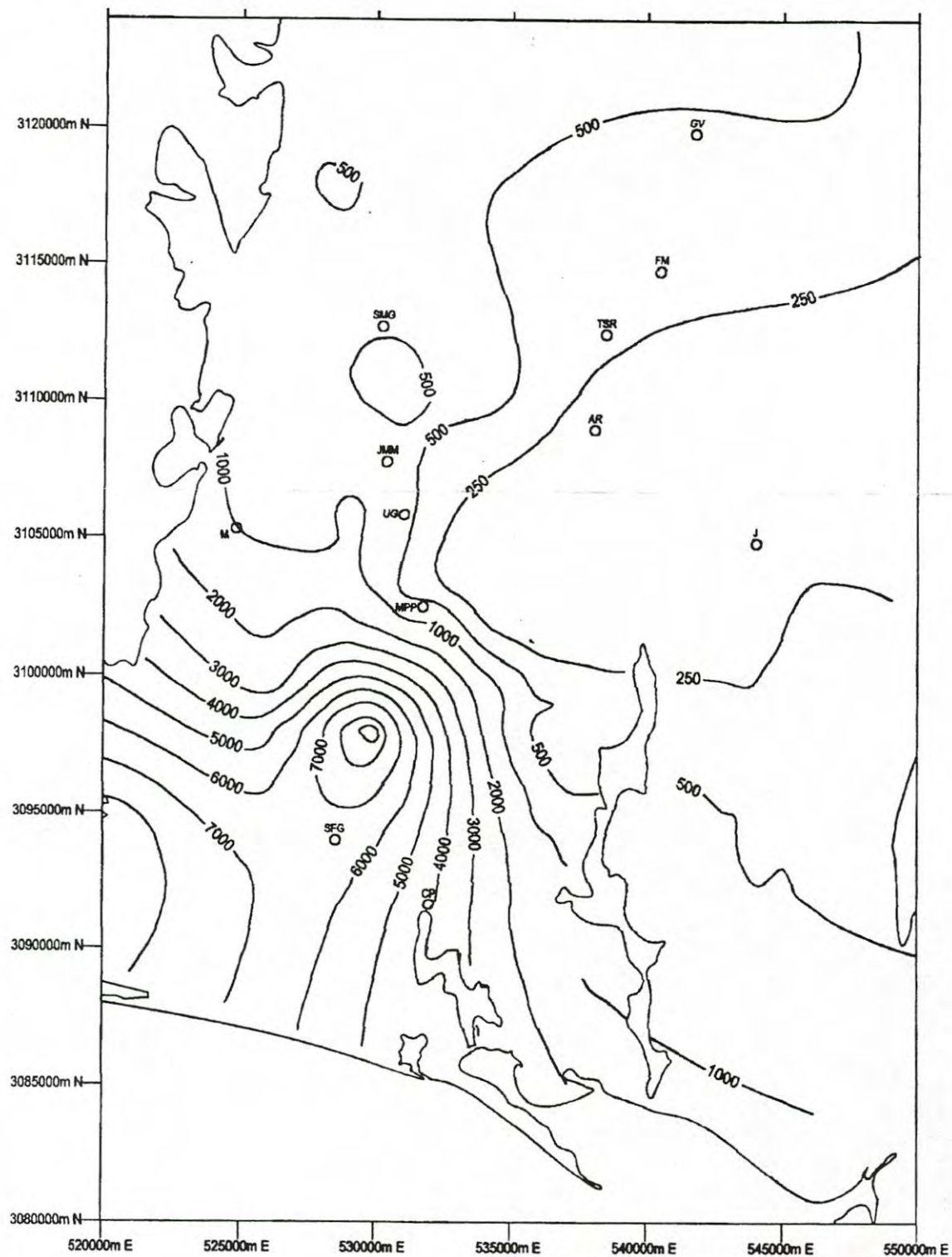
**Fig. 11. Isovalores de STD (ppm) en el año 1997.**

Fig. 12. Isovalores de Cloruros (ppm) en el año 1998.

