



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“MODELO GEOHIDROLÓGICO 3-D  
DEL ACUÍFERO COSTERA DE  
VERACRUZ”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

P R E S E N T A :

**DANIEL MOLINA MARTÍNEZ**

TUTOR:

**DRA. ELSA LETICIA FLORES  
MÁRQUEZ**



2009

## AGRADECIMIENTOS

A...

**LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:** Por la educación y la oportunidad de ser mejor persona, por darme acceso a un gran mundo de conocimiento, siempre estaré agradecido.

**La doctora Elsa Leticia Flores Márquez:** Por la oportunidad de realizar este trabajo, por su paciencia, comprensión, ayuda y lo más importante, su amistad.

**Los profesores:** Los encargados directos de mi educación y que brindaron su tiempo y paciencia para lograr que yo llegara a este momento.

**Martha:** Porque durante todos los años que duro mi educación siempre me apoyaste incondicionalmente y me diste ánimos para continuar no importando lo difícil que fuera el momento.

**Juan:** por ayudarme en gran parte de este proceso y que junto con Ana y Nacho siempre celebrábamos juntos.

**Mis amigos:** Gran parte de mi formación se debe a aquellas personas que me brindaron su amistad, de alguna u otra forma ellos también fueron parte de ello.

## **DEDICO ESTE TRABAJO**

*A mi papa:* Por darme la vida, por haberme dado todo lo que tengo y ser la gran persona que es, te quiero mucho.

*A mi mama:* Por darme la vida, cuidarme y ayudarme durante siempre, te quiero mucho.

*A mis hermanos:* Antonio, Juan, Joel y Arturo, por ser mi familia.



## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	ii

## CAPÍTULO I ANTECEDENTES

I.1	Ecuaciones de flujo y transporte .....	1
I.1.1	Ley de Darcy .....	2
I.1.2	Ecuación de flujo de aguas subterráneas .....	3
I.1.3	Ecuación de transporte de masa .....	6
I.2	Parámetros de las ecuaciones .....	7
I.2.1	Dispersión mecánica .....	7
I.2.2	Dispersión hidrodinámica .....	8
I.2.3	Dispersión por capilaridad .....	10
I.3	Soluciones de la Ecuación de Transporte .....	11
I.4	Coefficiente de almacenamiento específico .....	16
I.5	Coefficiente de transmisividad .....	17
I.6	Propiedades intensivas y extensivas de un medio continuo .....	17

## CAPÍTULO II DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

II.1	Localización .....	19
II.2	Geología histórica .....	20
II.3	Marco tectónico.....	21
II.4	Columna estratigráfica .....	23
II.5	Estratigrafía .....	24

---



## CAPÍTULO III HIDROGEOLOGÍA

III.1	Introducción .....	27
III.2	Tipo de acuífero .....	28
III.3	Parámetros hidráulicos .....	30
III.4	Nivel estático .....	30
III.5	Evolución del nivel estático .....	31
III.6	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	32
III.7	Balace de aguas subterráneas .....	34
III.8	Parámetros del balace de aguas .....	34
III.8.1	Recarga .....	34
III.8.2	Recarga inducida .....	34
III.8.3	Recarga natural .....	34
III.8.4	Flujo horizontal .....	35
III.8.5	Flujo subterráneo .....	35
III.8.6	Evapotranspiración .....	35
III.8.7	Descargas naturales .....	35
III.8.8	Extracción por bombeo .....	36
III.8.9	Cambio de almacenamiento .....	36
III.9	Balace para 1998 .....	36
III.10	Disponibilidad .....	38
III.11	Censo de aprovechamiento e hidrometría .....	39

## CAPÍTULO IV MODELO GEOHIDROLÓGICO

IV.1	Delimitación del modelo .....	41
IV.2	Construcción de estratos geológicos a partir de Sondeos Eléctricos Verticales .....	42
IV.3	Distribución de las propiedades .....	45
IV.4	Almacenamiento .....	48
IV.5	Condiciones iniciales del nivel estático .....	48
IV.6	Entradas del modelo .....	48

---



IV.7	Condiciones de frontera .....	49
IV.8	Asignación de piezometría .....	50
IV.9	Pozos de calibración .....	51
IV.10	Módulo MT3DMS .....	52

## CAPÍTULO V RESULTADOS Y CONCLUSIONES

V.1	Modelo es estado estacionario .....	55
V.2	Modelo de flujo transitorio para el año 1993 .....	55
V.3	Modelo de flujo transitorio para el año 2003 .....	58
V.4	Modelo de flujo transitorio para el año 2006 .....	60
V.5	Modelo de flujo transitorio para el año 2011 .....	62
V.6	Modelo de flujo transitorio para el año 2016 .....	63
V.8	Conclusiones .....	65

## REFERENCIAS

### ANEXO A:

Tablas de SEV

### ANEXO B:

Figuras de los SEV

### ANEXO C:

Datos de piezometría

### ANEXO D:

Norma Oficial Mexicana 1994 y modificación 2000

---



## RESUMEN

La Ciudad de Veracruz es uno de los puertos con más importancia en México, en ella se lleva acabo actividades como la agricultura, ganadería y una gran cantidad de industrias que se localizan alrededor del la ciudad, además de su actividad portuaria. Las características fisiográficas de la Ciudad de Veracruz le permiten recibir un importante flujo horizontal de agua dulce producto del escurrimiento del la Sierra Madre Oriental y las condiciones de alta porosidad con las que cuenta el suelo ayuda a este proceso.

El Acuífero Costera de Veracruz está constituido por material poroso. La finalidad de este trabajo es describir el efecto que las actividades humanas tienen sobre el acuífero de Veracruz, para este fin se dispone de un registro de piezometría de 10 años que van desde el año 1993 hasta el año 2003, por medio del programa MODFLOW se modeló este sistema. La frontera de la ciudad con el mar pone en peligro la calidad del agua, la mezcla de agua dulce y agua salada la hace inutilizable para uso humano. Para reproducir este comportamiento se utilizó el modulo M3TDMS colocando fuentes puntuales a lo largo de la costa para monitorear el comportamiento del flujo en su interacción con el agua salada.

Los escenarios de predicción para este trabajo es hasta el año 2016 donde las predicciones poblacionales y el estudio de el gobierno de Veracruz nos da información acerca del consumo de agua en la región para este año y reporta un a aumento de aproximadamente 10% en los requerimientos de este recurso, el objetivo es detectar el posible caso de una intrusión salina y su relación con el crecimiento poblacional y actividad industrial.



## CAPITULO I. Antecedentes

### I.1 Ecuaciones de flujo y transporte.

Para realizar un modelo de flujo de agua y transporte de solutos es necesario formar un modelo conceptual del sistema a estudiar, el cual consiste en el planteamiento de un esquema que represente las condiciones físicas de la zona y reproducir las condiciones y procesos geoquímicos, físicos e hidrogeológicos del sistema, así como de sus condiciones hidrogeológicas iniciales y de frontera. El siguiente paso es proponer el modelo en términos de una o más ecuaciones diferenciales parciales que describan el fenómeno físico involucrado. Cuando el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos ocurre se puede representar por medio de las siguientes ecuaciones:

Ecuación de flujo saturado, en estado estacionario

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad 1.1$$

Ecuación para flujo saturado, en estado transitorio

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = s_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad 1.2$$

Ecuación de transporte

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (v_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad 1.3$$

Donde:

$v$  : Velocidad de dispersión

$D$  : Difusión

$C$  : Concentración del contaminante

$K_x, K_y$  y  $K_z$  : Representan la conductividad hidráulica en dirección de  $x, y$  y  $z$  respectivamente.

$S_s$  : Almacenamiento específico.

$h$  : Carga hidráulica.



### I.1.1 Ley de Darcy

La ecuación experimental que se obtiene de forma empírica de la ley de Darcy describe las características de movimiento del agua en un medio poroso homogéneo y se limita al flujo unidimensional de un líquido incompresible. De manera que cuando el flujo es tridimensional, la ecuación puede expresarse de la siguiente forma:

$$q = -Kj = -K\nabla h, \quad V = \frac{q}{n} \quad 1.4$$

que puede representarse como

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad 1.5$$

Donde V es el vector de velocidad ( $V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$ ), q es el vector de descarga específica, ( $q_x$ ,  $q_y$  y  $q_z$ ) y  $J = -\nabla h$  es el gradiente hidráulico  $J_x = -\partial h / \partial x$ ,  $J_y = -\partial h / \partial y$  y  $J_z = -\partial h / \partial z$ . Si el medio es homogéneo e isótropo el coeficiente K es un escalar k y lo anterior se puede expresar como:

$$\begin{aligned} q_x &= kJ_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} = nV_x \\ q_y &= kJ_y = -k \frac{\partial h}{\partial y} = nV_y \\ q_z &= kJ_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} = nV_z \end{aligned} \quad 1.6$$

El flujo en una sola dirección indicado por el vector  $ls$  está dado por

$$q_s = q \bullet ls = -k \frac{\partial h}{\partial s} = nV_s \quad 1.7$$

Las ecuaciones 1.4 y 1.6 son válidas para el flujo tridimensional en un medio poroso no homogéneo e isótropo.

## I.1.2 ECUACIÓN DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La ley de conservación de masas o principio de continuidad afirma que los cambios no pueden ser netos en la masa de un fluido contenido en un pequeño volumen del acuífero. Cualquier modificación en la masa que fluye dentro del volumen del acuífero puede ser balanceada por una modificación correspondiente en el flujo de la masa fuera del volumen o un cambio en las masas almacenadas en el volumen o ambos.

La ley de conservación de energía afirma que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma.

La segunda ley de la termodinámica establece que cuando la energía se transforma lo hace de una forma mas útil a otra forma menos útil.

De acuerdo a estos principios y a la ley de Darcy, se deducen las ecuaciones de flujo y de transporte de aguas subterráneas (Jacob, 1940, 1950; Domenico, 1972; Cooper, 1966). Consideramos un elemento diferencial del acuífero, llamado volumen de control (figura 1.1), con longitudes  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ . El área de las caras para el eje  $x$  es  $dydz$ , el área de las caras para el eje  $z$  es  $dx dy$ . Suponiendo que el acuífero es homogéneo e isótropo.

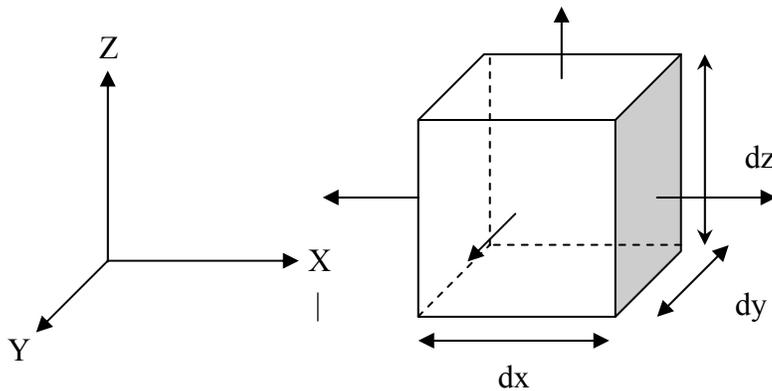


Figura 1.1. Volumen de control.

El flujo  $q$  se mueve en una sola dirección dentro del volumen de control, sin embargo, se puede dividir en tres componentes paralelas a los tres ejes principales.

Si  $q$  es el flujo por unidad de área  $\rho_w q_x dy dz$  a lo largo del eje  $x$ , y la masa del flujo fuera del volumen de control es  $\rho_w q_x dy dz + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_w q_x) dx dy dz$ . La acumulación neta en el volumen de control, en un movimiento paralelo al eje  $x$ , es igual a la menor afluencia de corriente o  $-\frac{\rho}{\rho_x}(\rho_w q_x) dx dy dz$ . Entonces estos tres componentes de flujo a lo largo de los tres ejes, en

términos similares se puede determinar para las otras dos direcciones:  $-\frac{\partial}{\partial y}(\rho_w q_y) dx dy dz$  y



$-\frac{\partial}{\partial z}(\rho_w q_z) dx dy dz$ . Combinando estos tres términos producto de la acumulación total neta de masa en el volumen de control obtenemos:

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} \rho_w q_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho_w q_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho_w q_z\right) dx dy dz \quad 1.8$$

El volumen de agua en el volumen de control es igual a  $\rho_w \phi dx dy dz$  donde  $\phi$  es la porosidad. La masa inicial de agua es  $\rho_w \phi dx dy dz$ . El volumen de material sólido es  $(1-\phi) dx dy dz$  cualquier cambio en la masa del agua  $m$  con respecto al tiempo  $t$  se determina por

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi dx dy dz) \quad 1.9$$

A medida que la presión en el volumen de control cambie, la densidad del fluido cambiará, así como la porosidad del acuífero. La compresibilidad del agua,  $\beta$ , se define como la razón de cambio de la densidad con respecto a la presión, P:

$$\beta dP = \frac{d\rho_w}{\rho_w} \quad 1.10$$

El acuífero cambia de volumen cuando cambia la presión. Suponiendo sólo compresibilidad vertical, la compresibilidad del acuífero  $\alpha$  estará determinada por

$$\alpha dP = \frac{d(dz)}{dz} \quad 1.11$$

Cuando el acuífero se comprime y se expande,  $n$  cambia y el volumen de los sólidos es constante. Del mismo modo, la deformación  $z$ ,  $d(dx)$  y  $d(dy)$  será igual a cero.

$$dV = 0 = d[(1-\phi) dx dy dz] \quad 1.12$$

Diferenciando la ecuación anterior tenemos

$$dz d\phi = (1-\phi) d(dz) \quad 1.13$$

y

$$d\phi = \frac{(1-\phi) d(dz)}{dz} \quad 1.14$$



La presión  $P$  en un punto del acuífero es igual a  $P_0 + \rho_w gh$  donde  $P_0$  es presión atmosférica (una constante), y  $h$  es la altura de la columna de agua sobre un punto. Por lo tanto  $dP = \rho_w dgh$

Y las ecuaciones 1.10 y 1.11 quedan de la siguiente manera

$$d\rho_w = \rho_w \beta (\rho_w g dh) \quad 1.15$$

$$d(dz) = dz \alpha (\rho_w g dh) \quad 1.16$$

La ecuación 1.14 se puede sustituir si  $d(dz)$  se reemplaza por la ecuación 1.16

$$d\phi = (1 - \phi) \alpha \rho_w g dh \quad 1.17$$

Si  $dx$  y  $dy$  son constantes, la ecuación para el cambio de masa por tiempo en el volumen de control es:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi dx dy dz) \quad 1.18$$

Y puede expresarse como

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \left[ \rho_w \phi \frac{\partial (dz)}{\partial t} + \rho_w dz \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi dz \frac{\partial \rho_w}{\partial t} \right] dx dy \quad 1.19$$

Simplificando la ecuación anterior tenemos:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = (\alpha \rho_w g + \phi \beta \rho_w g) \rho_w dx dy dz \frac{\partial h}{\partial t} \quad 1.20$$

La acumulación neta del material se expresa como:

$$-\left( \frac{\partial}{\partial x} \rho_w q_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho_w q_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho_w q_z \right) dx dy dz \quad 1.21$$

El cambio de unidades de masa por unidades de tiempo

$$-\left( \frac{\partial (q_x)}{\partial x} + \frac{\partial (q_y)}{\partial y} + \frac{\partial (q_z)}{\partial z} \right) \rho_w dx dy dz = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \rho_w dx dy dz \frac{\partial h}{\partial t} \quad 1.22$$

Sustituyendo 1.5 en estas ecuaciones en los productos de la ecuación principal de flujo para un acuífero confinado obtenemos:



$$k \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \frac{\partial h}{\partial t} \quad 1.23$$

Que es la ecuación par flujo en tres dimensiones en un medio poroso, isotrópico y homogéneo.

El flujo en estado estacionario no tiene cambio en la carga, por ejemplo en casos donde no hay cambio en la posición o pendiente y la constante de flujo es descrita por una ecuación diferencial parcial en tres dimensiones, conocida como ecuación de Laplace.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad 1.24$$

### 1.1.3 Ecuación de transporte de masa.

Para conocer el movimiento de los solutos a través de los fluidos es necesario conocer como se transportan. El transporte de un trazador o de una sustancia contaminante en el acuífero está determinado por los procesos de advección, dispersión y difusión molecular, además de las turbulencias y fenómenos de absorción.

#### Advección:

La advección transporta masa debido al flujo del agua en la cual la masa es disuelta. Es el principal proceso de transporte de masa. La dirección del transporte coincide con la del flujo del acuífero. Por ejemplo, en el caso de un sistema de flujo topográfico, los factores que influyen en el acuífero son; patrones de flujo, la configuración del nivel freático, el patrón de capas geológicas, el tamaño del acuífero y bombeo o inyección.

Para la mayoría de los problemas prácticos, el agua subterránea y el soluto se moverán con la misma proporción (en ausencia de otros procesos) y en la misma dirección. De acuerdo a la ley de Darcy la velocidad del transporte advectivo es:

$$v = (v_x, v_y, v_z) = \left( -\frac{k_{xx}}{n} \frac{\partial h}{\partial x}, -\frac{k_{yy}}{n} \frac{\partial h}{\partial y}, -\frac{k_{zz}}{n} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -\frac{k}{n} \nabla h \quad 1.25$$

Donde  $v$  es la velocidad lineal del agua subterránea  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$  y  $k_{zz}$  son la conductividad hidráulica a lo largo del x, y, z,  $n$  es la porosidad efectiva, y  $-\frac{\partial h}{\partial x}$ ,  $-\frac{\partial h}{\partial y}$  y  $-\frac{\partial h}{\partial z}$  son los gradientes hidráulicos a lo largo de x, y, z.



## I.2 Parámetros de las ecuaciones

La difusión para un sistema (no poroso) acuoso unidimensional simple se escribe como:

$$J_{dif} = -D_m \frac{dC}{dx} \quad 1.26$$

Donde  $D_m$  es el coeficiente de difusión y  $C$  la concentración del soluto.

La difusión molecular en un fluido es la mezcla acusada por el movimiento aleatorio molecular debido a la energía cinética del soluto. Como depende del espaciamento molecular, el coeficiente describe esta dispersión es más grande en gases que en líquidos.

El coeficiente de difusión en un medio poroso es más pequeño que en líquidos puros sobre todo porque la colisión con los sólidos del medio obstaculiza la difusión. En un medio poroso, la difusión toma lugar en la fase líquida. La Ley de Fick para la difusión en sedimentos puede ser escrita como:

$$J_{dif} = -n\tau D_m \frac{dC}{dx} \quad 1.27$$

Donde  $x$  es la coordenada,  $n$  es la porosidad efectiva, y  $\tau$  es la tortuosidad del medio.

### I.2.1 Dispersión mecánica

Es la propagación del soluto debido a los cambios aleatorios de dirección y la partición de los canales de flujo de un medio poroso, también contribuyen los cambios de velocidad en magnitud y dirección a través de los canales microscópicos de flujo.

El efecto de difusión molecular es despreciable comparado con la dispersión mecánica, solo adquiere importancia la velocidad lineal promedio y cumple la siguiente condición (Werner, 1996):

$$v < 5.10^{-6} \frac{m}{s} (= 0.4m/d)$$

O bien, cuando los gradientes de concentración son altos.

La dispersión mecánica de la ecuación de transporte se representa por el término:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad 1.28$$



## I.2.2 Dispersión hidrodinámica

Bear (1972), establece que la dispersión hidrodinámica es un proceso de propagación de partículas que actúan como trazadores individuales de manera que conservan las propiedades intensivas del soluto ante su separación. La dispersión hidrodinámica en el medio poroso es un proceso no reversible, ya que si el flujo regresara a su estado inicial, la distribución y concentración inicial del trazador no volvería a ser la misma.

El coeficiente de dispersión hidrodinámica  $D_{ij}$  de un medio poroso isótropo representa físicamente el flujo de masa por unidad de área en una unidad de tiempo para un flujo tridimensional, y se define mediante las siguientes expresiones (Bear, 1972), que son utilizadas en esta forma por el programa MT3D acoplado en visual MODFLOW:

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_\tau \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_\tau \frac{v_z^2}{|v|} \quad 1.29$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_\tau \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_\tau \frac{v_z^2}{|v|} \quad 1.30$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_\tau \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_\tau \frac{v_y^2}{|v|} \quad 1.31$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_\tau) \frac{v_x v_y}{v} \quad 1.32$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_\tau) \frac{v_x v_z}{v} \quad 1.33$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_\tau) \frac{v_y v_z}{v} \quad 1.34$$

Si la difusión molecular no es despreciable ( $v < 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ) al tensor del coeficiente de dispersión hidrodinámica se le debe de sumar el coeficiente de difusión molecular.

Si los ejes coinciden con la dirección de la velocidad promedio de flujo  $v_x = |v|$  y  $v_y = v_z = 0$

$$(D_{ij}) = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_L v & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_\tau v & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_\tau v \end{bmatrix} \quad 1.35$$



Para un medio poroso anisótropo (Bear y Verruijt, 1987), se requiere de cinco coeficientes de dispersión independientes. Debido a que no es fácil obtener las cinco dispersiones en un problema real, se supone que el coeficiente de dispersión hidrodinámico para medios porosos isotropos también es aplicable a medios porosos anisotropos. Burnet y Frind (1987) sugieren que la ecuación de transporte se resuelva con tres dispersividades:

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \quad 1.36$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \quad 1.37$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} + D^* \quad 1.38$$

$$D_{xy} = D_{yx} (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_y}{|v|} \quad 1.39$$

$$D_{xz} = D_{zx} (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_z}{|v|} \quad 1.40$$

$$D_{yz} = D_{zy} (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_y v_z}{|v|} \quad 1.41$$

$$D_{ij} = (L^2 / T)$$

$\alpha_L$  = Dispersividad longitudinal del medio poroso (L).

$\alpha_{TH}$  = Dispersividad transversal horizontal (L).

$\alpha_{TV}$  = Dispersividad transversal vertical (L).

$v_x, v_y, v_z$  = Componentes cartesianas del vector velocidad

$$|v| = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} \quad \text{Magnitud del vector velocidad, (TL}^{-1}\text{)}$$

La dispersividad medida en laboratorio se expresa en cm, en cambio la macrosdispersión medida en campo es de centenares de metros.