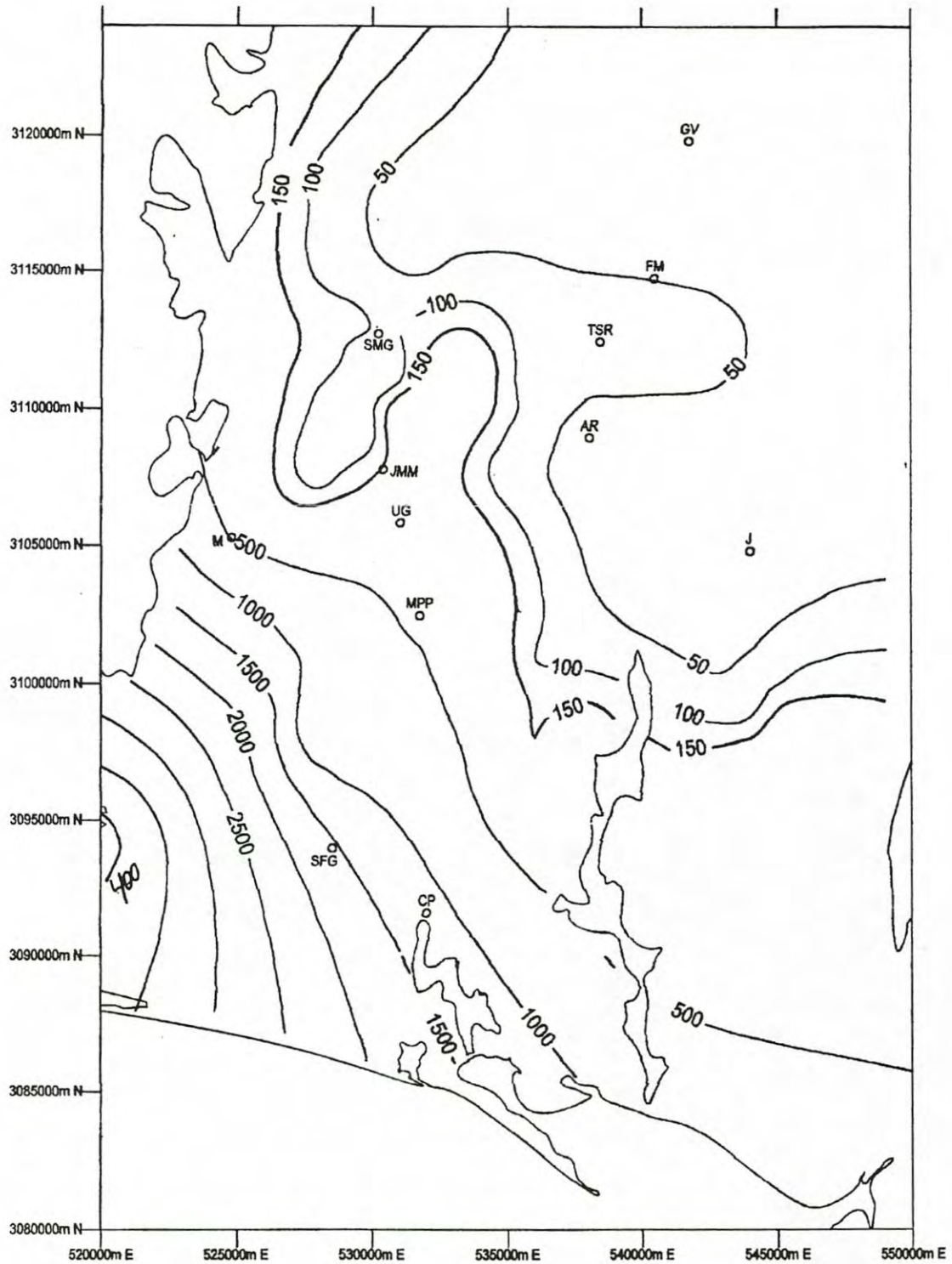




Fig. 13. Isovalores de STD (ppm) en el año 1998.

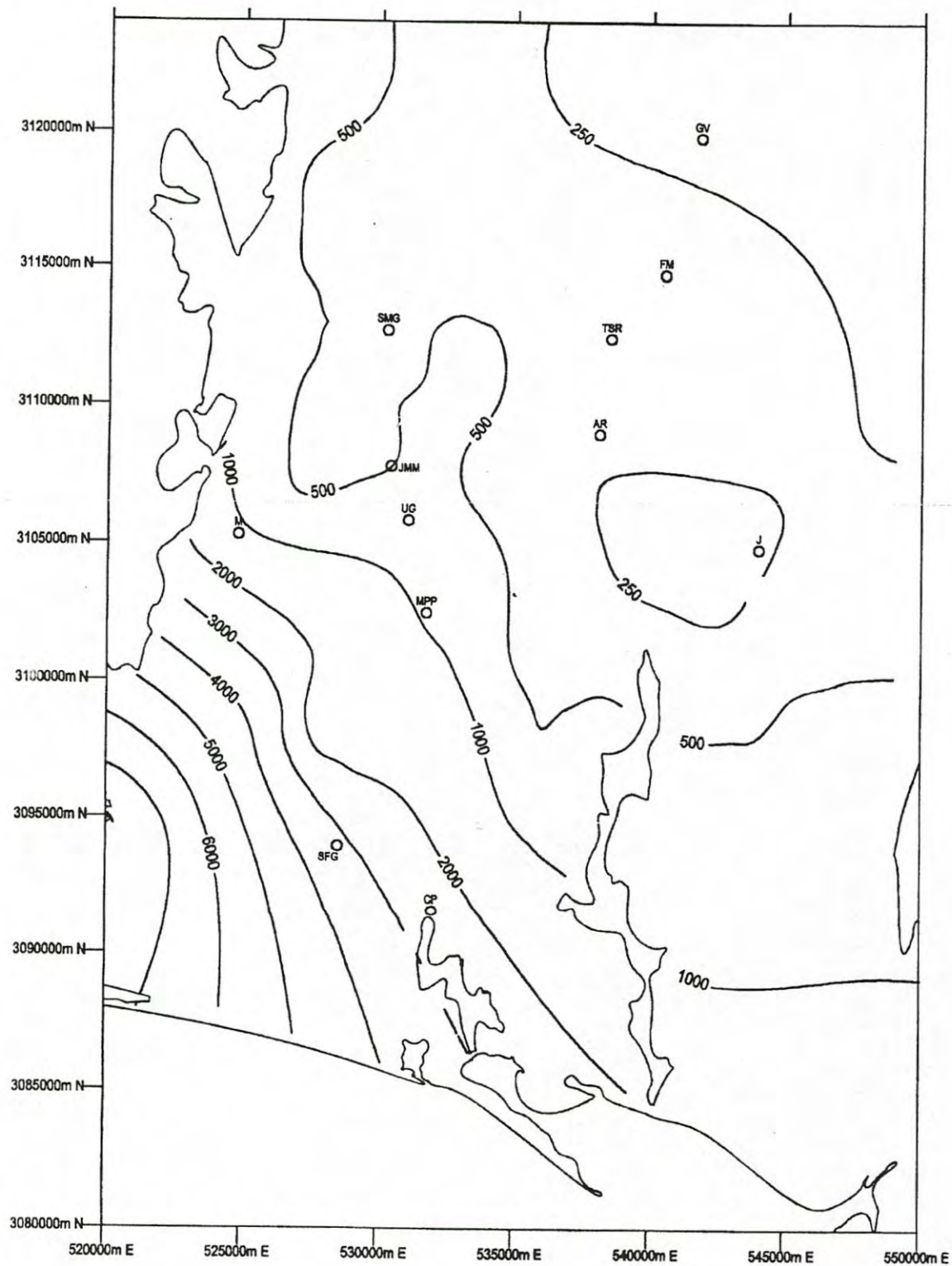


Fig. 14. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1950.