El coeficiente de dispersión hidrodinámica depende de:

- 1) La dispersividad.
- 2) Gradiente de concentración.
- 3) Fuerzas externas actuando sobre el medio poroso que contiene al líquido, como ruido sísmico ambiental, bombeo, sismos, esfuerzos de superficie permanente, etc.
- 4) Variaciones en las propiedades del agua tales como densidad y viscosidad, las cuales afectan las rutas de flujo de agua subterránea.
- 5) Dirección del flujo, presión y temperatura de la fuente que introduce el soluto al sistema.
- 6) Granulometría, orientación, tamaño y forma de las partículas minerales del medio poroso.
- 7) Conductividad hidráulica del estrato en que se encuentra la fuente de masa, y de los estratos que sobreyacen y subyacen.
- 8) Cementante natural entre lo granos del medio poroso.
- 9) Porosidad efectiva.

Resultados experimentales muestran que en suelos la dispersión longitudinal  $\alpha_L$  depende del tamaño medio del grano mineral y el coeficiente de uniformidad  $U_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$  (Gelhar *et al.*

1992) encontraron que los valores más grandes de  $\alpha_L$  son de 250 m, también establecen en sus experimentos que la dispersividad transversal vertical es menos que la dispersividad transversal horizontal, (Klotz *et al.* 1980) determinaron que la dispersividad transversal es de 6 a 20 veces menor que la dispersividad longitudinal. (Lallemand-Barrés *et al.* (1978) determinaron que la dispersividad transversal es menor de 1/5 a 1/100 de la dispersividad longitudinal.

### I.2.3 Dispersión por capilaridad

En suelos de grano fino como arcillas y limos se forman conductos de radio muy pequeño  $r \rightarrow 0$  denominados vasos o conductos capilares se presenta la ascensión capilar del agua, la altura de ascensión capilar del agua depende del radio del conducto de acuerdo a la ecuación 1.42.

$$h_c = \frac{4T_s \cos \alpha}{\rho g d} \quad 1.42$$

$T_s$  = Coeficiente de tensión superficial 0.000074 N/m

$\alpha$  = Ángulo de contacto entre el agua y el suelo, aproximadamente  $\alpha = 0$

$d$  = Diámetro del conducto capilar, en arcillas los diámetros de los poros están comprendidos entre 0.1 a 0.001 de micra.

La franja de saturación capilar se inicia a partir del nivel freático su altura es irregular y depende de la distribución granulométrica del suelo.



Para determinar la altura de ascensión capilar mediante las propiedades del medio poroso existen varias expresiones, la más conocida es la de K, Terzaghi (1956):

$$h_c = \frac{C}{eD_{10}} \tag{1.43}$$

$$10 \leq C \leq 40mm^2$$

e = Relación de vacíos

$D_{10}$  = Diámetro efectivo del suelo, se obtiene de la curva granulométrica.

La propagación vertical del soluto depende solamente del radio del conducto, la velocidad de ascensión del agua es independiente del gradiente hidráulico del medio poroso.

El movimiento del agua por capilaridad también se presenta en sentido horizontal, por lo tanto la dispersión por capilaridad horizontal es un hecho presente en todo los procesos de propagación de solutos en suelos finos como arcillas o arcillas-limosas.

El volumen de agua que pasa por un conducto capilar es muy pequeño, pero téngase presente que en las arcillas la porosidad efectiva es aproximadamente 12%.

### I.3 Soluciones de la Ecuación de Transporte

Para el transporte de contaminantes en un espacio de tres dimensiones con velocidad constante lineal de flujo en dirección x, la ecuación de transporte de masas es:

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - R_f \lambda C \tag{1.44}$$

Esta ecuación puede resolverse por diferentes técnicas numéricas una de ellas es:

Fuente Puntual Instantánea (Shwartz, 2003)

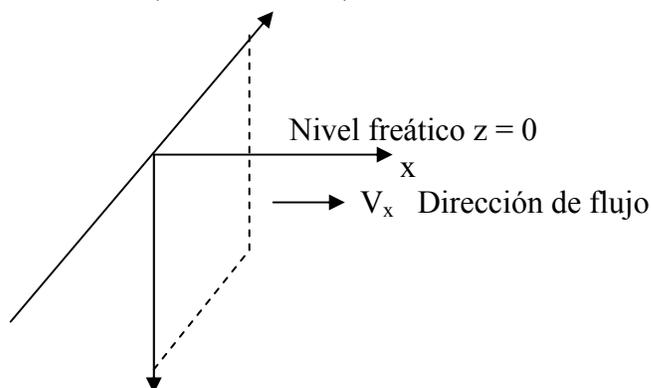


Figura 1.2. Geometría de una fuente puntual en un dominio de tres dimensiones.



Esta solución se aplica para el transporte de masa en tres dimensiones con Fuente Puntual Instantánea. Las condiciones de frontera descritas por la figura son:

$$M = M_0, \text{ At } x = 0, y = y_s, z = z_s \quad 1.45$$

$$C = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \text{ para } x = \infty \quad 1.46$$

con la condición inicial

$$C = 0, \text{ para } 0 < x < \infty \text{ y } t = 0 \quad 1.47$$

La solución es

$$C(x, y, z, t) = \frac{M_0}{nR_f} X_1 Y_1 Z_1 \quad 1.48$$

donde

$$X_1(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_x t / R_f}} e^{-\frac{(x-v_x t / R_f)^2}{4D_x t / R_f} - \lambda t} \quad 1.49$$

$$Y_1(y, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_x t / R_f}} e^{-\frac{(y-y_s)^2}{4D_x t / R_f}} \quad 1.50$$

$$Z_1(z, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_x t / R_f}} \left[ e^{-\frac{(z-z_s)^2}{4D_x t / R_f} - \lambda t} + e^{-\frac{(z-z_s)^2}{4D_x t / R_f}} \right] \quad 1.51$$

Donde  $M_0$  es la masa contaminante inicial,  $Atx = 0, y = y_s, z = z_s$  son las distancias de la fuente para calcular por el método un punto bajo el gradiente,  $y$  es la distancia lateral de la fuente en un punto calculado,  $z$  es la distancia del nivel freático para un punto calculado.

Solución Domenico-Robbins (Domenico, 1990)

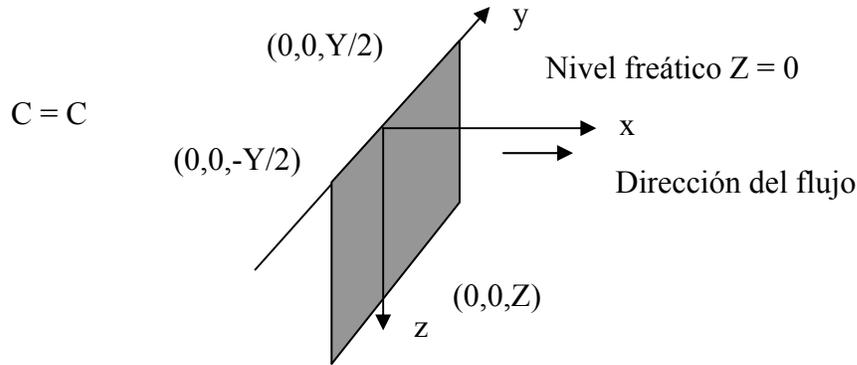


Figura 1.3. Geometría de un match source

Otra solución es la propuesta por Domenico (1987), que es una solución analítica aproximada para el transporte de masa en un campo de velocidad constante (dirección x) para la fuente continua, de geometría regular. La fuente contaminante comienza en el nivel freático y se extiende hacia abajo. Tiene un ancho y y una altura z con una concentración de  $C_0$ .

La solución es:

$$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_2$$

donde

$$X_2(x, t) = \frac{C_0}{2} e^{\frac{xv_x}{2D_x} \left[ 1 - \left( 1 + 4\lambda D_x / v_x \right)^{1/2} \right]} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - v_x t / R_f \left( 1 + 4\lambda D_x / v_x \right)^{1/2}}{2 \sqrt{D_x t / R_f}} \right] \quad 1.52$$

$$Y_2(y, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{y + y/2}{2 \left( D_y x / v_x \right)^{1/2}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{y - Y/2}{2 \left( D_y x / v_x \right)^{1/2}} \right] \right\} \quad 1.53$$

$$Z_2(z, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{z + Z}{2 \left( D_z x / v_x \right)^{1/2}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{z - Z}{2 \left( D_z x / v_x \right)^{1/2}} \right] \right\} \quad 1.54$$

Donde  $v_x$  es la velocidad lineal del agua subterránea. Para  $\lambda = 0$ , en la ecuación 1.55 según lo demostrado por Domenico y Robbins (1985) se reduce a:

$$C(x, y, z, t) = X_3 Y_2 X_2 \quad 1.55$$

con

$$X_3(x, t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - v_x t / R_f}{2 \sqrt{D_x t / R_f}} \right) \quad 1.56$$

Solución AT123D (Yeh, 1981)

La tercera Solución a un problema del transporte de masas para una fuente puntual instantánea, con un flujo de masa bajo las mismas condiciones iniciales y de frontera es:

$$C(x, y, z, t) = \int_0^1 \iiint_{R_0} MG(x, y, z, t; \xi, \zeta, \eta, \tau) d\xi, d\zeta, d\eta, d\tau \quad 1.57$$

Donde M es la fuerza de la fuente, G es la función Green del problema, t es el tiempo, t<sub>1</sub> es la duración de la fuente, R<sub>0</sub> es la región de la fuente, x, y y z son las coordenadas del sistema.

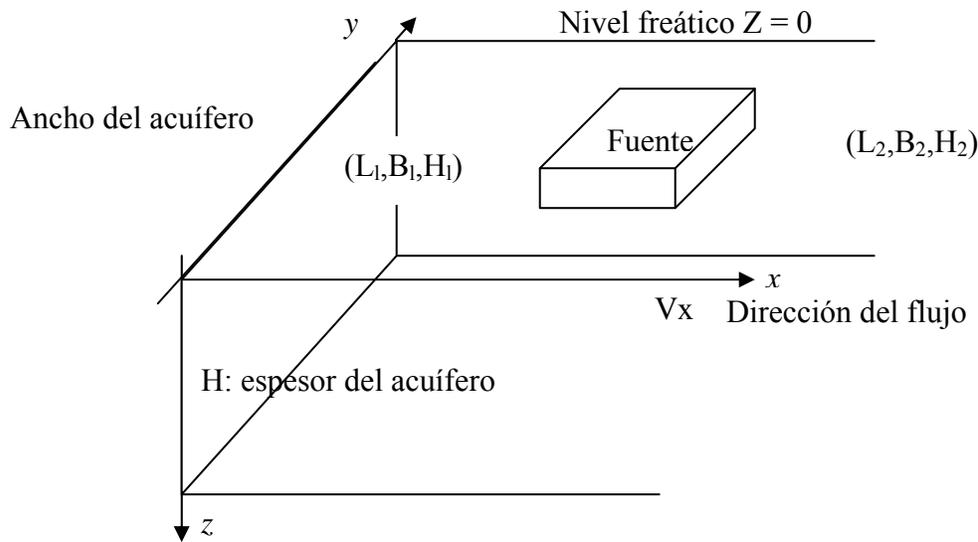


Figura 1.4. Especificaciones de la geometría del acuífero y de la fuente usada en el código AT123D.

Yeh (1981) utilizó el esquema de la función Green para derivar una solución tridimensional para fuentes de geometría rectangular. La fuente del contaminante se asume como un bloque rectangular con coordenada inicial (L1, B1, H1) y una coordenada final (L2, B2, H2). El grueso y la anchura del acuífero son B y H respectivamente. La integración geométrica se requiere solamente sobre la coordenada del tiempo para una fuente no-instantánea. La solución es



$$C(x, y, z, t) = \begin{cases} \int_0^1 \frac{M_1}{nR_f} F_x(x, t, \tau) F_y(y, t, \tau) F_z(z, t, \tau) d\tau, t < T \\ \int_0^T \frac{M_1}{nR_f} F_x(x, t, \tau) F_y(y, t, \tau) F_z(z, t, \tau) d\tau, t > T \\ \frac{M_0}{nR_f} F_x(x, t, 0) F_y(y, t, 0) F_z(z, t, 0), \text{ Una fuente instantánea} \end{cases}$$

Donde  $M_1$  es razón de masa por tiempo ( $MT^{-1}$ ),  $M_0$  es la masa contaminante,  $n$  es la porosidad,  $R_f$  es el factor de retardación,  $T$  es la duración de la fuente, y  $F_x, F_y, F_z$  son la integración de las funciones de Green dentro de la fuente en las direcciones  $x, y, z$  respectivamente.

El medio poroso es un materia de dos fases, la matriz sólida y los espacios vacíos, ambas fases tienen características geométricas microscópicas aleatorias, los espacios vacíos pueden estar intercomunicados o aislados.

Los principales parámetros del medio poroso para el estudio del flujo de agua subterránea y transporte de masa son: porosidad volumétrica, porosidad efectiva, granulometría, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento específico y geometría del medio.

#### Fase $\alpha$

El medio poroso puede contener en sus espacios vacíos materiales de fase líquida o gaseosa, cada fase se denomina fase  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ . En el medio poroso puede haber varias fases líquidas inmiscibles cada una separada por su frontera y ocupando una porción del espacio vacío, en esta condición es un medio poroso multifásico.

$$V_{\alpha_1} \cap V_{\alpha_2} \cap V_{\alpha_3} \cap \dots \cap V_{\alpha_n} = 0$$

donde

$$V_{\alpha_n} = \text{Volumen de cada fase}$$

El grado de saturación de una fase es la relación entre el volumen de una fase y el volumen de vacíos:

$$G_{s\alpha} \% = \frac{V_{\alpha}}{V_v} (100) \tag{1.58}$$

En un medio poroso pueden existir varias fases líquidas: agua, aceite, gasolina, petróleo, o también puede existir una sola fase producto de la mezcla de varios líquidos miscibles.



Cada fase  $\alpha$  puede tener varios componentes, un componente es una especie con estructura química homogénea identificable. Ejemplo, el agua puede contener bicarbonatos, gases disueltos como el sulfuro de hidrogeno  $H_2S$  etc.

La porosidad efectiva o cinemática es donde ocurren los procesos de flujo de agua y transporte de masa, determina la velocidad de filtración, la cual controla el transporte advectivo, se define por:

$$n_e = \frac{V_{vi}}{V_t} \% \quad 1.59$$

$V_{vi}$  = Volumen de vacíos comunicados.

$V_t$  = Volumen de la muestra.

La porosidad efectiva es menor o igual que la porosidad volumétrica  $n_e \leq n$ .

Volumen Elemental Representativo (VER) de un medio poroso

Para determinar las propiedades hidrogeológicas medias del medio poroso se debe seleccionar un volumen elemental representativo (VER). El VER es el volumen mínimo en que las propiedades hidrogeológicas de interés son constantes. El tamaño del volumen elemental representativo puede variar de acuerdo al tipo de roca o suelo en estudio, también puede variar de acuerdo a la propiedad o propiedades de interés que se estén midiendo. Para seleccionar la magnitud del VER no existe un volumen determinado para cada tipo de medio poroso sino que, el tamaño mínimo del VER para que no varíe ninguna propiedad intensiva debe cumplir (Bear, 1991):

$$\frac{\partial n(x, y, z)}{\partial V} = 0 \quad (x \in V), (y \in V), (z \in V)$$

Donde

$n$  = Porosidad volumétrica

$V$  = Volumen elemental representativo.

#### I.4 Coeficiente de almacenamiento específico

La simulación de flujo transitorio requiere datos sobre el coeficiente de almacenamiento específico para acuíferos confinados y de la porosidad efectiva para acuíferos no confinados.

Cuando se tiene una sucesión estratigráfica, es más conveniente trabajar con propiedades homogéneas equivalentes que representan a la sucesión estratigráfica en su conjunto, el coeficiente de almacenamiento específico promedio equivalente para un medio formado por  $n$  capas (Cheng, 2000), está dado por:



$$S_s = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n S_{s(i)} b_i \quad 1.60$$

donde  $b$  es el espesor total del acuífero.

### I.5 Coeficiente de transmisividad

El coeficiente de transmisividad para un acuífero homogéneo se define por:

$$T = Kb$$

donde

$b$  = Espesor saturado del acuífero

$K$  = Conductividad hidráulica

En un medio poroso formado por  $n$  capas horizontales el coeficiente de transmisividad equivalente se determina por:

$$T = Kb = \sum_{i=1}^n b_i K_i = \sum_{i=1}^n T_i \quad 1.61$$

### I.6 Propiedades intensivas y extensivas de un medio continuo

Para su modelación el medio poroso se considera un medio continuo o macroscópico. A los elementos de un medio macroscópico o continuo se les denomina partículas. Considérese un medio continuo para un tiempo  $t$  cualquiera, cada partícula  $X \in B$  ocupa una posición en el espacio  $R^3$ .

Las coordenadas  $x$  de la  $i$ ésima partícula  $X$  están dadas en tiempo  $t$  por

$$x_i = p(X_i, t) \quad 1.62$$

Las propiedades que identifican a un sistema macroscópico se dividen en extensivas e intensivas. Las propiedades extensivas son aquellas cuyo valor depende la cantidad de materia presente, como masa, peso y cantidad de calor entre otras. Las propiedades intensivas son aquellas cuyo valor no depende de la cantidad de materia presente, como por ejemplo, calor o temperatura. Una propiedad intensiva  $\Pi$ , está definida para cada tiempo y para cada partícula y puede ser escalar o vectorial. Las propiedades intensivas se pueden describir de dos maneras diferentes; en términos Lagrangianos o en términos Eulerianos. Sea un medio continuo con una propiedad  $\Pi$ , si la función  $\Phi(X_i, t)$  representa el valor de la propiedad  $\Pi$  en la partícula  $X$  y en el tiempo  $t$ . Entonces la función  $\Phi(X_i, t)$  es la descripción Lagrangiana de la propiedad  $\Pi$ .

Si la función  $\psi(x_i, t)$  representa el valor de la propiedad  $\Pi$  en el punto  $x$  y en el tiempo  $t$ . Entonces la función  $\psi(x_i, t)$  es la descripción Euleriana de la propiedad intensiva  $\Pi$ . Si se



considera una partícula  $X$  en la coordenada  $x$  en un tiempo  $t$ , entonces la descripción Lagrangiana y Euleriana deben ser iguales y se expresan como:

$$\Phi = (X_i, t) = \psi(p(X_i, t), t) \quad 1.63$$

En todo tiempo existe una correspondencia biunívoca ente puntos materiales y puntos del espacio físico. La condición necesaria y suficiente para la existencia de funciones inversas es que el determinante Jacobiano, cuyos elementos son:

$$J_{ij}(x, t) = \frac{\partial p_i}{\partial X_j}(X, t) \quad 1.64$$

sea no singular, es decir

$$J = \left| \frac{\partial x_i}{\partial X_i} \right| \neq 0 \quad 1.65$$

## CAPITULO II. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

La integración de la información a partir de los reportes de la Comisión Nacional del Agua (CNA, ahora llamada CONAGUA) así como del Consejo de Recursos Minerales (COREMI, ahora llamado Servicio Geológico Mexicano, SGM) aporta los datos geológicos y geográficos necesarios para el estudio. Para la modelación de procesos geofísicos, una de las partes fundamentales es la descripción geológica del modelo. El flujo del agua a describir está inmerso en un medio poroso, por lo que su comportamiento dependerá del material del cual esta formado.

### II.1 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio en coordenadas UTM esta acotada al 746300 – 816000 mE y 2144000 – 2080200 mN, con una extensión de 4446.86 km<sup>2</sup> (figuraII.1), está formada por dos zonas hidrológicas, la primera es el acuífero "Costera de Veracruz", área que forma parte de la región hidrológica No. 28 "Papaloapan" en la subregión centro, cuya escurrimiento superficial se conforma por ríos de régimen permanente, e intermitentes y diversas lagunas; el segundo acuífero "Cotaxtla" es cruzado de oeste a este por los ríos Jamapa y Cotaxtla los cuales vierten finalmente al Golfo de México (CNA 2002).

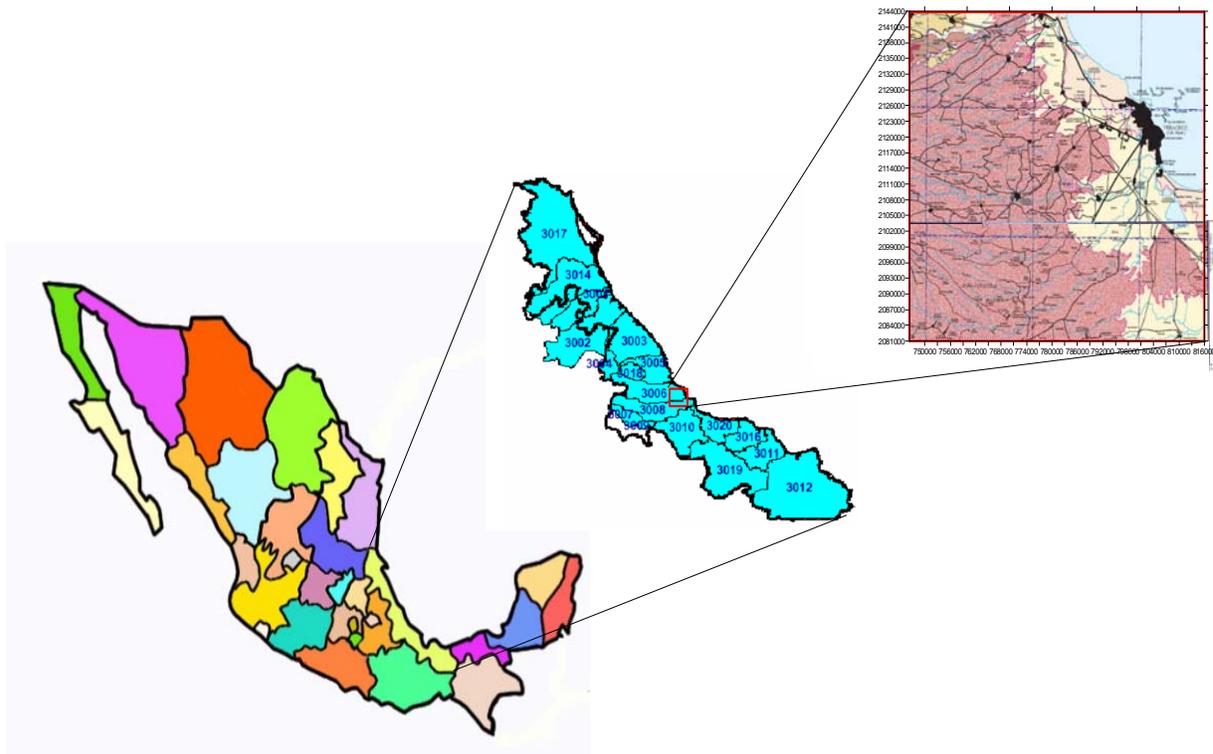


Figura II.1 Ubicación de la zona de estudio esta entre dos acuíferos, Costera e Veracruz y Cotaxtla



## II.2 Geología histórica

La Sierra Madre Oriental y las zonas adyacentes están constituidas principalmente por rocas sedimentarias que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento. La Sierra Madre Oriental, constituye una faja montañosa orogénica que sigue en su segmento sur una trayectoria general noroeste-suroeste.