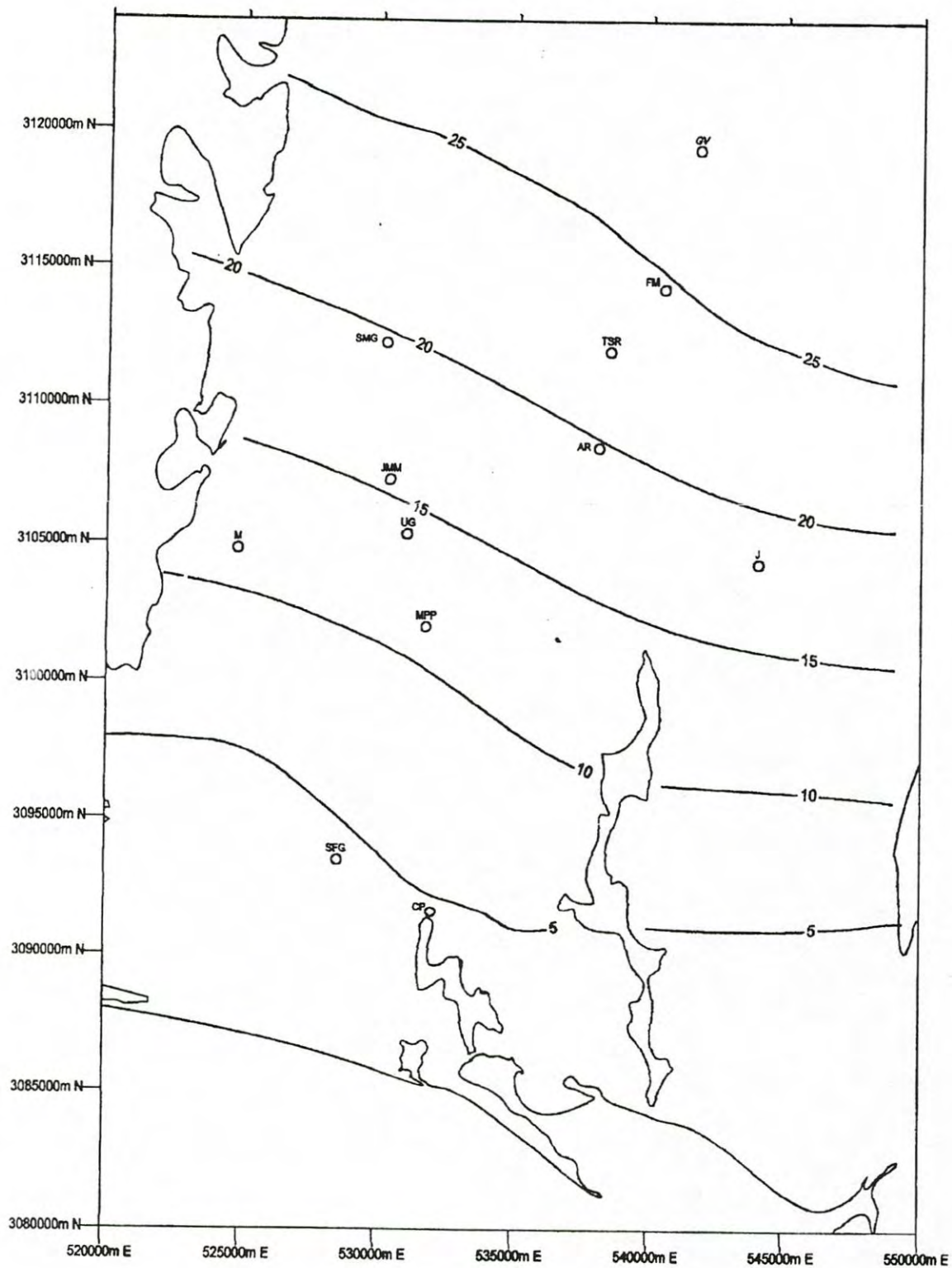


Fig. 15. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1970.