El basamento presente en la región de Huayacocotla se observa en afloramientos aislados que constituyen ventanas dentro de la secuencia mesozoica plegada. En esta localidad las rocas se encuentran expuestas en el núcleo de un gran anticlinorio, cuyos flancos están compuestos de una gruesa secuencia sedimentaria mesozoica. Aquí el paleozoico está conformado por una secuencia metamórfica de gneiss, esquistos y metaconglomerados, probablemente pertenecientes a la parte inferior de esta era, y por una secuencia flysch de más de 2,000 m de espesor de edad Pérmica.

El triásico está representado por lechos rojos pertenecientes a la Formación Huizachal que atestiguan un prolongado período de emersión para esta porción del país que se originó con posterioridad a las deformaciones orogénicas del Paleozoico.

Durante el inicio del Jurásico continuó en la mayor parte de esta porción de México una actividad continental con sedimentación de capas rojas, salvo en la región del anticlinorio de Huayacocotla, en donde tuvo lugar un avance de los mares que propició la sedimentación marina de una secuencia arcillo-arenosa que Carillo Bravo (COREMI, 1994), llamó Cuenca Liásica de Huayacocotla. Esta secuencia sedimentaria nombrada Formación Huayacocotla, se deformó a finales del Jurásico Inferior para que volviera a predominar en toda la región la sedimentación continental durante el Jurásico Medio.

Durante el Jurásico se generalizan en todo el norte y el noroeste de México una transgresión marina que Tardy (1980), relacionó con la apertura occidental del mar de Tethys durante la disgregación del supercontinente Pangea.

Pilger (1981), señala que en la apertura del Atlántico, tal vez supondría que las transgresiones marinas de la primera mitad del Mesozoico pudieran venir de el pacífico más que del este.

La cuenca Mesozoica desarrollada en la zona de la mesa central y la Sierra Madre Oriental la consideran por numerosos autores como un geosinclinal, en el sentido de un cinturón lineal de hundimiento en donde se acumularon considerables espesores de sedimentos, durante el Jurásico Superior, en esta región se encontraba una gran entrante de mar bordeada por tierras positivas, excepto en el Sureste, en la zona correspondiente al estado de Veracruz. (COREMI, 1994)

Las ideas del Schmidt-Effing (1980), sobre la presencia de un aulacógeno en el área de Huayacocotla durante el Jurásico Inferior, sugieren la posibilidad de que esta porción del país haya evolucionado como un sistema de aulacógenos durante la primera mitad del Mesozoico; es decir como una serie de depresiones tectónicas asociadas al inicio de la expansión del Atlántico, que fueron invadidas por los mares. La constante actividad de estas fosas ocasionó



cambios drásticos en la batimetría, lo que provocó que en ciertas zonas se depositaran secuencias pelágicas asentadas en corteza continental sin que se lograra consumir un proceso de oceanificación.

Durante la primera parte del Cretácico Inferior (Neocomiano-Aptiano) ocurrieron depósitos de mar abierto en el antiguo Golfo de México (Formación Tamaulipas Inferior); pero durante el Albiano se desarrolló una transgresión marina que cubrió los últimos elementos positivos desbordándose sobre la porción occidental de México (Rangin y Córdoba 1976 EN COREMI, 1994).

En el inicio del Cretácico Superior cambió de manera drástica el régimen de sedimentación en el oriente de México con el aporte de sedimento detrítico proveniente del occidente en donde tenía lugar un levantamiento asociado a la actividad volcánica y plutónica. Durante esta época los mares se retiran paulatinamente hacia el oriente con deltas progradantes.

Las primeras manifestaciones de las deformaciones orogénicas de los inicios del Cenozoico son los depósitos del tipo flysch, asociados a los deltas progradantes del Cretácico Superior y las antefosas formadas en el área de Chicotepec (Paleoceno), en donde se depositaron grandes secuencias de terrígenos en aguas profundas, con estas deformaciones empieza la edificación de la Sierra Madre Oriental y se inicia la historia continental de gran parte de este sector del país. En el antiguo Golfo de México se individualizaron durante el Terciario dos cuencas sedimentarias principales, la cuenca de Burgos y la cuenca de Tampico-Tuxpan, en las que se desarrollan una potente secuencia de sedimentos marinos areno-arcillosos. Estas cuencas se encuentran limitadas principalmente por estructuras orogénicas de principio del Cenozoico.

La actividad plutónica en el estado de Veracruz fue muy incipiente durante el Cenozoico y sólo se reconocen plutones aislados al noroeste, en la región de Huayacocotla y en la región de Tatatila – Las Minas. En cuanto la actividad volcánica comenzó a fines del Terciario y continuó hasta el Cuaternario, originando depósitos que cubrieron gran parte de las porciones noroeste, centro y sureste de la entidad, en las regiones de Huayacocotla, Macizo de Teziutlán y Macizo de San Andrés Tuxtla (COREMI,1994). La llanura costera de Veracruz está conformada en gran parte por material volcánico que es erosionado y transportado, el Acuífero de Costera de Veracruz está conformado por grabas y arenas provenientes de estas rocas.

### **II.3 Marco tectónico**

La zona de estudio se encuentra en la Cuenca de Veracruz que se localiza al oriente de la plataforma de Córdoba, está limitada al norte por el Macizo de Teziutlán, al poniente y suroeste por los pliegues del geosinclinal mexicano, al oriente por la Cuenca Salina del Istmo, el Macizo de San Andrés y la Antefosa de Chiapas, y al noreste por el Golfo de México.

La secuencia está constituida por sedimentos marinos depositados desde el Paleoceno al Mioceno, con fuertes discordancias, siendo la principal la que deja en contacto sedimentos del Eoceno Tardío sobre los del Eoceno Temprano y Medio, Paleoceno e incluso sobre el Cretácico (Figura II.2).

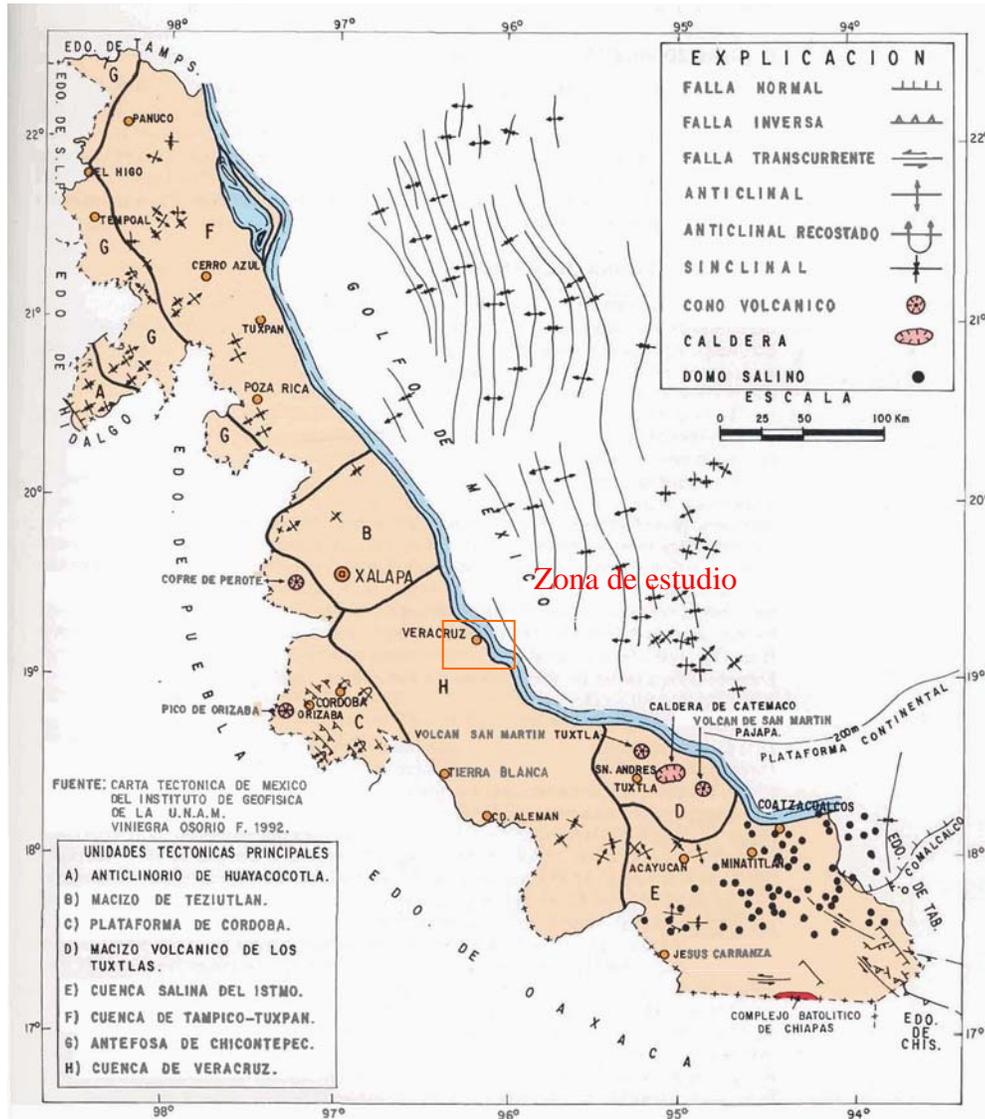


Figura II.2 Marco tectónico (Monografía Geológico-Minera COREMI 1994)

A su vez la zona es parte de la Provincia de la Llanura Costera del Golfo Sur (Figura II.3), esta provincia a diferencia de la del Golfo Norte, es un llanura costera de fuerte aluviamiento por parte de los ríos más caudalosos del país tales como el Papaloapan y el Coatzacoalcos, la mayor parte de su superficie, con excepción de la región de los Tuxtlas, está muy próxima al nivel del mar y cubierta de material aluvial (COREMI, 1994).

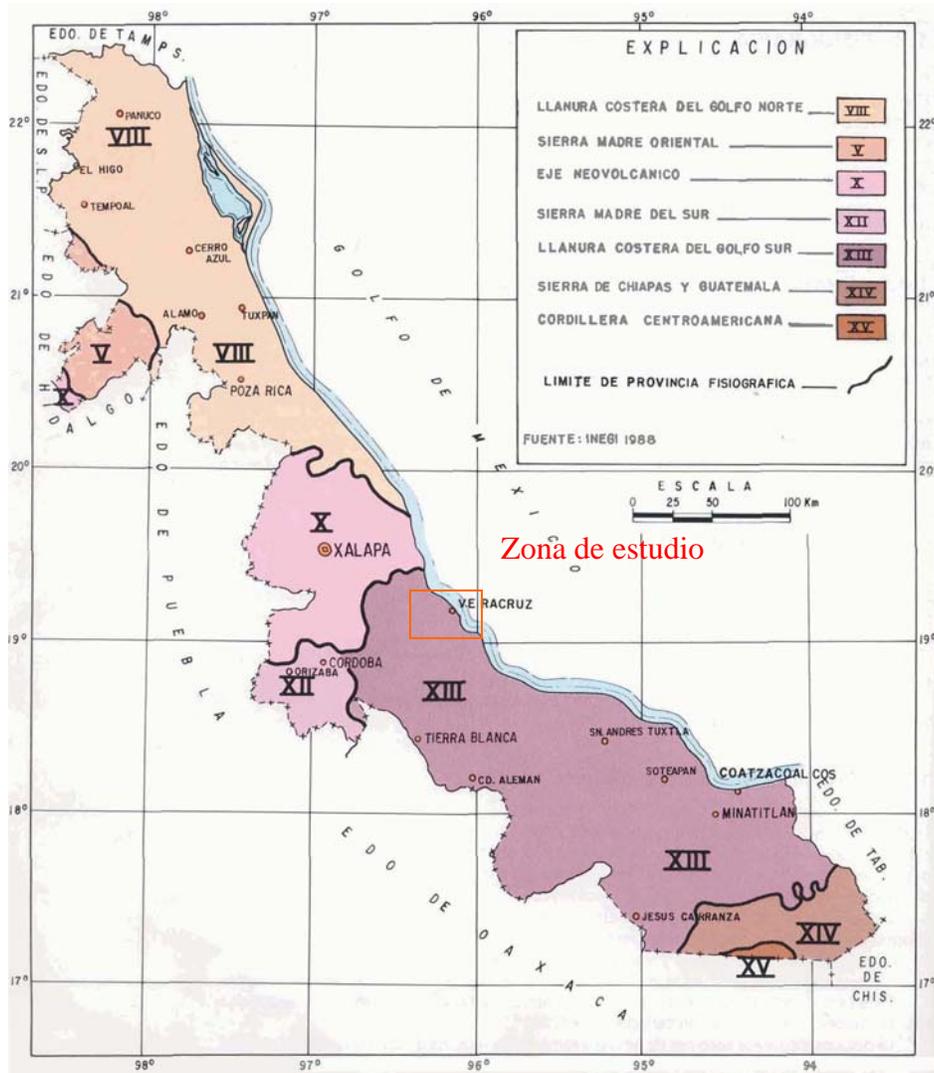


Figura II.3 Fisiografía (Monografía Geológico-Minera COREMI 1994)

## II.4 Columna estratigráfica

El edificio geológico está representado por un basamento de roca plutónica y metamórfica del Paleozoico Superior y una secuencia sedimentaria de tipo flysch (Formación Guacamaya), que aflora en la porción noroccidental del estado. La Formación Guacamaya está sobreyacida por unidades mesozoicas. Sedimentos clásticos del Triásico Superior y rocas volcánicas, que en el Terciario Superior y Cuaternario están constituidos por derrames de basaltos, andesitas y tobas riolíticas, así como por depósitos de arenas, gravas, arcillas y limos (Figura II.4).

La actividad ígnea que se inicia a fines del Cretácico, se manifiesta por intrusiones de composición ácida e intermedia (granitos y granodioritas), que afectan a rocas jurásicas y Cretácicas, principalmente en las regiones de Tatatila, Las Minas y Huayacocotla.

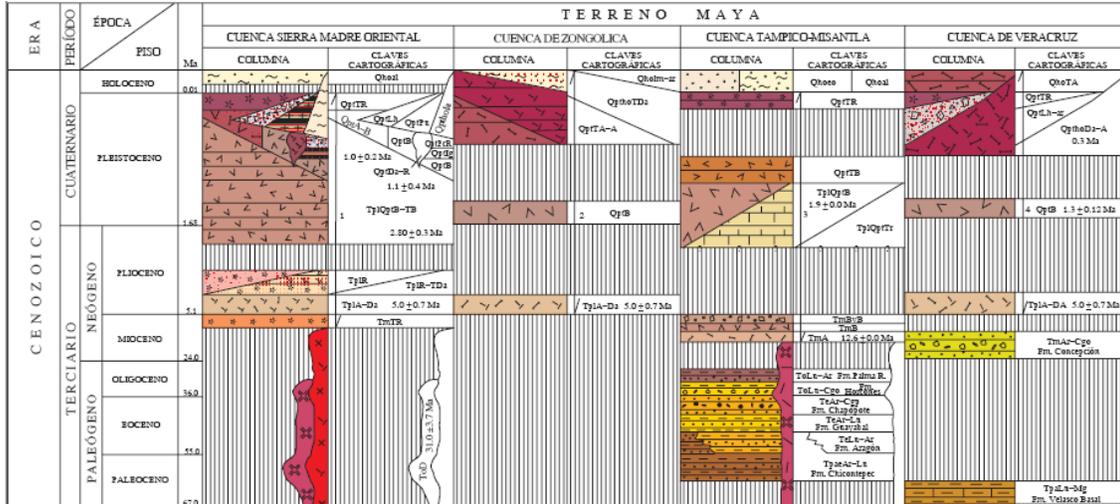


Figura II.4 Columna estratigráfica (tomada de Carta Geológico Minera SGM 2002)

## II.5 Estratigrafía

El área se caracteriza por estar constituida por lutitas y areniscas del Paleoceno al Oligoceno, además de material volcánico, los que en su conjunto forman una amplia planicie.

Así, se tienen cartografiadas tres unidades geológicas, cuya descripción es la siguiente:

### Lahar-Arena (QptLh-ar)

Corresponde a un depósito granular no consolidado de gravas y arenas con algunos estratos arcillosos y otros de boleas de composición andesítica. Su ocurrencia obedece principalmente por la erosión fluvial sobre rocas volcánicas y vulcanoclásticas que afloran al oeste y fuera del acuífero Costera de Veracruz, las que fueron erosionadas y cuyos fragmentos fueron transportados y depositados, originando un material heterogéneo y de porosidad primaria. Se encuentra aflorando en las porciones norte, centro y oeste de la superficie del acuífero, siendo también de espesor variable.

### Aluvión (Qhoal)

Material que resulta de la alteración y erosión de rocas o materiales preexistentes, localizados en zonas bajas y áreas de inundación. Se constituyen por material heterogéneo con predominancia arcillosa. Se encuentra aflorando en la porción central del acuífero.

### Depósitos eólicos (Qhoeo)

Están formados por arenas de grano fino transportado por el viento, presentando estratificación cruzada. Se observan en la porción noreste del acuífero y hacia el noroeste del puerto de Veracruz, formando lomeríos suaves y alargados de altura variable.



CNA determinó la estratigrafía de las zonas de Jamapa y Cotaxtla, a partir de 70 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) de los cuales, 40 se realizaron en el año 1981 y 30 se reinterpretaron de estudios anteriores.

Como resultado de estos sondeos en general se detectaron cuatro capas con resistividades variables que se asociaron a grupos de materiales con un comportamiento similar.

La primera capa es un paquete homogéneo con resistividades comprendidas entre los 20 Ohm - m y 60 Ohm - m, y espesores variables entre 20 m y 40 m y que corresponden a un material saturado y que constituye parte del acuífero de la región.

La segunda capa está formada por materiales con resistividades medias de 15 Ohm - m con espesores entre los 8 m y 96 m y que corresponden a intercalaciones de arcillas y arenas que no presentan continuidad en los perfiles.

La tercera capa tiene resistividades entre los 28 Ohm-m y 70 Ohm-m, con espesores desde 20 a 150 m y corresponde a aglomerados constituidos por gravillas y arenas de buena permeabilidad, presentando continuidad en los perfiles.

La cuarta capa se localiza desde 30 hasta 212 m con resistividades de 1.5 a 25 Ohm-m, que se asocia a materiales de baja permeabilidad localizada en la parte baja de todas las secciones y que constituyen el basamento del acuífero.

La suma de los espesores de las tres primeras capas constituye el acuífero de la región, el cual presenta un adelgazamiento de su espesor de hasta 50 m hacia la línea costera, una unidad de gravas y arenas tiene una amplia distribución en el subsuelo, mientras que los depósitos arenociliosos predominan hacia la costa (CNA, 2002).



### Capítulo III. HIDROGEOLOGIA

#### III.1 Introducción

De acuerdo con la zonificación de la CONAGUA la zona de estudio está comprendida en la región hidrológica RH-28 “CENTRO”, abarca gran parte de la porción centro-sur de Veracruz. Las corrientes que la integran tienen una disposición radial y paralela, controlada por algunas elevaciones de la Sierra madre Oriental y el Eje Neovolcánico (el Cofre del Perote y el Pico de Orizaba), así como por otros aparatos volcánicos y Sierras plegadas. Las cuencas que la forman son: Papaloapan y Jamapa y están compuestas por rocas sedimentarias marinas. Siendo la primera una de las tres más importantes del país. Su principal afluente superficial es el río papaloapan, que tiene su origen en las serranías oaxaqueñas, donde los ríos Tonto y Santo Domingo lo forman.

El río Jamapa, escurrimiento del cual toma el nombre la cuenca, nace en las faldas del Pico de Orizaba con la denominación de Pantepec.

En la zona norte de la región se encuentra el distrito de riego La Antigua y Actopan, que se abastece de los ríos Jamapa, San Juan Pacaya, Santa María y Actopan.

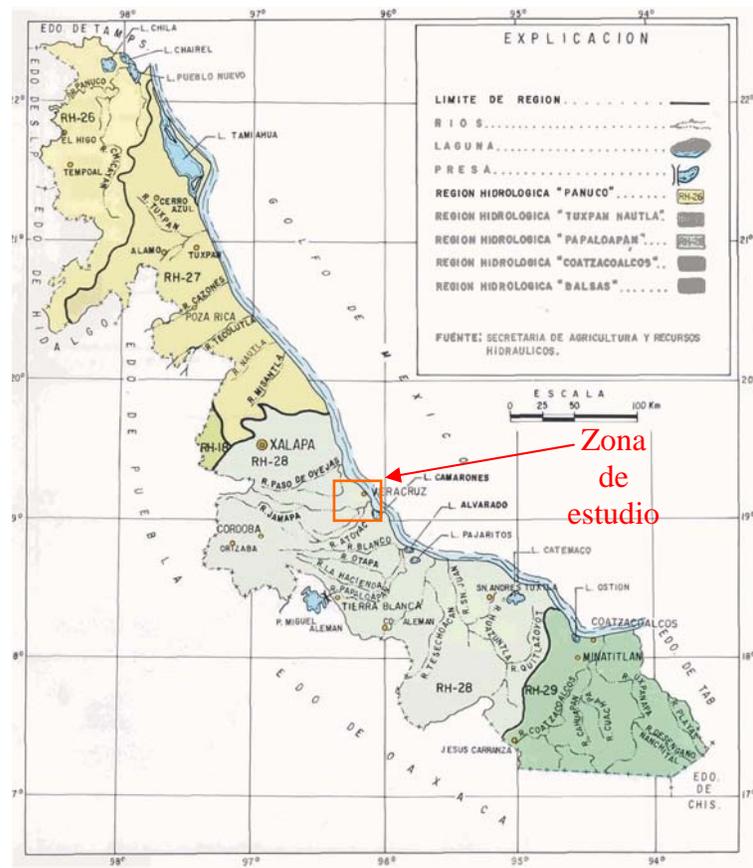


Figura III.1 Hidrología de aguas superficiales (Tomada de Monografía Geológico-Minero COREMI, 1994)

Esta región se divide en varios sectores o regiones geohidrológicas, según CONAGUA la zona de estudio se encuentran dentro de la región denominada “CENTRO” (Figura III.2).

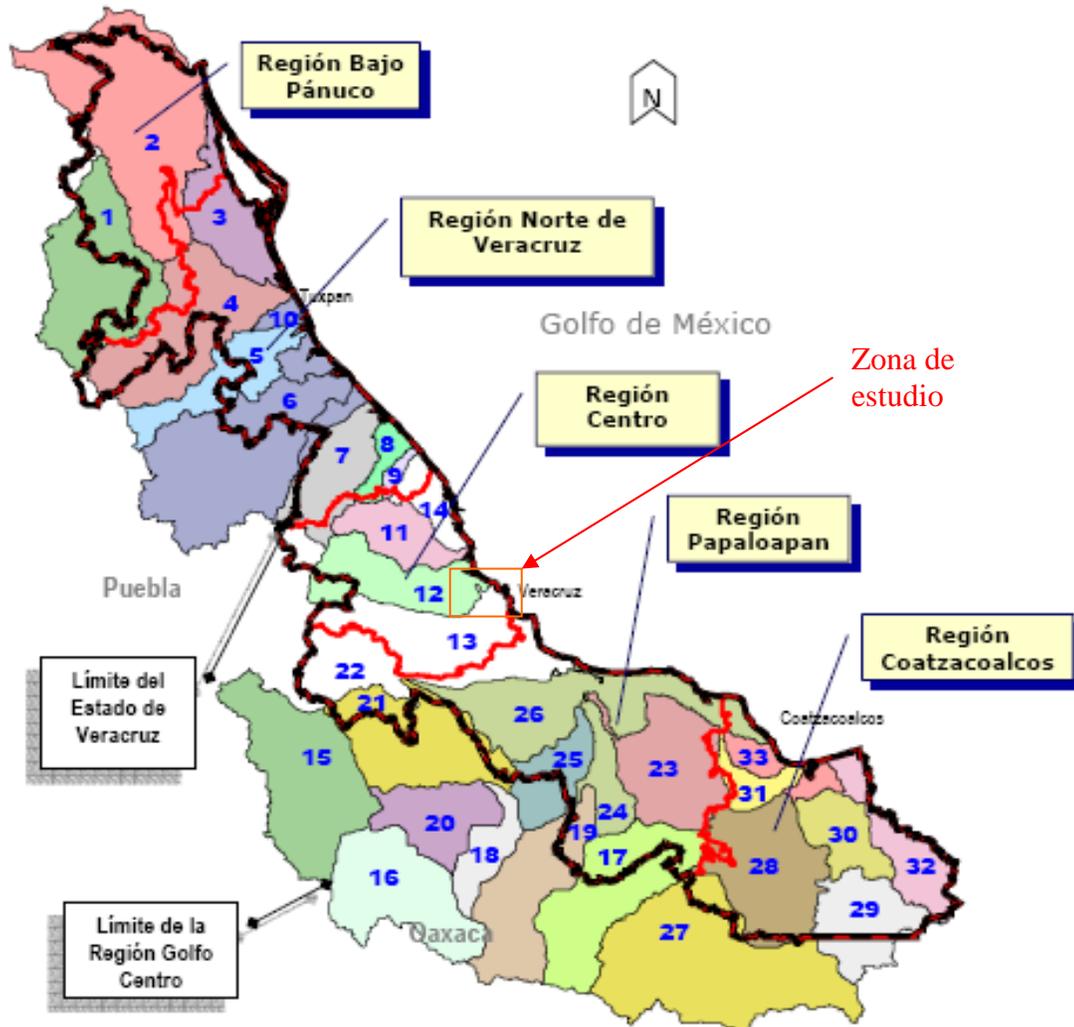


Figura III.2 División de las regiones Hidrológicas (CNA 2002)

### III.2 Tipo de acuífero

El acuífero Costera de Veracruz, se encuentra alojado en material granular no consolidado, presenta un funcionamiento hidráulico del tipo libre. La unidad hidrogeológica más importante (Qhoal) esta clasificada como gravas y arenas, de porosidad primaria y de una buena permeabilidad, la que dependerá del contenido de arcillas y grado de compactación del material. Por otra parte el acuífero Cotaxtla en general es de tipo libre con semi-confinamientos locales originados por discontinuidades en el material de una transmisibilidad



media tendiendo a disminuir con dirección hacia la línea costera donde de acuerdo con la información de pozos, se extiende desde el borde oriental de la sierra y hasta la línea costera, diferenciándose granulométricamente de un sitio a otro, ya que conforme se acerca a la costa, los fragmentos de rocas son más finos. El espesor de los estratos que conforman el acuífero fue caracterizado por medio de métodos eléctricos, delimitándose a 300 m.

La recarga principal proviene de la infiltración de la precipitación pluvial en la zona, de aquellas áreas consideradas como cuencas endorréicas, así como por flujo horizontal subterráneo en dirección perpendicular a la línea de costa viajando de las partes altas de los valles y descargando al Golfo de México, siendo interceptado parte de este flujo por los conos de depresión de la zona urbano-industrial de Veracruz. En la región sureste de Cotaxtla, se establece un drenado del acuífero hacia los ríos de Jamapa y Cotaxtla (CNA, 2002).

Los ríos Jamapa y La Antigua también favorecen la recarga de los acuíferos, están en las fronteras laterales de la zona costera de Veracruz, no son límites geohidrológicos, estos son de tipo geográfico ya que el acuífero Costera de Veracruz y Cotaxtla (Figura III.3) son una sola entidad geohidrológica con una completa interacción entre ellos.

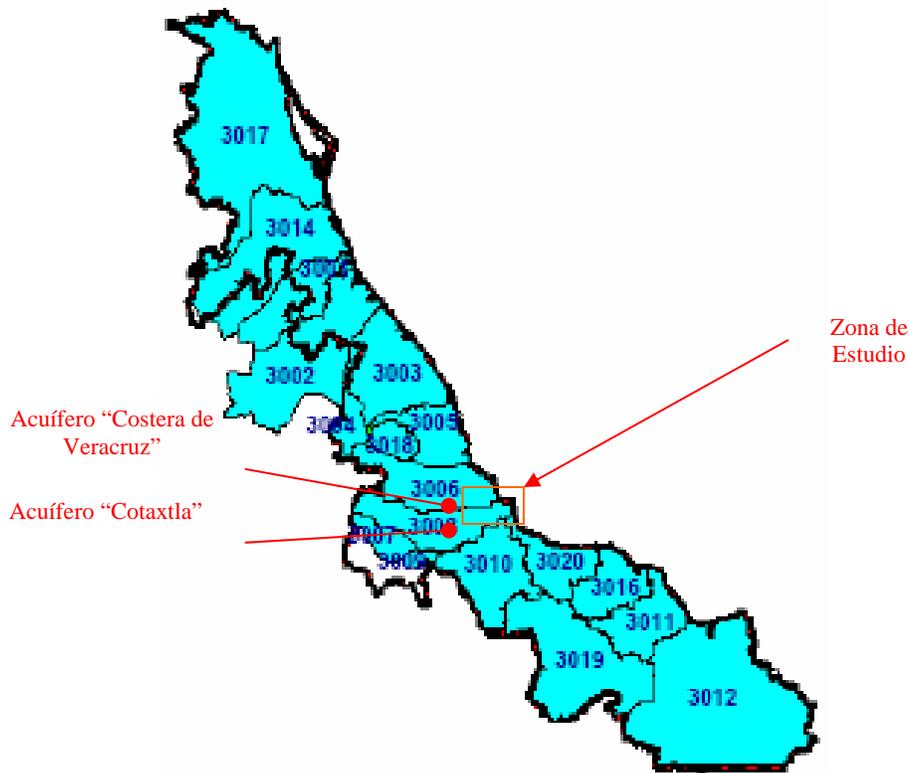


Figura III.3 Zonificación de acuíferos (CNA 2002)



### III.3 Parámetros hidráulicos

En 1982, CNA realizó un estudio de transmisividad y determinación del coeficiente de almacenamiento, a través de pruebas de bombeo realizadas en varios pozos de la zona. Respecto al valor de la transmisividad, se puede mencionar que hacia el oeste varía de  $40$  a  $45 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ; en la porción central es de  $10$  a  $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  y conforme se acerca a la línea de costa la transmisividad disminuye de  $10 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  hasta  $1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

De esta manera, se puede establecer que la unidad de gravas y arenas tiene un valor de  $15$  a  $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  en la parte mas alta correspondiente a la Sierra Madre Oriental, los depósitos de llanura de inundación de  $10$  a  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  entre la Sierra Madre Oriental y la costa y por ultimo las dunas de la costa con un valor de  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Con respecto al coeficiente de almacenamiento del acuífero, se determinó un valor de  $0.085$  para el de gravas y arenas y  $0.025$  para las dunas. Los parámetros utilizados son validos para un modelo actual tomando en cuenta que la geología no cambia en el corto plazo.

### III.4 Nivel estático

La profundidad del nivel estático fue obtenida por CNA en 1992 a partir de 26 medidas, el acuífero “Costera de Veracruz” presenta variaciones ocasionadas por las estaciones climáticas, es decir que el acuífero se recarga durante periodos de lluvia y en estiaje pierde agua de almacenamiento, es decir presenta un cambio negativo. Los periodos que son del mes de febrero a mayo se considera de estiaje y también del mes de noviembre a febrero, posterior al período de lluvias, mientras que de julio a octubre son considerados como época de lluvias.

De manera general la profundidad del nivel estático cercano a la costa es entre  $2$  y  $5$  m, en el área industrial de  $15$  a  $20$  m siendo más profundo hacia la zona de Soledad de Doblado, entre  $50$  y  $60$  m en las localidades de Piedras Negras y Tlalixcoyan pertenecientes al acuífero de Cotaxtla, se observan niveles someros que corresponden a las norias existentes en la zona, donde la profundidad del nivel estático se encuentra entre  $1.5$  m y  $3.0$  m. Por otro lado, en los pozos profundos los niveles se presentan entre los  $20$  m y los  $30$  m (figura III.4)

Se observa una caída en el nivel estático dentro de la ciudad de Veracruz, se pueden apreciar dos zonas de una menor profundidad de nivel estático en Manlio F. Altamirano y Mata Loma.

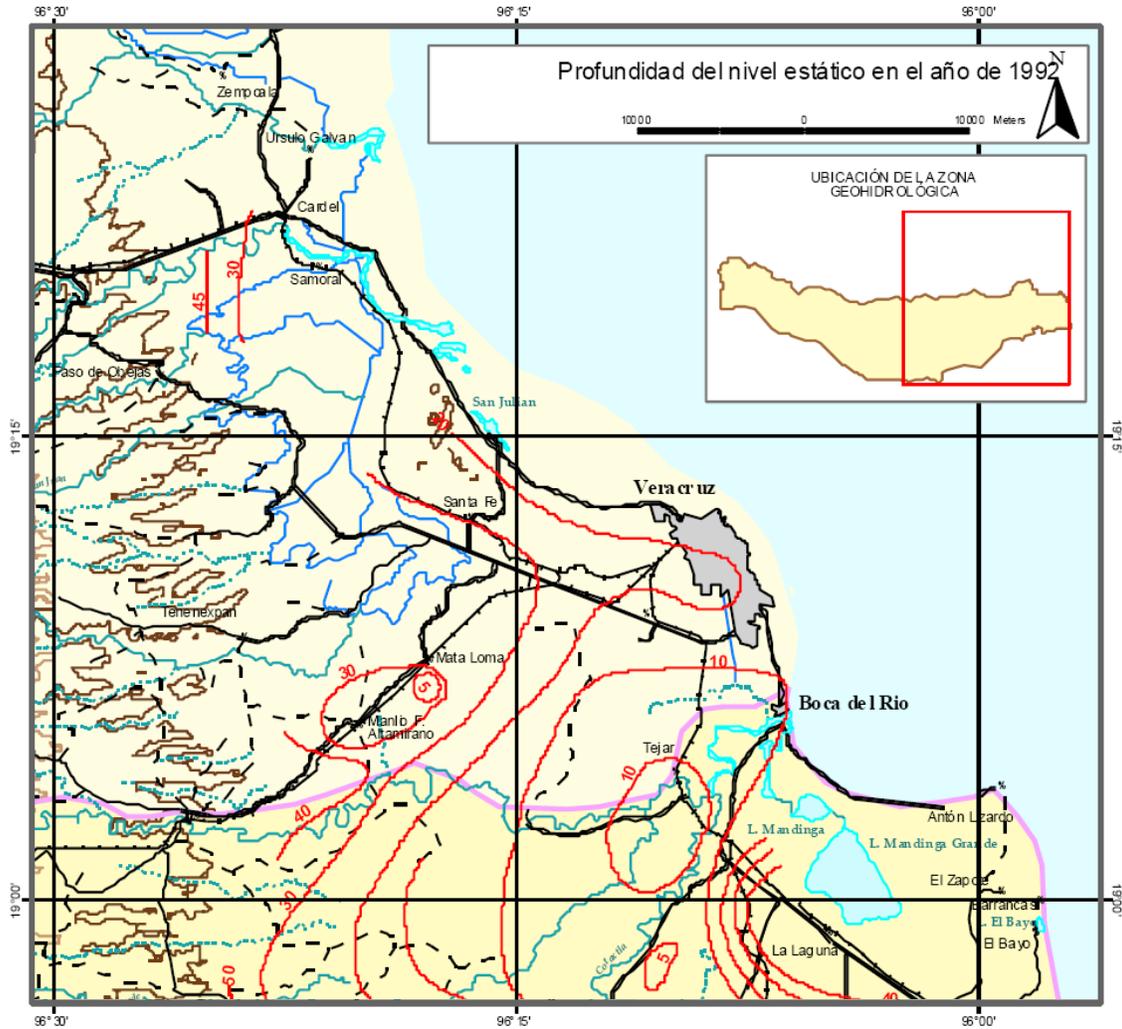


Figura III.4 Profundidad del nivel estático para el año 1992 (CNA, 2002).

### III.5 Evolución del nivel estático.

A partir de mediciones de pozo CNA registró una evolución negativa relativamente pequeña y que no es superior a los 20 cm/año en algunas áreas del acuífero, sobre todo en aquellas donde existe una mayor extracción de agua, mientras que en otras aparentemente se tienen recuperaciones del nivel del agua o bien no se ha detectado evolución (figura III.5).

En Cotaxtla las configuraciones abarcaron el periodo de Diciembre de 1980 - Mayo de 1981 y Mayo - Septiembre de 1981. En este periodo se presentaron épocas tanto de descenso como de recuperación del nivel estático, como se muestra en la tabla III.2.

Periodo	Recuperación	Descenso
Diciembre 1980 – Mayo 1981		$-627,096 \times 10^3 \text{ m}^3$
Mayo 1981 – Septiembre 1981	$+1'536,345.096 \times 10^3 \text{ m}^3$	

Tabla III.2 Variación en el almacenamiento para el período Diciembre de 1980 a Mayo de 1981

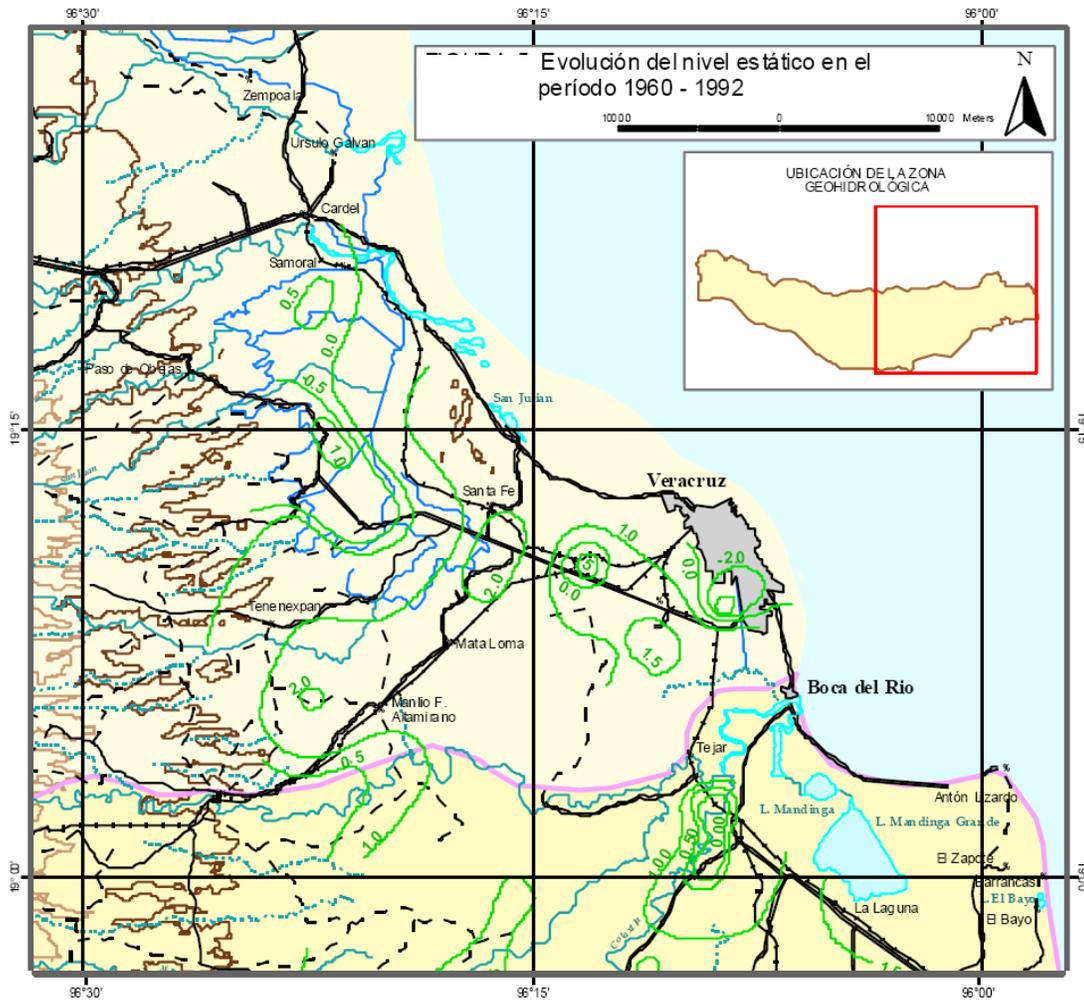


Figura III.5. Evolución del nivel estático 1960-1992 (CNA 2002).

### III.6 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Existen diversos estudios relacionados con la calidad del agua subterránea, información puntual de 1975 y de manera constante y de mayor cobertura a partir de 1993.

Se ha determinado por medio de estos estudios que la calidad del agua subterránea es óptima para cualquier uso, no hay indicios, al menos en los pozos monitoreados, de intrusión salina causada por el movimiento de agua del mar, aunque es notorio el incremento de los cloruros, en algunas zonas cercanas a la costa. Se ha detectado presencia de nitratos, debida a



contaminación antropogénica, en concentraciones mínimas, entre 2 y 4 mg/l y corresponden solo a algunos sitios puntuales.

Como posibles fuentes potenciales de contaminación, se pueden señalar gasolineras, centros de almacenamiento de combustibles, tiraderos de basura, deficiencia en el sistema de conducción de aguas residuales, el uso sustancias tóxicas en áreas agrícolas y derrames accidentales de productos químicos, dentro del modelo el agua con los valores de sólidos por debajo de los límites permitidos en norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 y modificada en el año 2000 (ver Anexo D) es considerada como agua pura, el agua de mar se considera una densidad de 1.028 kg/L.

Para las aguas superficiales, se tienen los siguientes resultados:

Concepto	Concentraciones promedio en ppm		
	Valor	Valor mínimo	Valor promedio
Cationes:			
Sodio	337	17	53
Calcio	80	12	32
Aniones:			
Bicarbonato	567	293	192
Cloro			73
Sulfato			8
Carbonatos			7
Dureza total			165
Alcalinidad	319	90	165
Sólidos totales	1212	183	385
Sólidos totales permitidos			1000

Tabla III.2 Concentraciones de sólidos totales disueltos en el agua superficial, 1981

Para las aguas subterráneas, se tienen los siguientes resultados:

Concepto	Concentraciones promedio en ppm		
	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio
Cationes			
Calcio			69
Sodio			68
Magnesio			36
Aniones:			
Bicarbonato			346
Cloro			113
Carbonato			1138
Sólidos totales disueltos	2183	653	653
Sólidos totales permitidos			1000

Tabla III.3. Concentraciones de sólidos totales disueltos en el agua subterránea, 1981.



La concentración total de sólidos permitidos para consumo humano es de 100 ppm según la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 y modificada en el año 2000 (ver Anexo D).

### **III.7 Balance de aguas subterráneas.**

#### ***Ecuación de Balance***

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de masa hidráulica es como sigue:

Entrada (E) - Salida (S) = Cambio de almacenamiento

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa, al cambio de almacenamiento de una unidad hidrológica, representada como sigue:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

### **III.8 Parámetros del balance de aguas**

Los parámetros propuestos dentro de este trabajo fueron obtenidos del repote de CNA para el acuífero Costera de Veracruz del año 2002.

#### **III.8.1 Recarga.**

La recarga total está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida por la aplicación de agua en las actividades humanas, tanto de origen superficial como subterránea. La recarga total en la zona de Cotaxtla fue de 164.54 millones de m<sup>3</sup> / año, mientras que el valor obtenido del volumen de recarga media anual para el area de la Costera de Veracruz es de 508.27 Mm<sup>3</sup>, considerando lo siguiente:

#### **III.8.2 Recarga inducida**

Dentro del área del acuífero, se cuenta con un distrito de riego, que utiliza agua proveniente del río La Antigua, con el cual se beneficia la zona localizada entre los poblados de Cardel, Salmoral, Tolome y Vargas. La conducción por canales y riego de tipo rodado beneficia al acuífero, favorece la recarga, infiltrando un volumen que corresponde al 18.41% del total de la recarga y es aproximado a 93.57 Mm<sup>3</sup>.