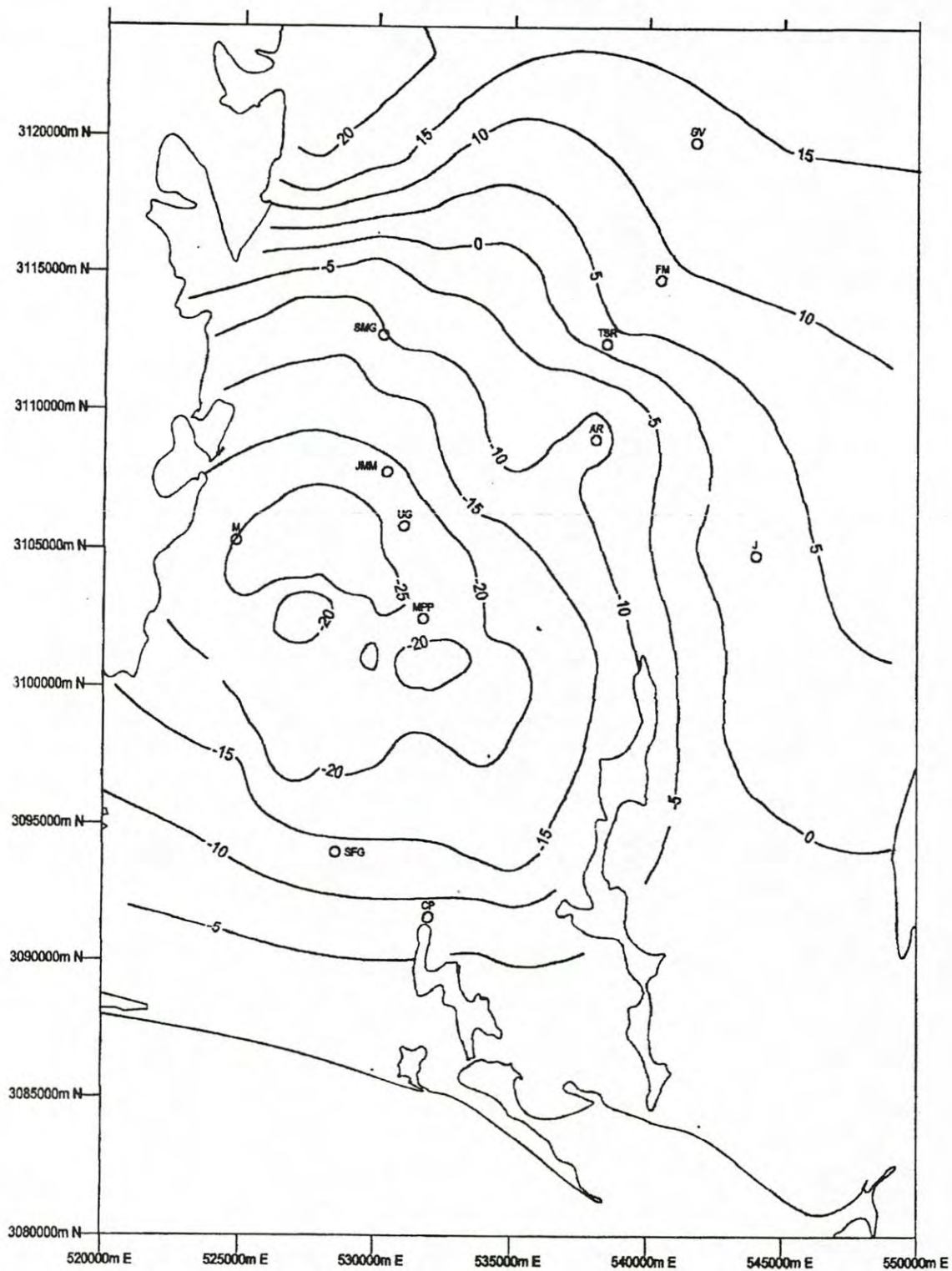




Fig. 16. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1975.

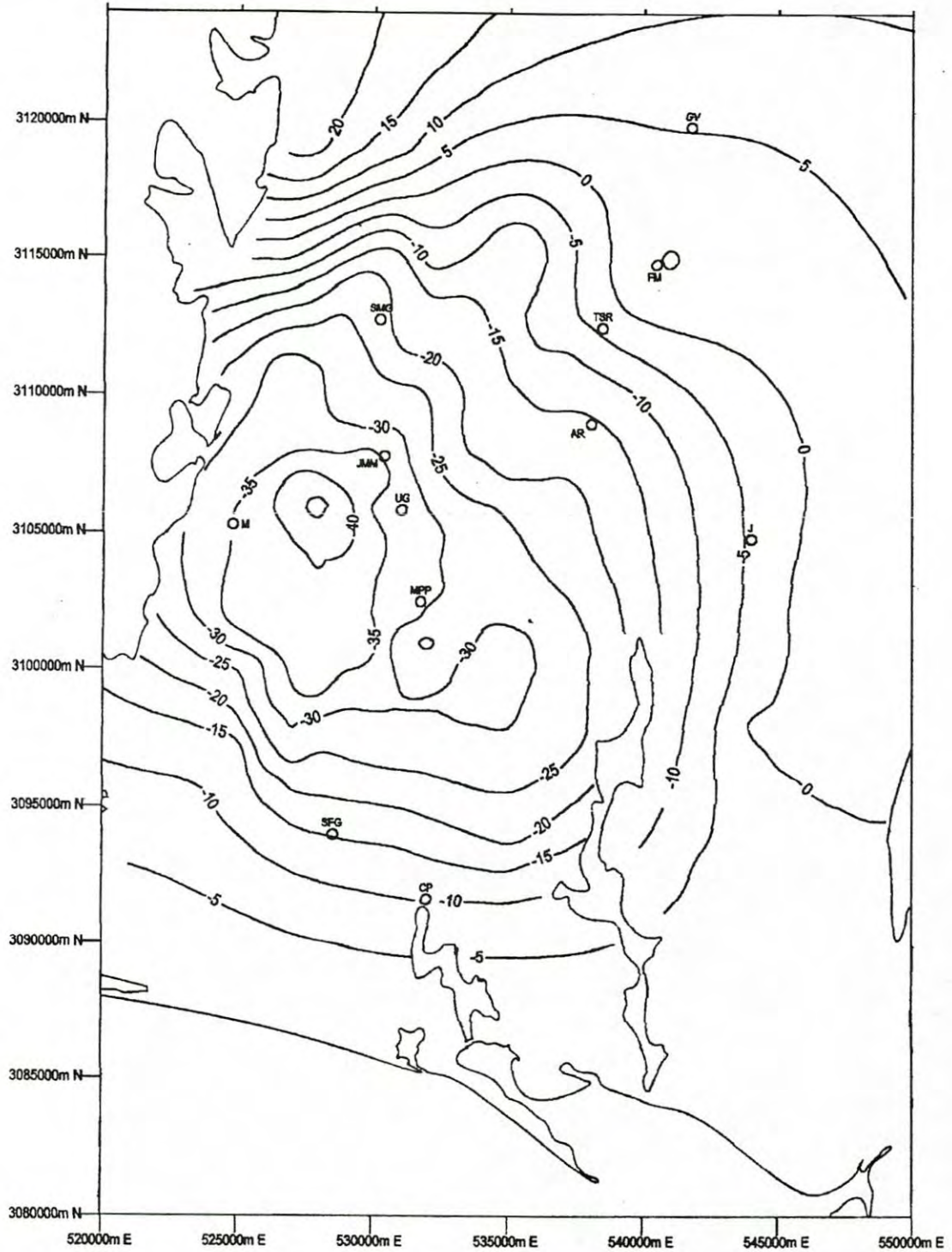


Fig. 17. Isovalores Piezométricos (msnm) en el año 1990.