Por otra parte en Cotaxtla la infiltración vertical procedente tanto de pozos y norias de riego como del distrito de riego de Río Blanco es de 120.64 millones de m<sup>3</sup> /año.

#### **III.8.3 Recarga natural**

El volumen calculado por infiltración y aporte de las corrientes superficiales por medio de estudios previos en la zona es de 264.76 Mm<sup>3</sup> para el acuífero Costera de Veracruz que corresponde al 52.09% de ingresos (o entradas) de agua y de 43.9 Mm<sup>3</sup> para el acuífero



Cotaxtla en ambos casos los volúmenes infiltrados está en función del agua de lluvia y recarga horizontal proveniente de las zonas de recarga.

### III.8.4 Flujo horizontal

El flujo horizontal se calcula mediante la aplicación de la ley de Darcy que tiene la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

Q = Gasto que pasa por un determinado canal de flujo.

T = Transmisividad.

I = Gradiente hidráulico.

El 29.5% del volumen total que ingresa al acuífero Costera de Veracruz está dado por este concepto y es equivalente a 149.94 Mm<sup>3</sup> aproximadamente, en general, la zona principal de alimentación de los acuíferos se localiza al poniente, desde las partes altas de la planicie, motivando un flujo subterráneo con rumbo franco de oeste a este hasta el litoral del Golfo de México.

### III.8.5 Flujo subterráneo

La descarga por flujo subterráneo del acuífero Costera del Veracruz se realiza hacia el mar y en un volumen anual de 10.78 Mm<sup>3</sup> para Cotaxtla el volumen de descarga total fue para este periodo de 118.31 millones de m<sup>3</sup>, equivalentes a 3.75 m<sup>3</sup>/s.

### III.8.6 Evapotranspiración

El calculo del volumen de agua evapotranspirado, considerando dos rangos de profundidad del nivel estático. El primero de 0 a 5 m en el que se aplicó un factor del 25% como afectación al valor de la evapotranspiración y el otro comprendido entre 5 y 10 m en donde se consideró un factor el 12.5%.

De tal manera, se obtuvo un volumen anual de agua que se descarga del acuífero a través de la evapotranspiración de 38.25 Mm<sup>3</sup> para Costera de Veracruz y de 72.78 Mm<sup>3</sup> para Cotaxtla.

### III.8.7 Descargas naturales

Se consideraron como descargas naturales, a la cantidad de agua que cede el acuífero a corrientes superficiales (caudal base) y aquella que es necesaria conservar para no afectar a unidades hidrogeológicas adyacentes para sostener el gasto ecológico o bien para la descarga hacia el mar.

Con respecto al caudal base, se consideró conveniente utilizar el resultado obtenido en el estudio evaluación geohidrológica realizado en el año de 1982, en el que además de la información recopilada de las estaciones hidrométricas, también se realizaron diferentes mediciones a lo largo de un año, mediante las que se determinó el caudal base de corrientes y que a su vez es aportado por el acuífero. De esta manera, se tiene que el volumen de agua



aportado del acuífero Costera de Veracruz de manera natural a los ríos es de 390.07 Mm<sup>3</sup> anuales.

La principal descarga del acuífero Cotaxtla es en los ríos Cotaxtla y Blanco, junto con sus afluentes y cuya descarga final se efectúa en el Golfo de México con una magnitud de 37.38 Mm<sup>3</sup> anuales.

### **III.8.8 Extracción por bombeo**

CNA en 1998 CNA realizó la actualización del inventario de pozos en el acuífero Costera de Veracruz donde se determinó la extracción de cada pozo mediante la aplicación de diversas técnicas como, régimen de operación y gasto medido por método volumétrico, así como la consideración del volumen concesionado, se concluye que a través de las 365 obras en operación la explotación del agua subterránea es de 86.77 Mm<sup>3</sup> anuales, mientras que Cotaxtla tiene una extracción de agua subterránea de 8.15 Mm<sup>3</sup>.

### **III.8.9 Cambio de almacenamiento**

Para el cambio de almacenamiento del acuífero CNA consideró la evolución del nivel de agua de marzo de 1997 a abril de 1999; periodo considerado como estiaje. Dado que las evoluciones que se registran en los pozos tienen valores pequeños, se optó por establecer la evolución puntal en cada pozo y posteriormente interpolar los valores entre ellos. De esta manera, se obtuvo el plano de evolución donde se tienen áreas negativas y de recuperación del nivel estático, de tal forma que se calculó el volumen resultante en 6 seis zonas, con lo que se calculó un volumen drenado en el período de (-) 414.01 Mm<sup>3</sup>, o sea pérdida .

El coeficiente de almacenamiento se obtuvo del estudio de evaluación geohidrológica efectuado en el año de 1982 por CNA, en el que se determinó para la unidad de gravas y arenas un coeficiente de 0.085 y en los depósitos de dunas 0.025.

Para el presente análisis, se consideró conveniente utilizar el valor de 0.085, ya que la unidad acuífera está representada las gravas y arenas (Qhoal).

En función de lo anterior se tiene que el volumen anual que representa el cambio de almacenamiento es de -17.60 Mm<sup>3</sup> para Costera de Veracruz mientras que para Cotaxtla el cambio de almacenamiento para este periodo fue de +46.23 Mm<sup>3</sup>, el cual indica una respuesta positiva del acuífero. Esta variación se relaciona también con los cambios climáticos estacionales.

### **III.9 Balance de 1998**

En la figura III.6 se muestra el balance de aguas subterráneas en el acuífero de Veracruz, en donde se aprecia que la recarga media anual es del orden de 508.27 Mm<sup>3</sup>/año, que se distribuye en una recarga natural por precipitación de 264.76 Mm<sup>3</sup>/año, en una recarga inducida por riego agrícola de 93.57 Mm<sup>3</sup>/año y un flujo horizontal de 149.94 Mm<sup>3</sup>/año. Las salidas del agua subterránea son por evapotranspiración con valores de 38.25 Mm<sup>3</sup>/año,

descargas naturales principalmente hacia los ríos del orden de 390.07 Mm<sup>3</sup>/año, descargas hacia el mar de 10.78 Mm<sup>3</sup>/año (SARH, 1982).

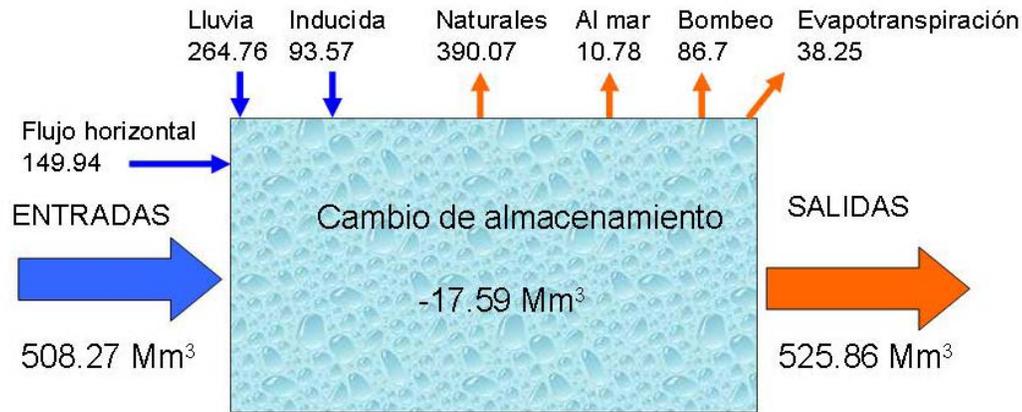


Figura III.6. Balance de Aguas Subterráneas para el acuífero de Veracruz proyectado a 1998.

Debido a la escasez de datos, se considera que las cifras anteriores se mantienen constantes en el tiempo, siendo variable la extracción por bombeo. Haciendo la proyección para 1998, se tiene que el bombeo era del orden de 86.7 Mm<sup>3</sup>/año con 365 obras. Lo anterior, resulta en un cambio de almacenamiento de -17.59 Mm<sup>3</sup>/año (CNA, 2002).

Por otra parte, en la “Modelación matemática del flujo en el acuífero Costera de Veracruz” (Jacobo, 2005), se obtiene el flujo subterráneo de entrada y flujo subterráneo de salida, a través de las redes de flujo de los mapas de igual elevación del nivel estático, construyendo celdas de entrada y salida. La ecuación de Darcy aplicada a cada una de las celdas de entrada y salida se define como:

$$FS = TL \frac{dh}{dl} \dots\dots\dots (8)$$

Donde *FS*, es el caudal (L<sup>3</sup>), *T* la transmisibilidad (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>), *L* (L) el ancho representativo de la celda, *dh* (L) es la diferencia entre los valores de las curvas de igual elevación del nivel estático y *dl* (L), la longitud entre las líneas de corriente. La relación *dh/dl* es el gradiente hidráulico.

La estimación de la evapotranspiración se restringió a la franja cercana a la línea de costa que conforman las lagunas y superficies de inundación, con un volumen de 67 187 586 m<sup>3</sup>/a.

Los volúmenes de bombeo corresponden a las tres condiciones siguientes: las cifras oficiales de la CNA, la suposición que el bombeo se ha incrementado en el tiempo de manera lineal y exponencial. En el caso lineal se considera que todo el volumen que entra a la zona de explotación se extrae por bombeo los resultados se muestran en la tabla III.5.



AÑO	FS <sub>E</sub>	FS <sub>S</sub>	ET	B <sub>(CNA)</sub>	B <sub>(LINEAL)</sub>	B <sub>(EXP)</sub>
1979	65.044	24.514	67.188	95	65.044	74.757
1992	117.882	43.568	67.188		117.882	108.564
1999	124.061	37.721	67.188	87	124.601	132.721
2003	153.444	50.263	67.188		153.444	148.866

Tabla III.5. Balance de aguas subterráneas con base en las redes de flujo. Las cifras están en Mm<sup>3</sup>/a (Jacobo, 2005, en CNA, 2002)

### III.10 Disponibilidad.

Para el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea, se aplica el procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que establece la expresión siguiente:

$$D = R - D_s - V$$

D = Disponibilidad media Anual de agua subterránea

R = Recarga Total media anual

D<sub>s</sub> = Descarga natura comprometida

V = Volumen anual de agua subterránea concesionada e inscrita en el REPDA (Registro Publico de Derechos de Agua, CONAGUA)

#### Disponibilidad de aguas subterráneas

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionadas e inscritas en el REPDA:

De acuerdo con la expresión

$$171'583,671 = 508'270,000 - 228'540,000 - 108'146,329$$

La cifra indica que existe volumen disponible de 171'583,671 m<sup>3</sup> anuales para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero Costera de Veracruz

De igual forma para Cotaxtla

$$31'778,906 = 163'000,000 - 102'000,000 - 29'221,094$$

La cifra indica que existe volumen disponible de 31'778,906 m<sup>3</sup> anuales para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero de Cotaxtla en el Estado de Veracruz.



### **Recarga total media anual.**

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero de Cotaxtla, es de 163 Mm<sup>3</sup> y de la información obtenida para cada parámetro se obtiene que el volumen de recarga media anual que recibe el acuífero Costera de Veracruz es de 508.27 Mm<sup>3</sup>.

### **Descarga natural comprometida**

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionarios como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben de ser sostenidas para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes. La descarga natural del acuífero está representada por el flujo base de los ríos Jamapa y La Antigua, sin que se tengan descargas subterráneas a otros acuíferos, por lo que de conformidad con la información proporcionada por Gerencia Estatal, se utiliza un volumen de 139.75 Mm<sup>3</sup> (volumen concesionado de aguas superficiales). El gasto ecológico necesario para mantener la vegetación nativa e intrusión salina, fue determinado al considerar un 20% del flujo base, por lo que este representa 78.01 Mm<sup>3</sup>/año y el flujo subterráneo es de 10.78 Mm<sup>3</sup>, de lo anterior, resulta un volumen total de 228.54 Mm<sup>3</sup> para costera de Veracruz.

Al considerar que la descarga por drenaje hacia el río Cotaxtla, calculada en 37.38 Mm<sup>3</sup> puede aprovecharse aguas abajo, principalmente en los años secos, un criterio conservador resulta de proponer el 80% de dicha magnitud como un compromiso aguas abajo, lo que equivale a casi 30 Mm<sup>3</sup> para el acuífero Cotaxtla.

### **Volumen concesionado de agua subterránea**

En el acuífero de Costera de Veracruz el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el REPDA, de la Subdirección General de Administración del Agua, al 30 de abril de 2002 es de 108'146,329 m<sup>3</sup>/año.

En el acuífero de Cotaxtla el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el REPDA, de la Subdirección General de Administración del Agua, al 30 de abril de 2002 es de 29'221,094 m<sup>3</sup> / año.

### **III.11 Censo de aprovechamiento e hidrometría**

La actualización de pozos se realizó en diciembre de 1998, detectando un total de 440, de los cuales 365 se encuentran activos y 75 fuera de servicio.

Del total de obras detectadas, se censaron 354 pozos, 78 norias, 6 norias perforadas y 2 puyones.

Del total de pozos en operación, el 43% tiene una profundidad entre 1 y 50 m; el 56% entre 51 y 100 m y solamente el 1% fueron construidos a una profundidad mayor de 150 m.



Por otra parte, se observó que el 43% de las obras extraen caudales instantáneos entre 1 y 10 lps; el 28% de 11 a 40 lps y el 29% están comprendidos entre 41 y 80 lps.

Existen 101 pozos destinados para uso público urbano, mediante los que se extrae un volumen de 41.7 Mm<sup>3</sup>; 116 pozos para uso agrícola con una extracción de 25.5 Mm<sup>3</sup>; 30 pozos como fuente de abastecimiento a industrias con un volumen de 15.9 Mm<sup>3</sup> y para otros usos se censaron 118 pozos con los que se extraen 3.2 Mm<sup>3</sup>.

Por todo lo visto anteriormente el balance adoptado para este trabajo de tesis será el dado por CNA, en su estudio del acuífero Costera de Veracruz, aunque también se toman elementos del acuífero Cotaxtla para el estudio del área propuesta, no podemos olvidar que ambos sistemas en realidad forman parte de un sistema hidrológico.

Los datos utilizados para el área Costera de Veracruz fueron obtenidos a partir del consumo dentro del área urbana si como de la zona industrial y agrícola, la superficie cubierta por el presente trabajo es mayor al área de consumo dado el impacto que este representa en la región.

Las condiciones iniciales de líneas equipotenciales en el modelo fueron referidas a los pozos existentes en el acuífero Costero de Veracruz y por otro lado en el área de Cotaxtla se utilizaron las líneas equipotenciales reportadas por CNA en 1992.

## CAPITULO IV. MODELO GEOHIDROLÓGICO

### IV.1 Delimitación del modelo

El modelo está basado en la información topográfica, geológica y geográfica de la zona, la topografía digital fue tomada de INEGI. Sin embargo, debido a la limitación del software MODFLOW se alcanzó una resolución máxima de 251 renglones por 278 columnas con una longitud de 242 m latitud y 255 m longitud respectivamente, las consecuencias de estas limitaciones es el empobrecimiento de la calidad en la descripción superficial; el espesor está en función de las capas geológicas asignadas.

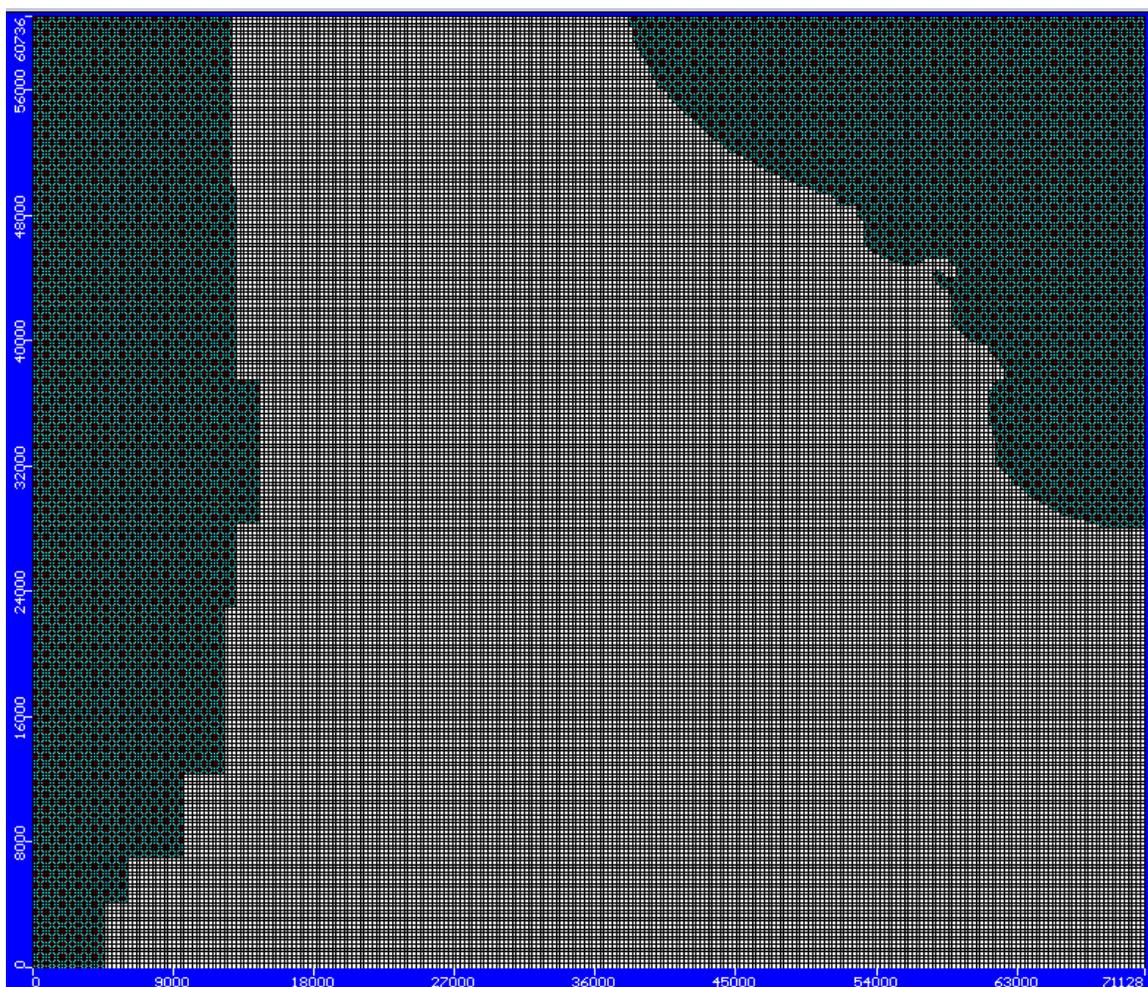


Figura 4.1. Distribución de celdas dentro del modelo.

Los mapas geológicos utilizados para la caracterización de la zona de estudio fueron obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM), con una escala de 1:250000, la zona está comprendida entre las coordenadas UTM 746300 – 816000 [m] E y 2144000 – 2080200 [m] N con una extensión de 4446.86 km<sup>2</sup> aproximadamente, para este caso se utilizaron las cartas E14-3 y 314 y E14-6 (SGM, 2002).



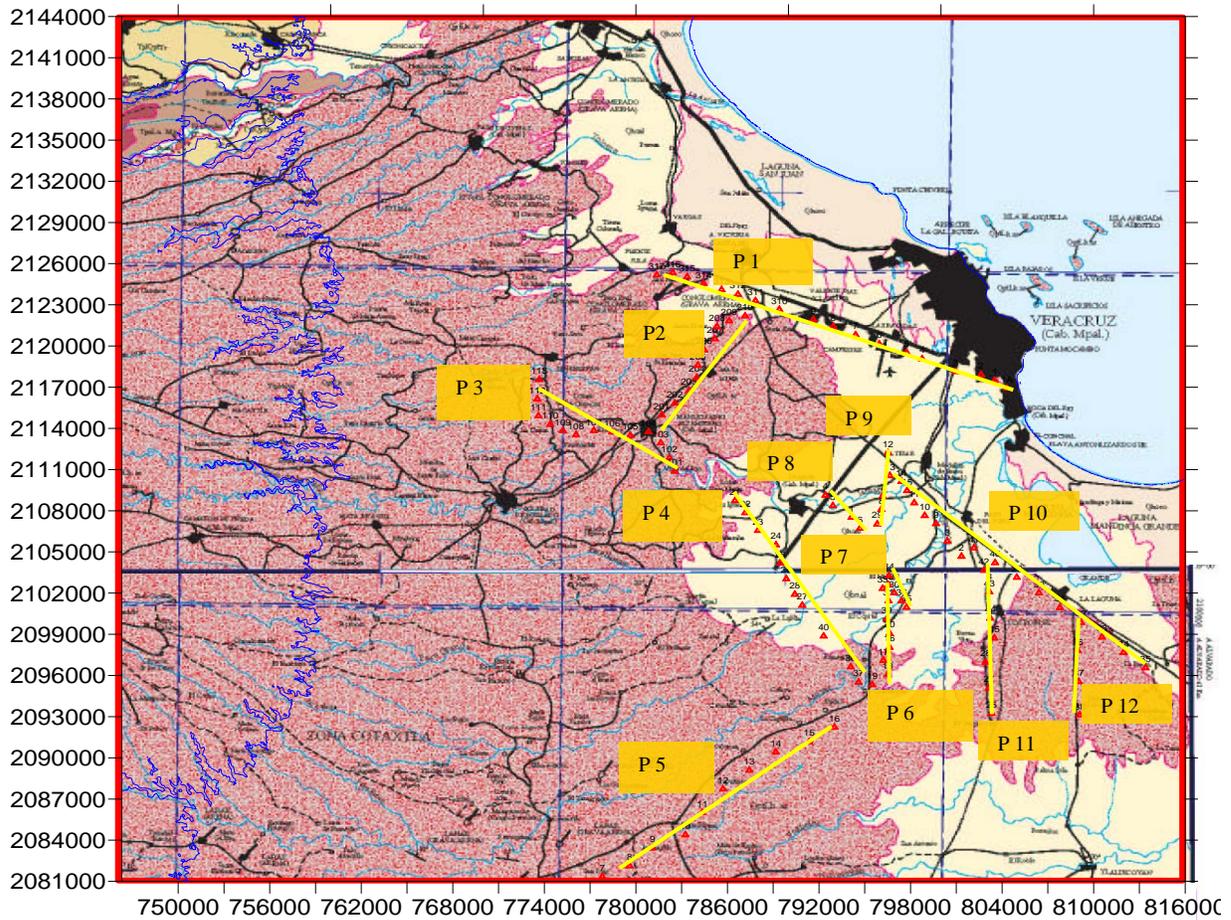


Figura IV.2. Secciones geoelectricas sobre el área de estudio.

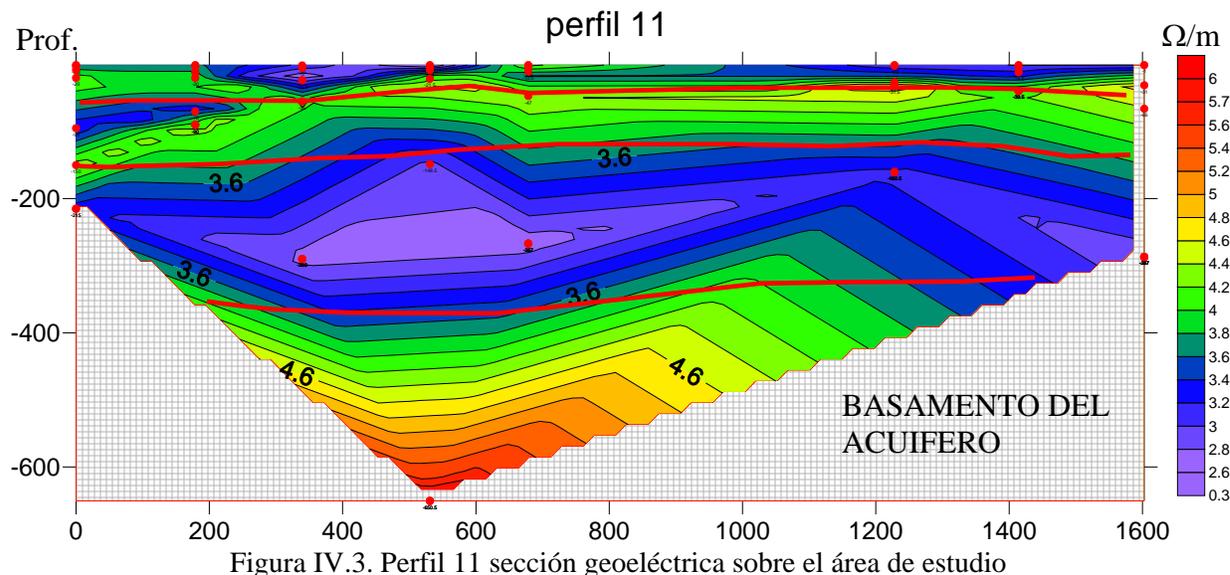
Las secciones de isoresistividad obtenidas a partir de los SEV se graficaron e interpolaron por medio del programa SURFER, la distancia entre cada SEV fue obtenida a partir de las coordenadas y se utilizó la profundidad de los puntos de atribución, los valores asignados en las secciones fueron obtenidos a partir del logaritmo del valor de resistividad reportado esto con el fin de suavizar los cambios e identificar las tres capas de materias declaradas en los informes de CNA.

Las secciones de isoresistividades geoelectricas se obtuvieron a partir de la interpolación lineal de los valores de resistividad en los puntos de atribución de cada SEV que conforman a las secciones propuestas, la forma de interpolación no permite rellenar las zonas donde no hay valores ocasionando un vacío dentro de la sección, cabe recordar que los datos disponibles esto solo son la ubicación geográfica de los SEV (coordenadas UTM) así como la profundidad y valor de resistividad de los puntos de atribución.

Como se muestra dentro de la figura IV.3 se identificaron tres zonas de contraste en resistividad, estas zonas fueron tomadas para formar los estratos dentro del modelo. Al contar con diferentes valores de profundidad en los puntos de atribución algunos quedan aislados, estos por si solos no pueden definir otra capa, por lo tanto, a las regiones con poca



información se designaron como el basamento del acuífero para el modelo atribuyéndole una baja permeabilidad.



Cada uno de los doce perfiles (ver anexo B) creados permite describir estratos, los horizontes identificados dentro de las secciones son unidos para crear superficies que ayudan a construir el modelo conceptual a partir de información geofísica.

La construcción de los estratos dentro del modelo a partir de los horizontes interpolados de los perfiles geoelectricos deben de tener cambios suaves lateralmente además de que deben de tener continuidad y no presentar acuñaientos.

En la figura IV.4 se pueden observar el resultado de la interpolación de los horizontes, con esta información se construyó un modelo de tres capas mas un basamento de poca permeabilidad y como cima del modelo se tomo la topografía de INEGI, el comportamiento estas capas muestran un adelgazamiento de oeste a este es decir de la Sierra Madre Oriental hacia la costa.

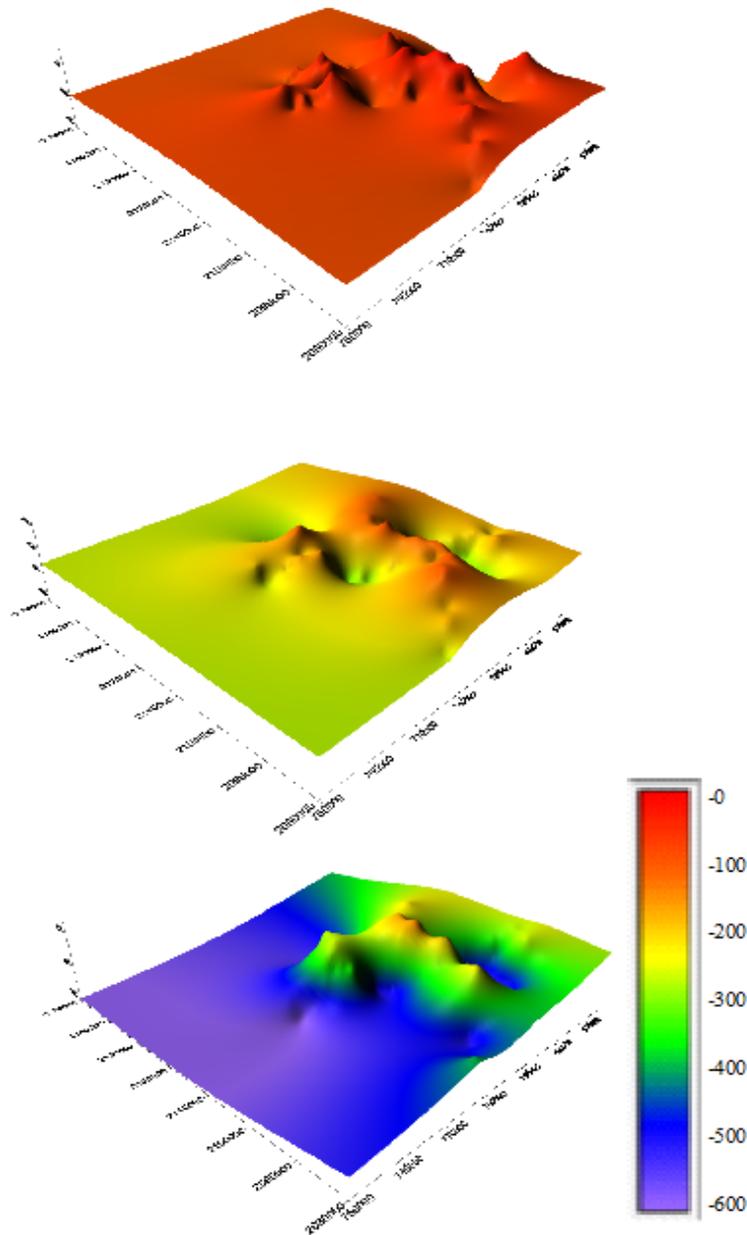


Figura IV.4. Configuración 3D para los estratos utilizados en el modelo.

### IV.3 Distribución de las propiedades

De la descripción de los materiales que componen el subsuelo (ver capítulo II) se puede decir que la alta conductividad hidráulica primaria dentro del modelo y su disposición está conformada según la descripción de los mapas geológicos de COREMI (Figura IV.5). Dentro de estos podemos ver que las partes más altas que corresponden a la Sierra Madreo Oriental presentan una litología de gravas y poca arena con una conductividad hidráulica muy alta, conforme vamos hacia la costa la presencia de arena en la litología es mayor así como el aumento en el contenido de arcilla, en la zona de la costa se tiene arena de playa y arcilla en

una cantidad mayor, cada una de estas litologías tiene un régimen de conductividad diferente y se tiene un descenso de porosidad conforme la distancia a las costa es menor, por ende, la conductividad hidráulica disminuye de igual forma.

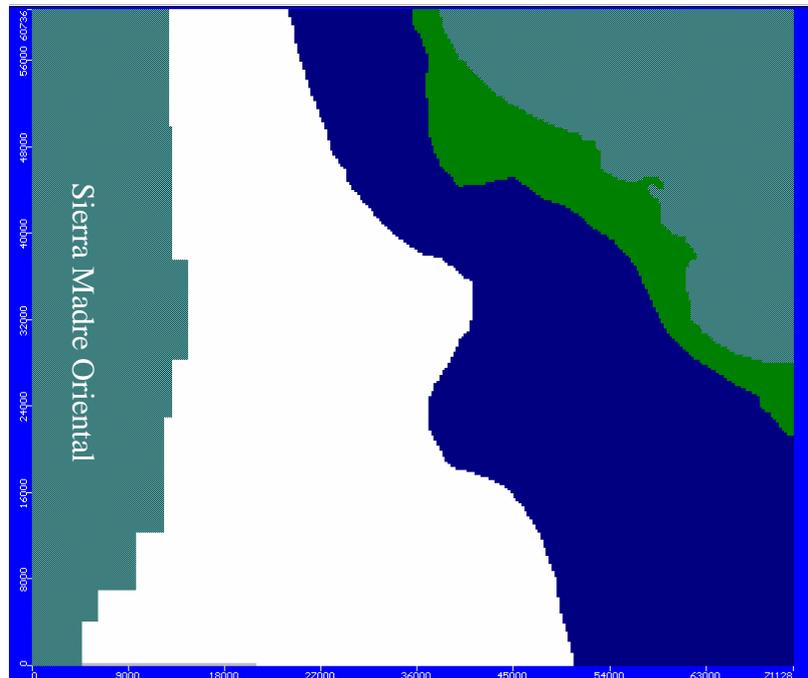


Figura IV.5. Distribución superficial de conductividades.

Por otro lado la distribución vertical de esta propiedad es conforme la profundidad de sepultamiento (ver Figura IV.6), por este motivo la conductividad hidráulica está aún más restringida, a mayor profundidad disminuye esta propiedad.

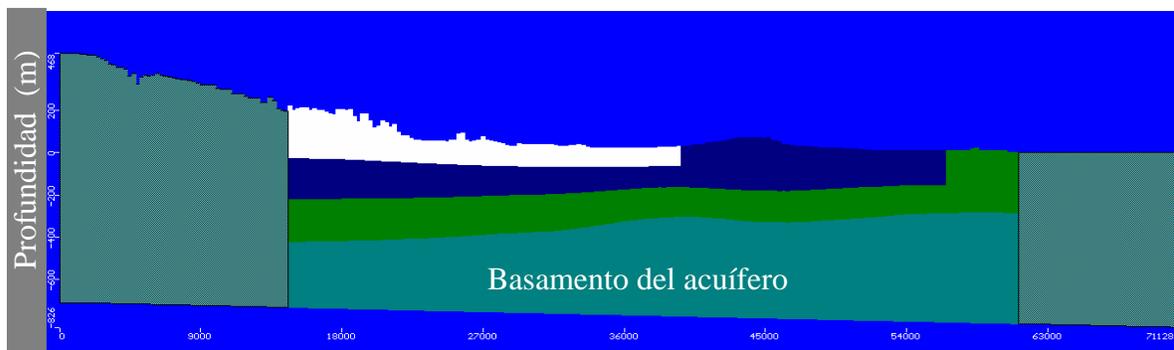


Figura IV.6. Distribución de conductividades verticales.

Un dato importante dentro del modelo es la ubicación de los ríos (ver figura IV.7), por su aporte a la recarga y su abundancia dentro del área de estudio, la distribución y caudal de estos se introdujo en el modelo utilizando la distribución geográfica de ellos.

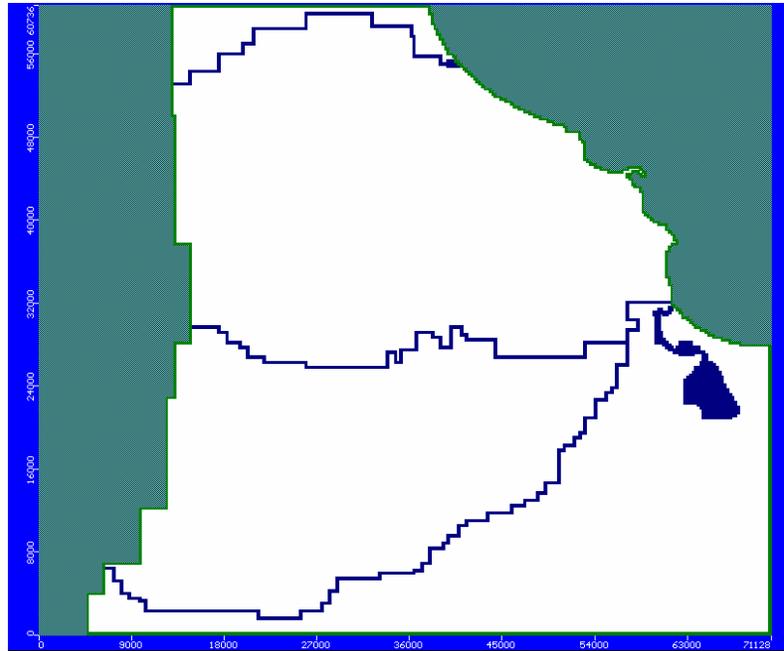


Figura IV.7. Distribución de los ríos dentro del modelo.

La recarga fluvial no fue considerada como una constante dentro del área total del proyecto (Figura IV.8), para fines de modelación fue asignada a la parte más alta del modelo limitada por la curvas de elevación topográficas.

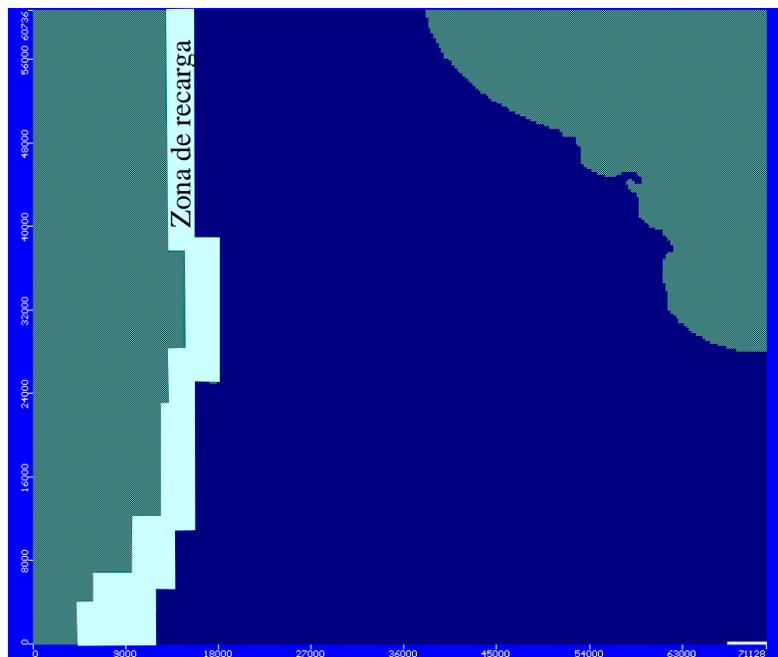


Figura IV.8. Asignación de recarga por lluvia.

La evapotraspiración fue considerada como constante para toda el área de investigación, esta información fue obtenida de los informes de CNA (Figura IV.9).



Figura IV.9. Distribución de la evapotranspiración.

#### IV.4 Almacenamiento

Se consideraron 4 estratos con los valores de almacenamiento mostrados en la tabla IV.1.

ESTRATO	Ss[1/m]	Ss[1/m]	Eff.Por [-]	Tot.Por [-]	COLOR
1	0.001	0.05	0.8	0.8	
2	0.0006	0.0006	0.001	0.001	
3	0.0003	0.0003	0.001	0.001	
4	0.0001	0.0001	0.001	0.001	

Tabla IV.1. Almacenamiento específico y porosidad efectiva de las 4 capas.

De igual forma que la conductividad, el almacenamiento está distribuido de forma vertical, la capa superior asignada al acuífero en estudio es la que cuenta con un valor mayor de almacenamiento, a medida que la profundidad aumenta el almacenamiento disminuye siendo inversamente proporcional.

#### IV.5 Condiciones iniciales de nivel estático

Para las condiciones iniciales del modelo se consideró la posición de las líneas equipotenciales de los mapas de CNA, como se menciona en el capítulo II estos son valores que se obtienen para el año 1992 y son los resultados más cercanos con los que se cuenta en el área.

#### IV.6 Entradas del modelo

El modelo debe alimentarse con los datos correspondientes de entrada y salida de agua, como por ejemplo precipitación, retorno de riego agrícola y descargas, etc. Estos datos son los obtenidos en el balance hidrogeológico (tabla IV.2).



<b>ENTRADAS</b>		<b>SALIDAS</b>	
<b>Precipitación</b>	<b>264.76</b>	<b>Evapotranspiración</b>	<b>38.25</b>
<b>Retorno de riego</b>	<b>93,57</b>	<b>Descargas hacia el mar</b>	<b>390.07</b>
<b>Flujo horizontal</b>	<b>149.94</b>	<b>Descargas hacia el mar</b>	<b>10.78</b>
		<b>Bombeo</b>	<b>86.7</b>

Tabla IV.2. Entradas y salidas del modelo.

### IV.7 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera fueron asignadas siguiendo las fronteras naturales de acuífero y tomando en cuenta la distribución natural de los datos. En la parte sur del modelo cuenta con información geofísica de SEV mientras que en la parte norte se tiene la mayor información de pozos, por esta razón la extensión dentro de las fronteras norte y sur fueron fijadas en estas posiciones. La frontera fue fijada en la costa y por los limites de los estudios geofísicos, mientras que al oeste la información de pozos fue la limitante, además de elegir una cota tal que permita evitar los cambios laterales de altura en lo más posible y por otro lado que esté lo suficientemente alejada de la zona para que estas condiciones no sean una influencia directa en los pozos, es decir, que los niveles en los pozos fueran el resultado de las condiciones de flujo en el modelo y no debido a la influencia de la frontera, estas son mostradas en la figura IV.10.

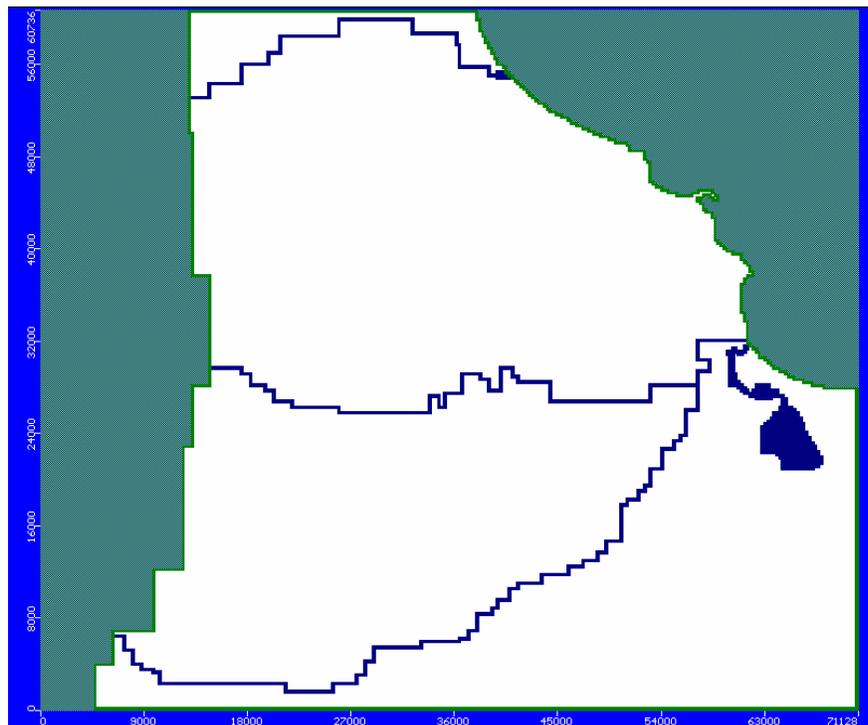


Figura IV.10. Condiciones de frontera en el modelo.

Las condiciones de frontera son manejadas en MODFLOW como GHB (General Head boundary) y HB (Head Boundary) que corresponden a tipos Newman y Dirichlet respectivamente.



Las condiciones de frontera GHB son asignadas por el nivel estático medido en los pozos (Tabal IV.3), para esto los niveles que se manejan en las fronteras no pueden diferir mucho de los datos ya existentes debido a su cercanía a los pozos del modelo.

GHB	Niveles (m)	Conductancia
Norte	40-0	20
Sur	40-20	20
Este	20-0	20
Oeste	40-45	20
Costa	0	800

Tabla IV.3. GHB en las fronteras.

Por otro lado la conductancia hidráulica utilizada en el modelo es una extrapolación de los datos reales llevados a la frontera.

### IV.8 Asignación de piezometrías

Los niveles piezométricos empleados para el modelo fueron obtenidos a partir de dos fuentes, por un lado los 72 pozos mostrados en la figura IV.11 y que pertenecen al Acuífero Costera de Veracruz y al sur de la zona de estudio los niveles piezométricos pertenecientes al acuífero Cotaxtla obtenidos de los reportes de CNA para esta zona (CNA 2002).