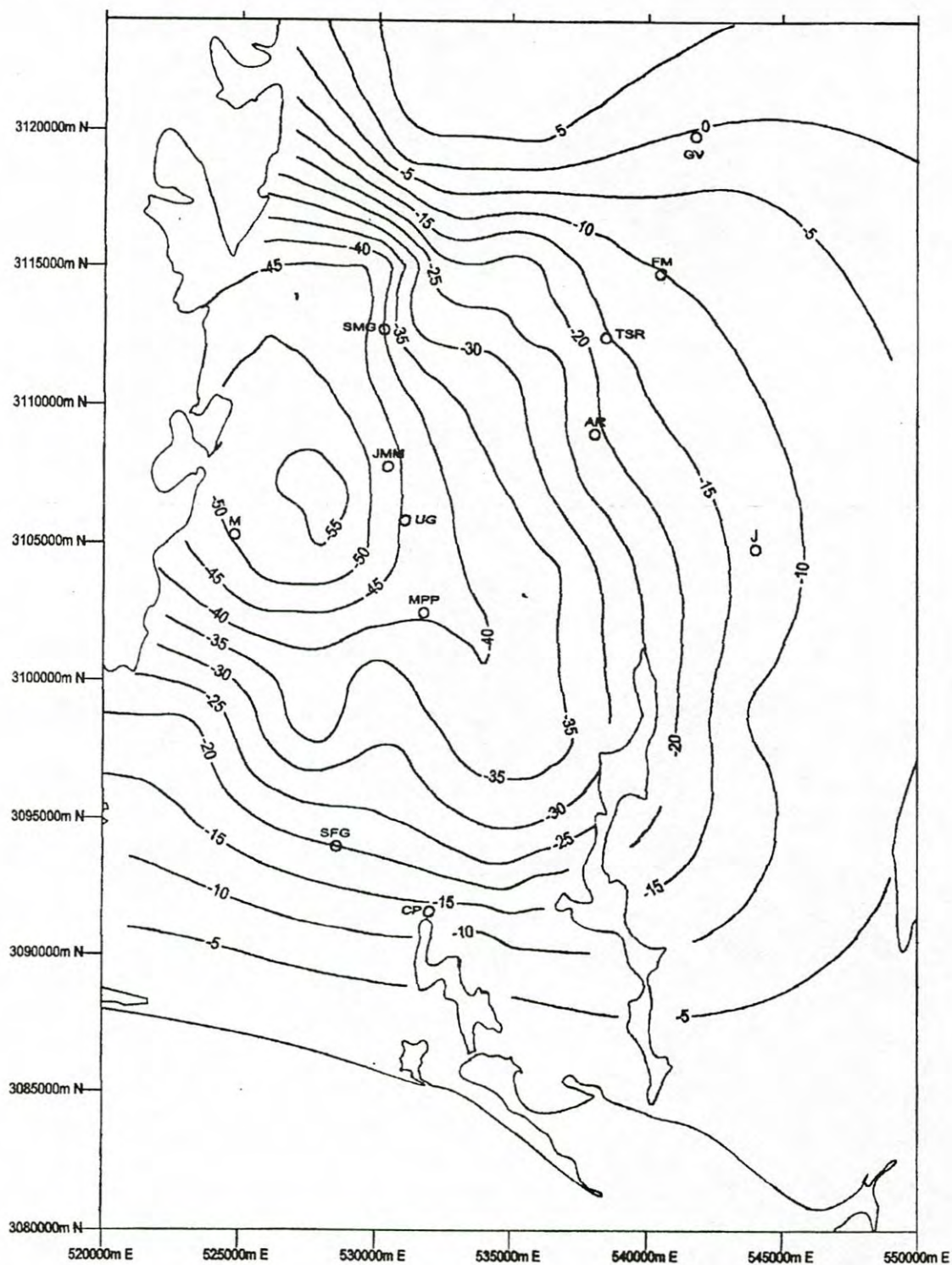


Fig. 18. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1995.