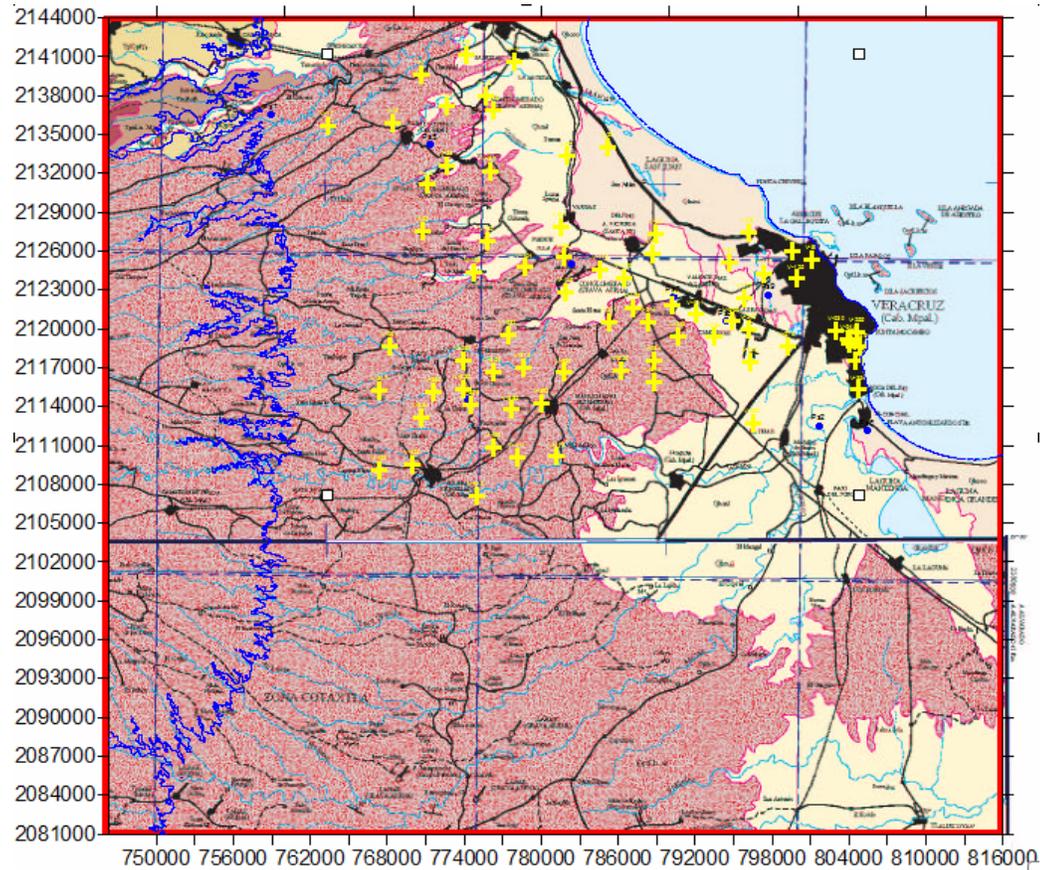


Figura IV.11. Posición de los pozos en base de datos.



La configuración por celdas del modelo provoca que en las áreas con mayor población de pozos, más de uno pertenezca a la misma celda, en estos casos se crea un pozo al cual se le asignó un gasto igual a la suma de los gastos de los pozos en la celda (pozos en color rojo de la figura IV.12).

Para la asignación de pozos al sur (pozos en color verde de la figura IV.12) de la zona de estudio se utilizaron los niveles piezométricos reportados por CNA en 1992, esta zona solo cuenta con información de SEV.

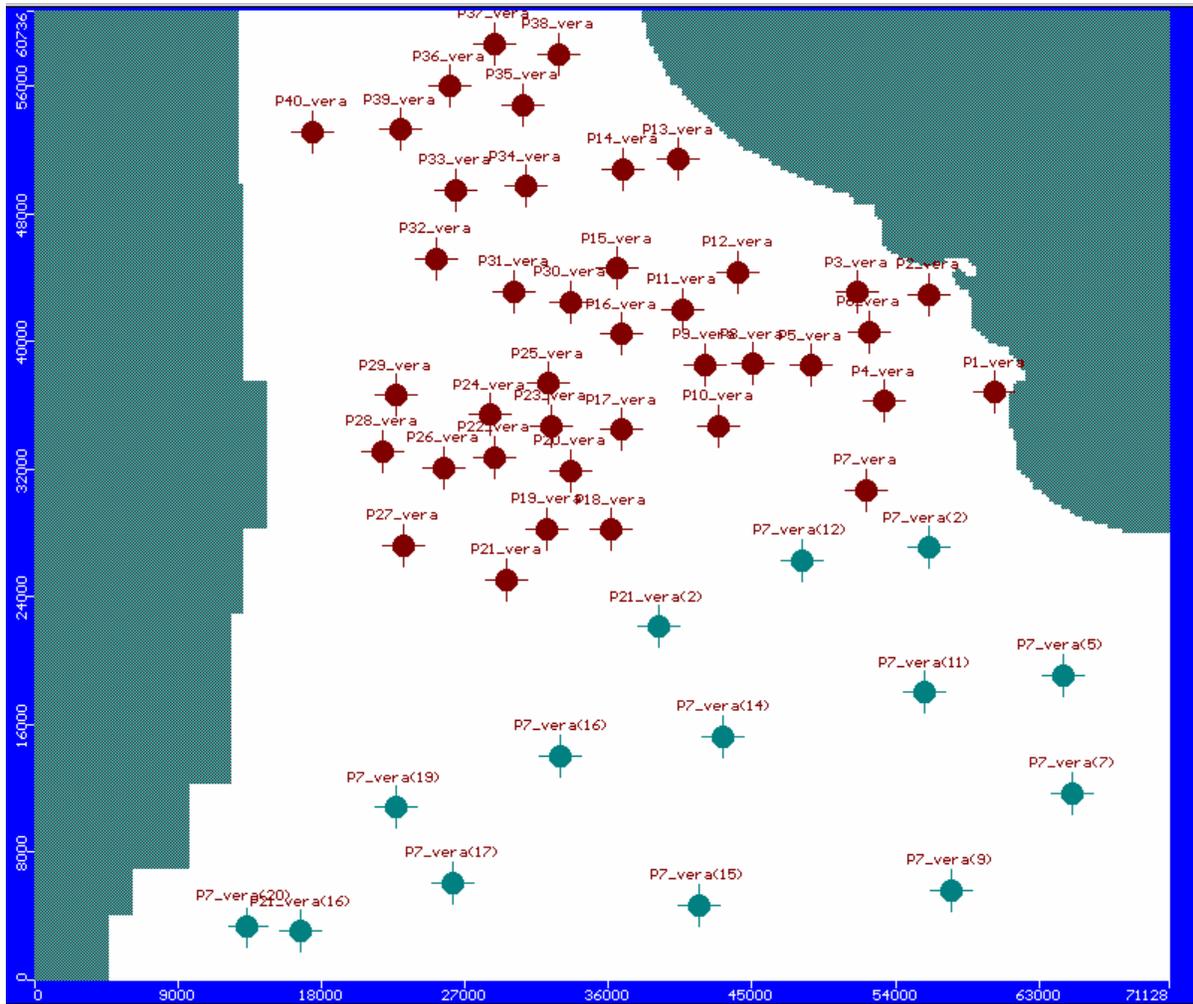


Figura IV.12. Pozos asignados al modelo.

### IV.9 Pozos de calibración

Los pozos de calibración corresponden a aquellos en los que existe información para los años de simulación de acuerdo a los registros de CNA (Anexo C). Cada uno de ellos fue ubicado cercano a los pozos asignados al modelo y su nivel estático es el que se tiene registrado dentro de los datos como podemos ver en la figura IV.13.

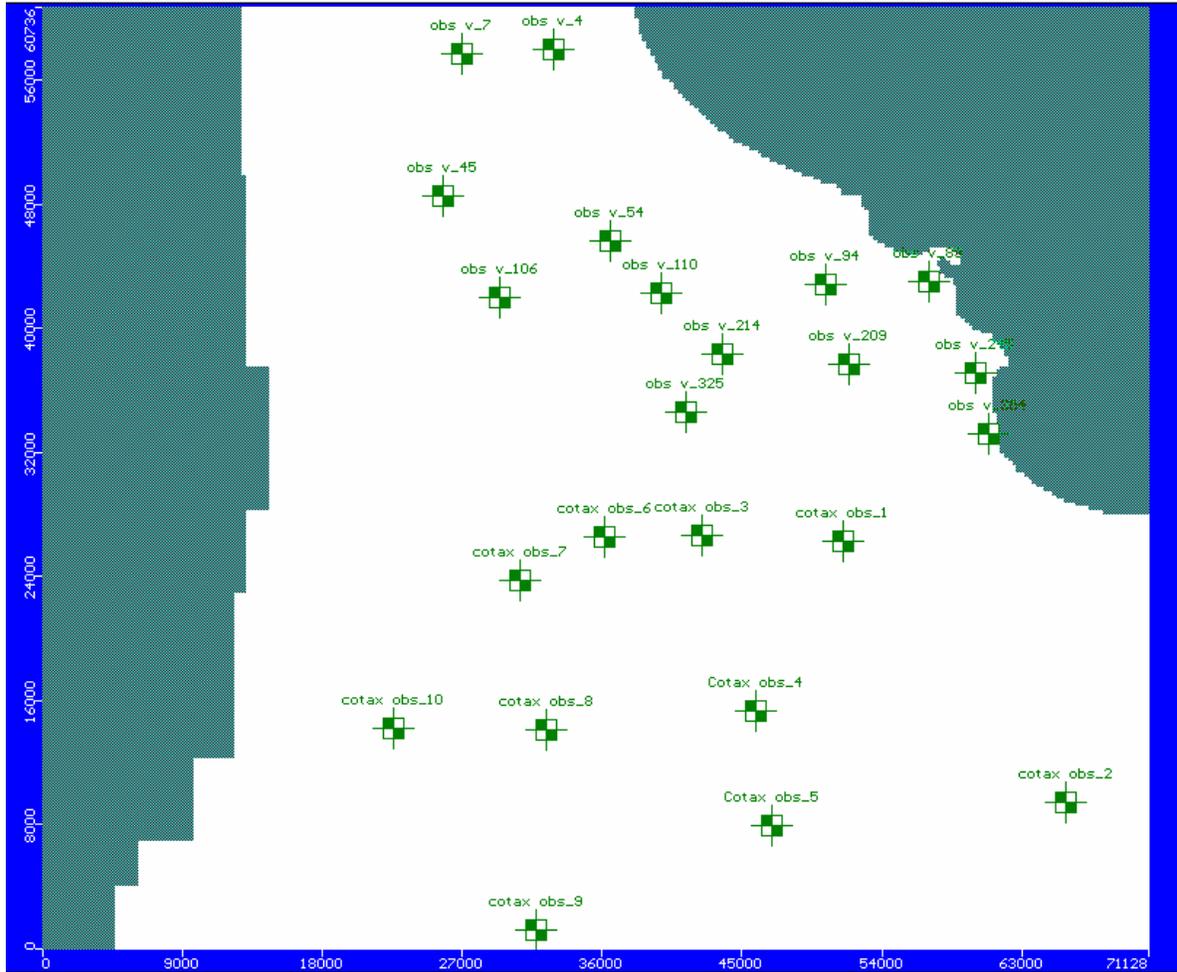


Figura IV.13. Pozos de calibración.

#### IV.10 Módulo MT3DMS

Es un módulo tridimensional de transporte para la simulación de advección, dispersión y reacción química, por medio de este módulo se monitorea el movimiento de los contaminantes en el acuífero, las fuentes contaminantes se asignaron a lo largo de la costa, el comportamiento de cada una de las partículas está influenciado por el movimiento del agua dentro del acuífero. Como se muestra en la figura IV.14 las partículas fueron asignadas a lo largo de la costa, partiendo de la hipótesis de que el límite del agua salada y agua dulce está en ella, se puede evaluar el movimiento de este límite por el modelo transitorio donde los pozos registran extracción.

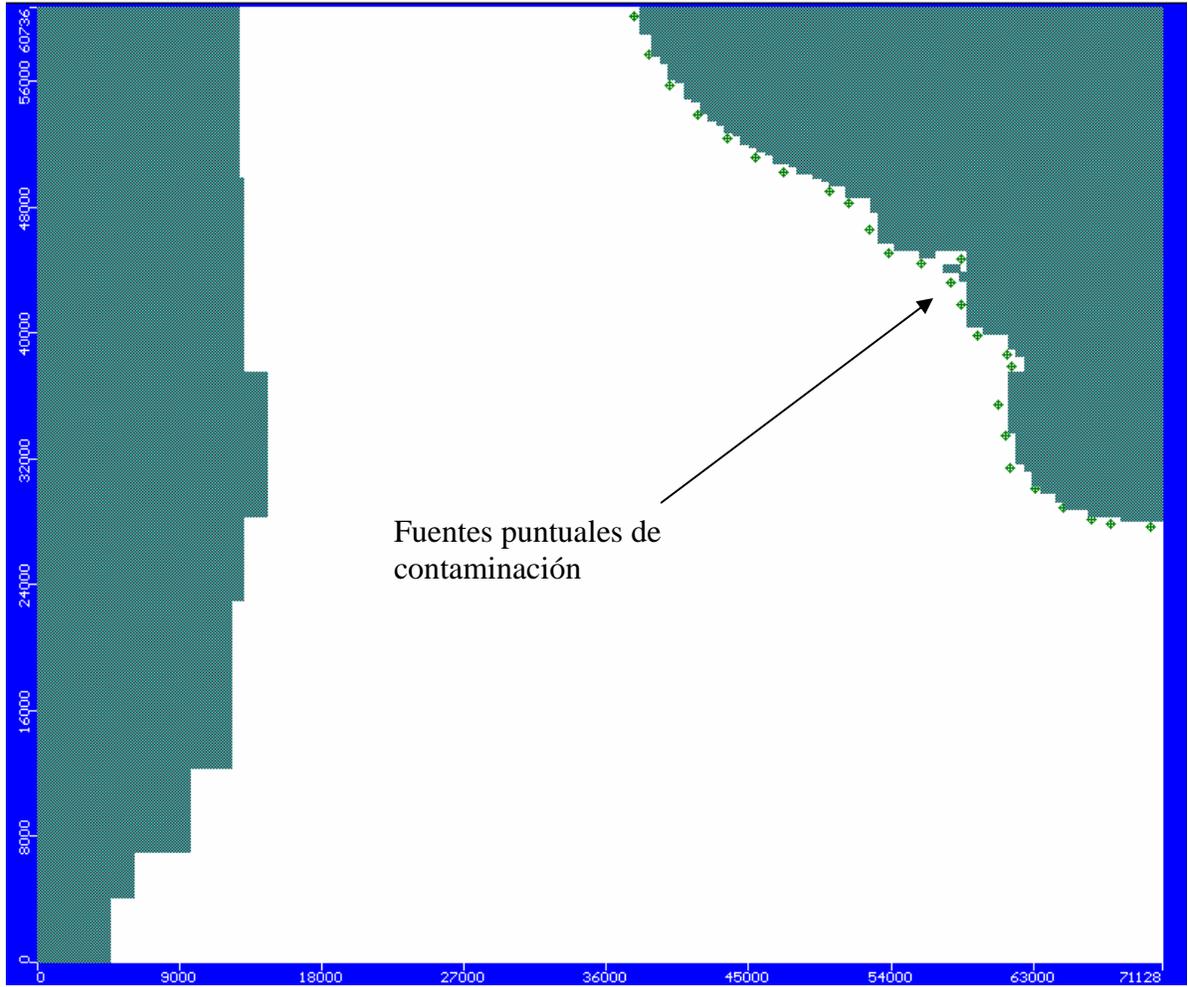


Figura IV.14: Ubicación de fuentes contaminantes en el modelo.



## CAPITULO V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### V.1 Modelo en estado estacionario.

Se realizó un modelo en estado estacionario del acuífero considerándolo en un estado hipotético nativo y que se muestra en la figura V.1 con líneas azules, este sirve de base para el modelo transitorio, a manera de comparación se presenta la configuración del nivel estático de pozos que se muestran en la misma figura en líneas rojas.

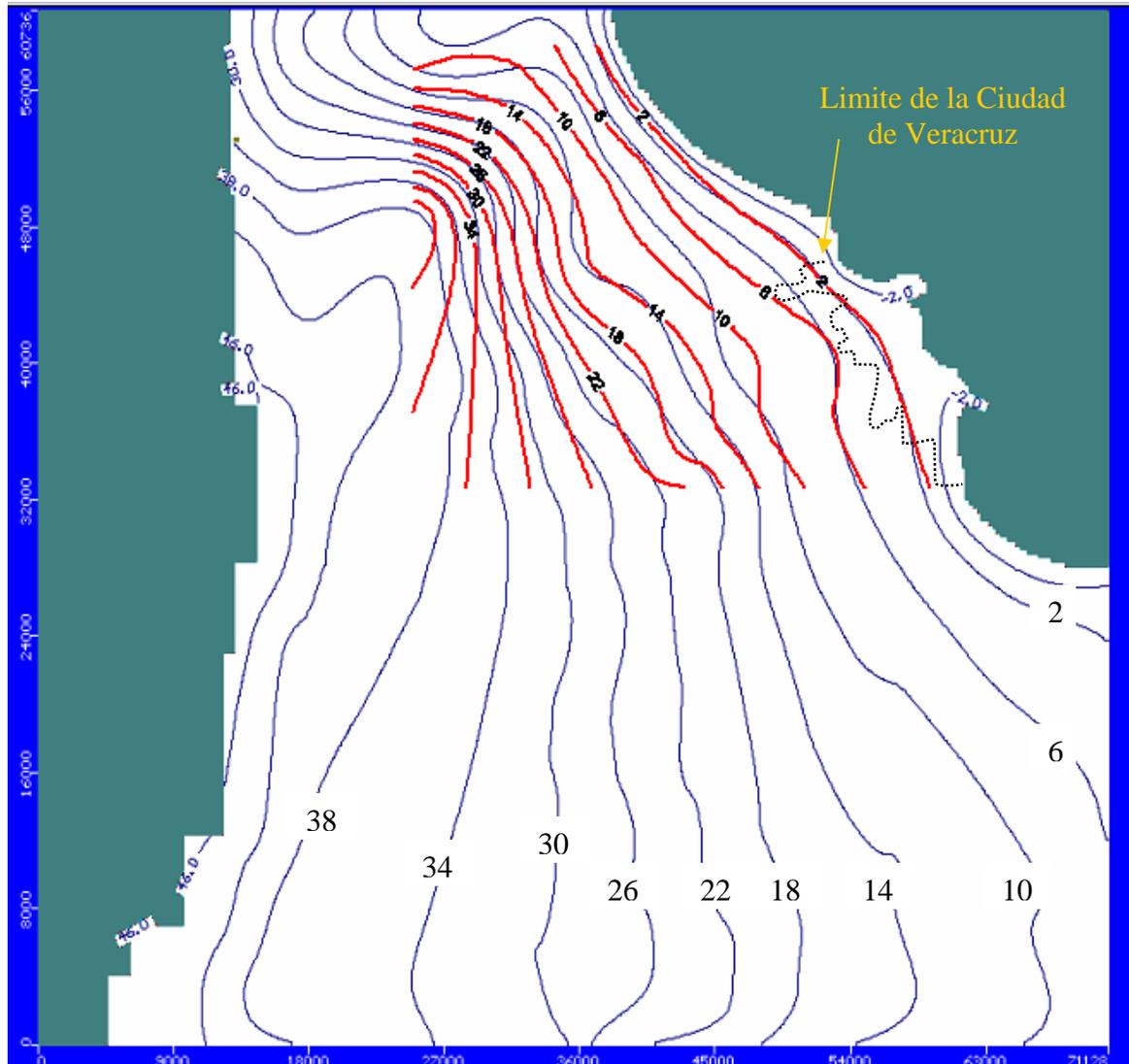


Figura V.1. Curvas de niveles estáticos para estado transitorio correspondiente a 1993.

### V.2 Modelo de flujo transitorio para el año 1993

Posteriormente al haber ajustado el modelo estacionario se realizó un modelo transitorio de simulación correspondiente al año 1993. La figura V.1 muestra la calibración del modelo para ese año, se realizó con los niveles piezométricos medidos por CNA, estos nos muestran los



valores puntuales a los cuales se deben ajustar las curvas calculadas, como se puede ver en la figura V.2 el error cuadrático medio es de 6.28% lo cual consideramos como un resultado satisfactorio.

En este modelo se tomó en cuenta una frontera con fuentes puntuales de contaminación que simulan la intrusión de agua de mar.

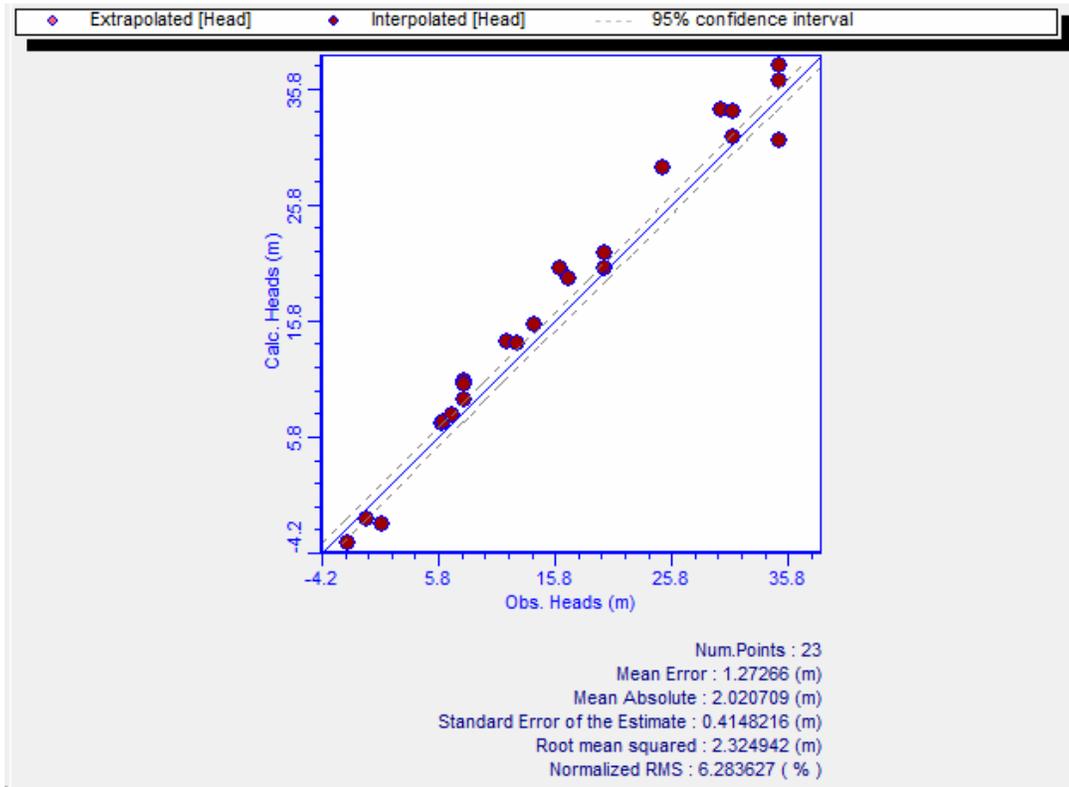


Figura V.2. Calibración del modelo en estado transitorio para 1993.