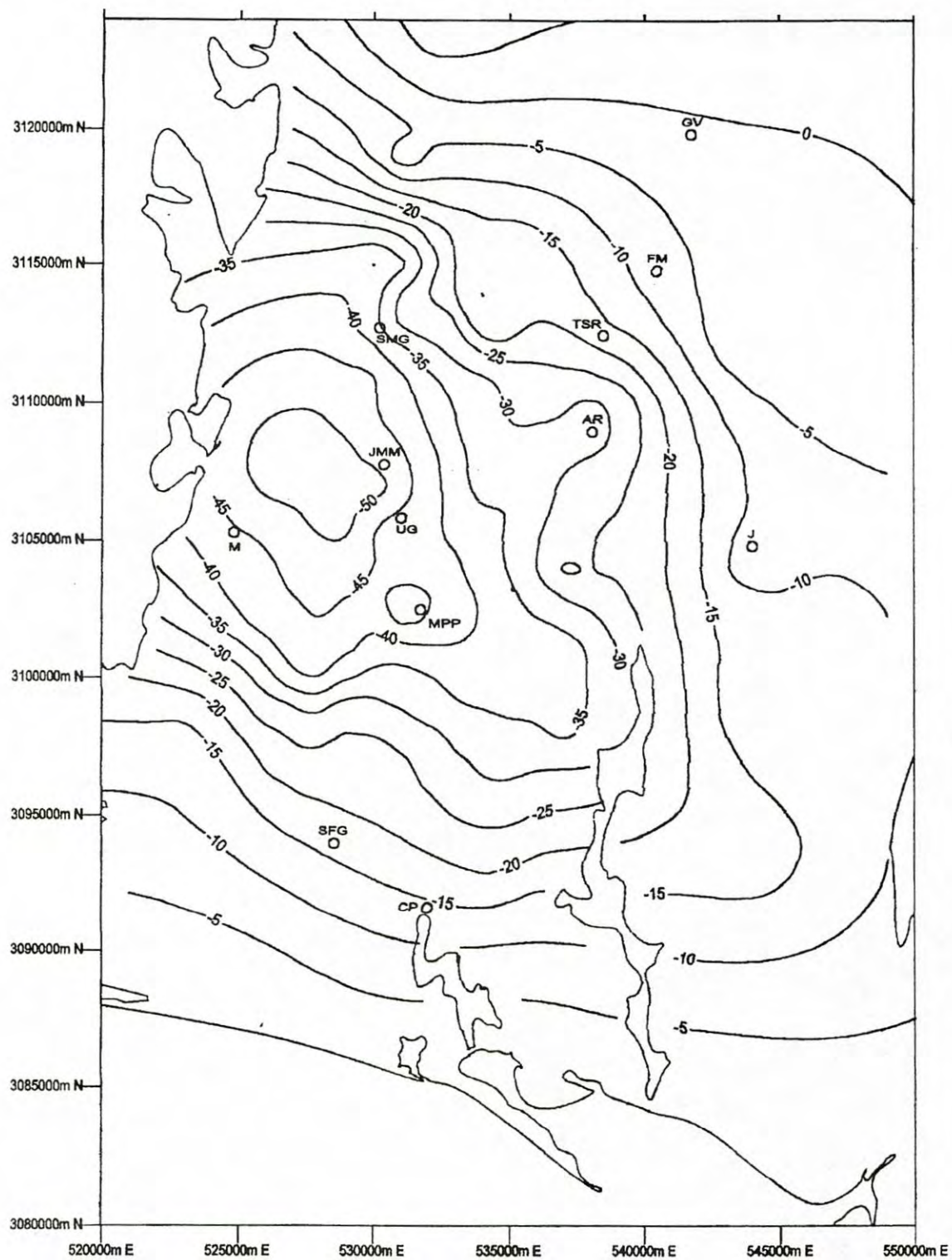




Fig. 19. Isovalores Piezométricos (msnmm) en el año 1998.