La figura V.3 muestra, sin embargo, a pesar de que el ajuste de los pozos arroja un bajo error cuadrático en la correlación la similitud en las curvas reportadas por CNA y la configuración de los niveles estáticos en 1992 guardan poca relación dentro de la ciudad esto es provocado por la distribución de los pozos y por la disposición de las celdas que forman el modelo, sin embargo, podemos observar que el comportamiento general del acuífero es reproducido.

El módulo de transporte de contaminantes, MT3D, de Visual MODFLOW permite simular la interacción del acuífero con el agua de mar, mediante las fuentes puntuales ubicadas a lo largo de la costa (Figura V.4).

Como puede observarse, el comportamiento del acuífero, para ese año, no presenta problemas de abatimiento ni de intrusión de agua de mar.

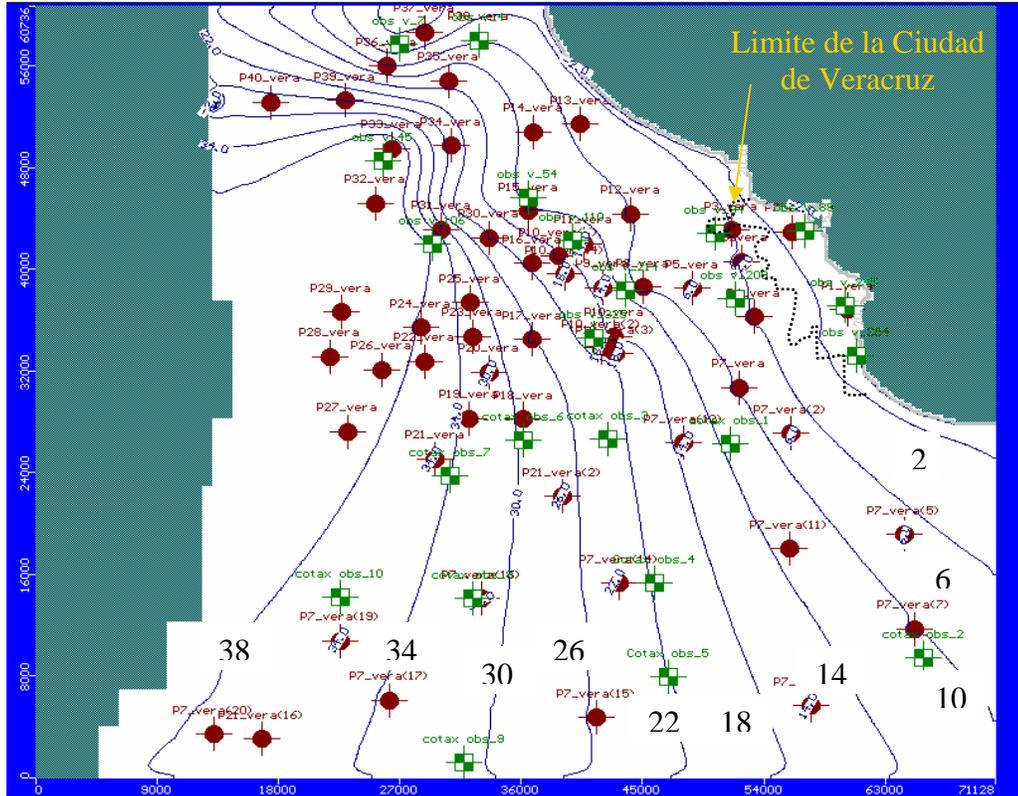


Figura V.3. Curvas de niveles estáticos para el año 1993.

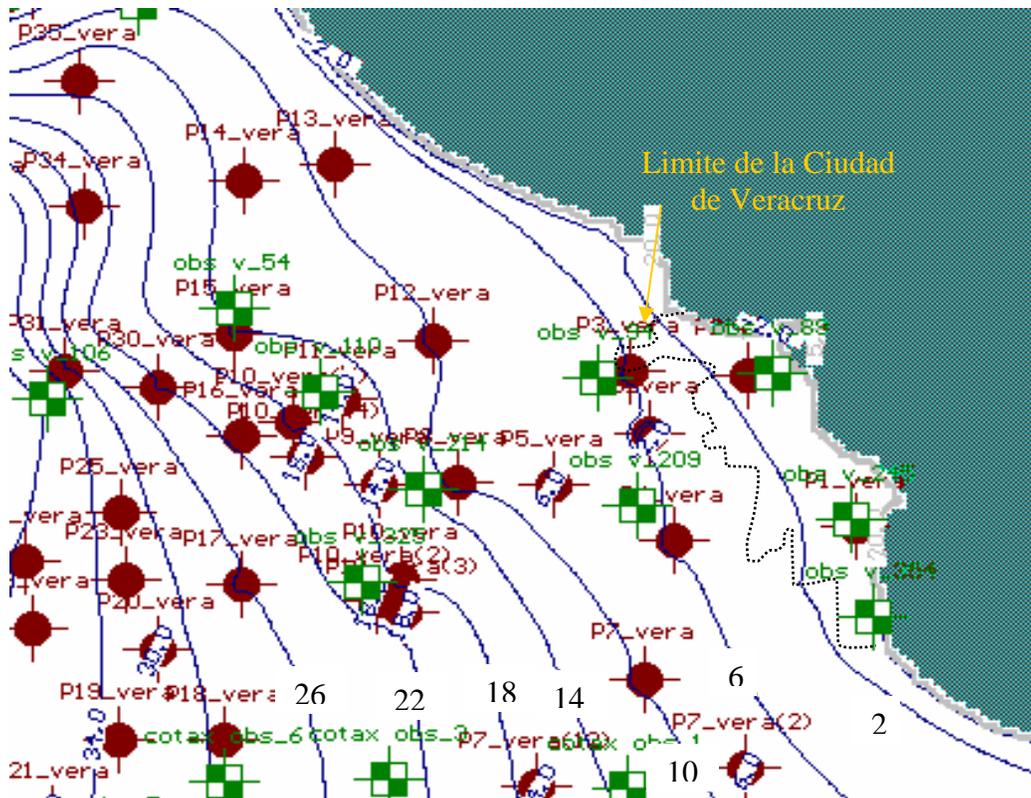


Figura V.4. Distribución de fuentes contaminantes para la simulación de intrusión para el año 1993.



### V.3 Año 2003

Los resultados corresponden a los primeros 10 años del modelado transitorio, es decir a partir de los datos del año 1993 se corrió el modelo para un periodo de 3650 días y los resultados son asignados a los niveles estáticos del año 2003, las curvas correspondientes a los datos observados en pozos estas representadas en rojo en la figura V.4.

Los vectores nos indican la dirección del flujo, el cual está regido por la geología y por la disposición topográfica del terreno, el flujo reproduce lo registrado dentro de los reportes hidrológicos, que como puede observarse, es casi perpendicular a la costa, por otro lado las curvas de nivel corresponden con las observaciones de pozos.

Dentro de los resultados presentados en la figura V.4 podemos ver que a diferencia de los niveles del año 1993 se denota un abatimiento para los pozos cercanos a la costa, el descenso del nivel estático es ocasionado claramente por los efectos de bombeo en la zona, así también los vectores cambian de dirección cerca de ellos. Por otra parte, las partículas asignadas dentro de la costa muestran un pequeño avance hacia el continente, con respecto a su posición original dentro de este período de tiempo.

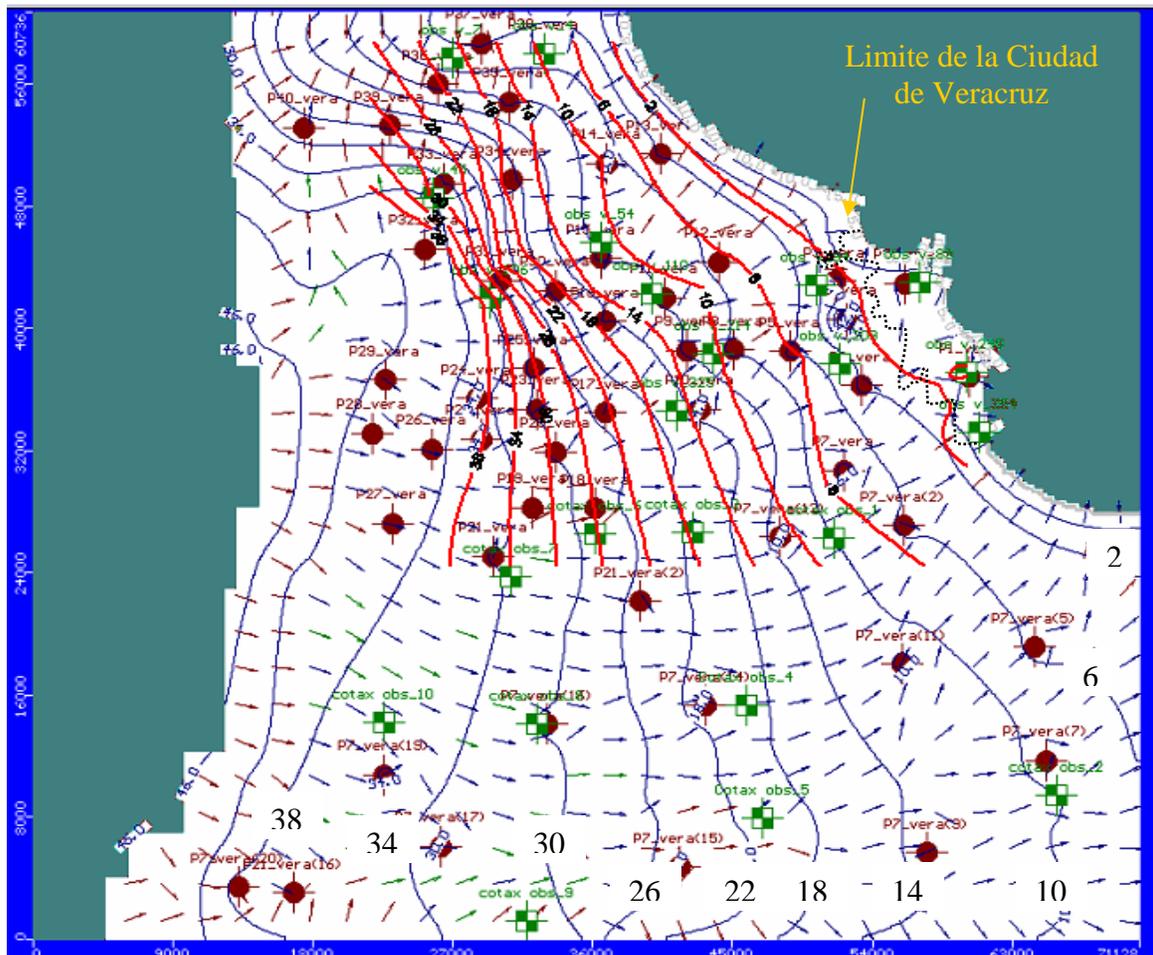


Figura V.4. Curvas de nivel estático para el año 2003.



En la figura V.5 se muestra la gráfica de correlación entre los niveles calculados contra los medidos en pozos, podemos ver que el error cuadrático medio es menor al del año 1993.

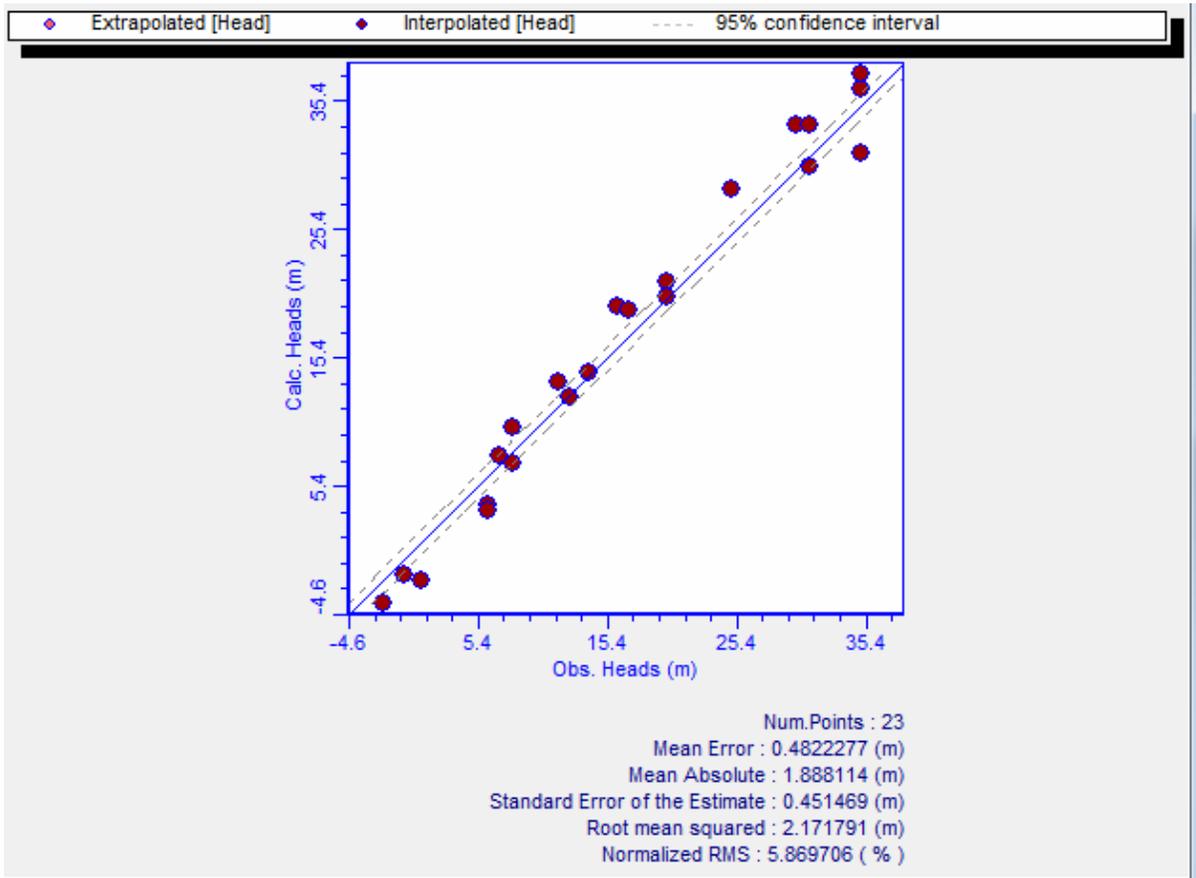


Figura V.5. Calibración para el año 2003.

Para el año 2003 (Figura V.6) se pueden observar tres conos de abatimiento, todos ellos situados en la periferia de la ciudad, los pozos que presentan estos abatimientos son: el pozo P3\_vera donde el cono de abatimiento es de 2 metros, el pozo P6\_vera con una magnitud de 12 metros y el pozo p7 donde se muestra un descenso de 6 metros, además, los niveles estáticos dentro de la ciudad sufrieron un abatimiento general.

Las curvas que describen el comportamiento de la intrusión salina, por medio de las fuentes asignadas a la línea costera (Figura V.6) muestran un avance de 750 metros hacia la parte NE de la Ciudad de Veracruz cerca del pozo P1\_vera.



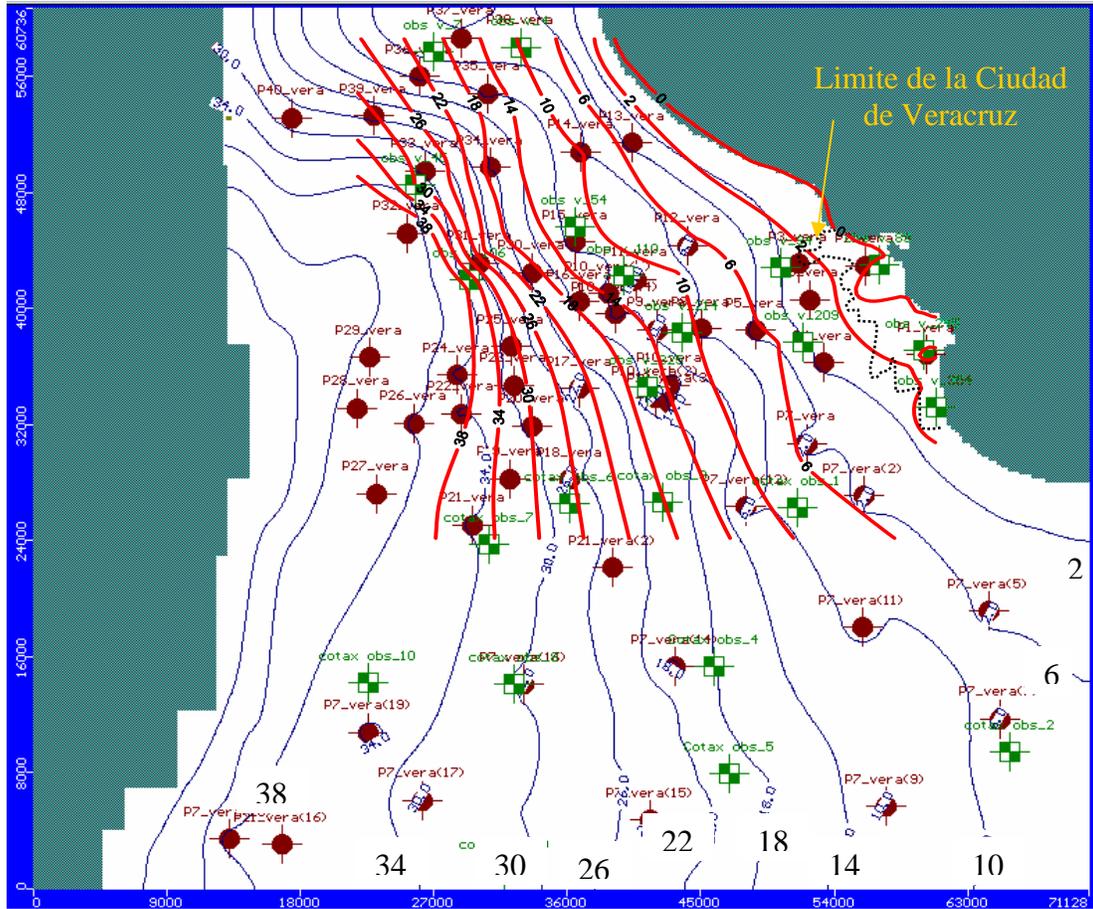


Figura V.7. Evolución del acuífero, campos de velocidades, nivel estático y fuentes contaminantes para el año 2006.

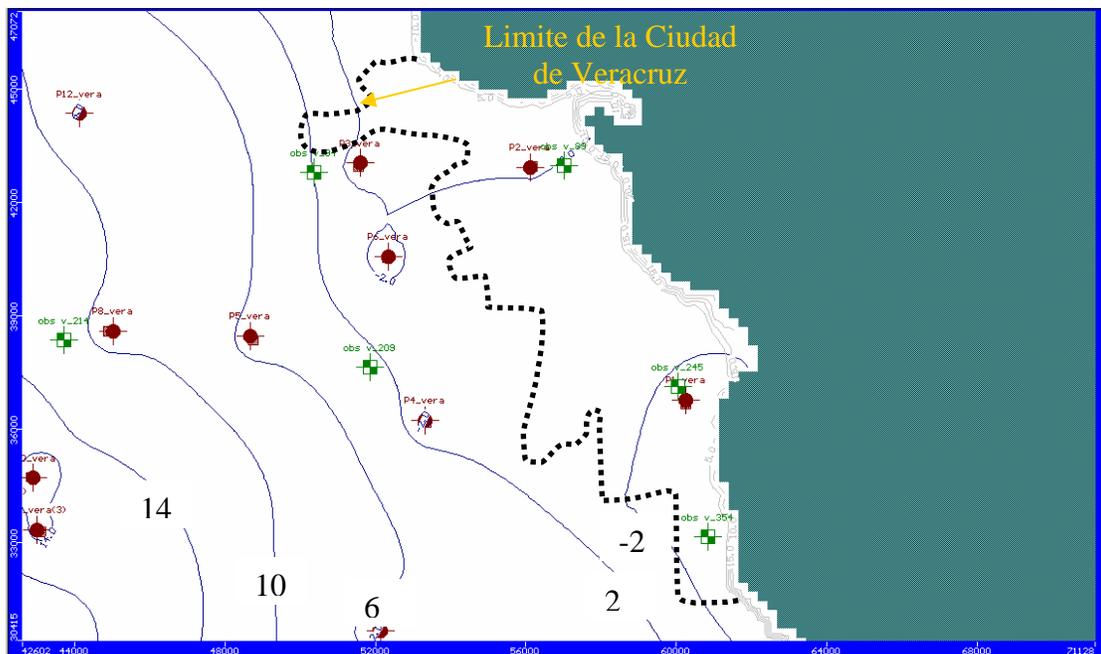


Figura V.8. Movimiento de contaminantes dentro de la ciudad de Veracruz año 2006.



### V.5 Año 2011

Considerando un aumento en los caudales de extracción del 10% respecto de los del 2003 las predicciones son las siguientes. El flujo mostrado en la figura V.9 para el año 2011 muestra un movimiento de las líneas equipotenciales, se denota un descenso en los niveles estáticos en el centro de la Ciudad de Veracruz. Dentro de esta área se encuentran los pozos P2\_vera, P3\_vera, P4\_vera y P6\_vera que muestran un descenso de entre 2 y 3 metros en su nivel estático. En la ciudad, los vectores que indican la dirección de flujo continúan con dirección hacia los pozos.

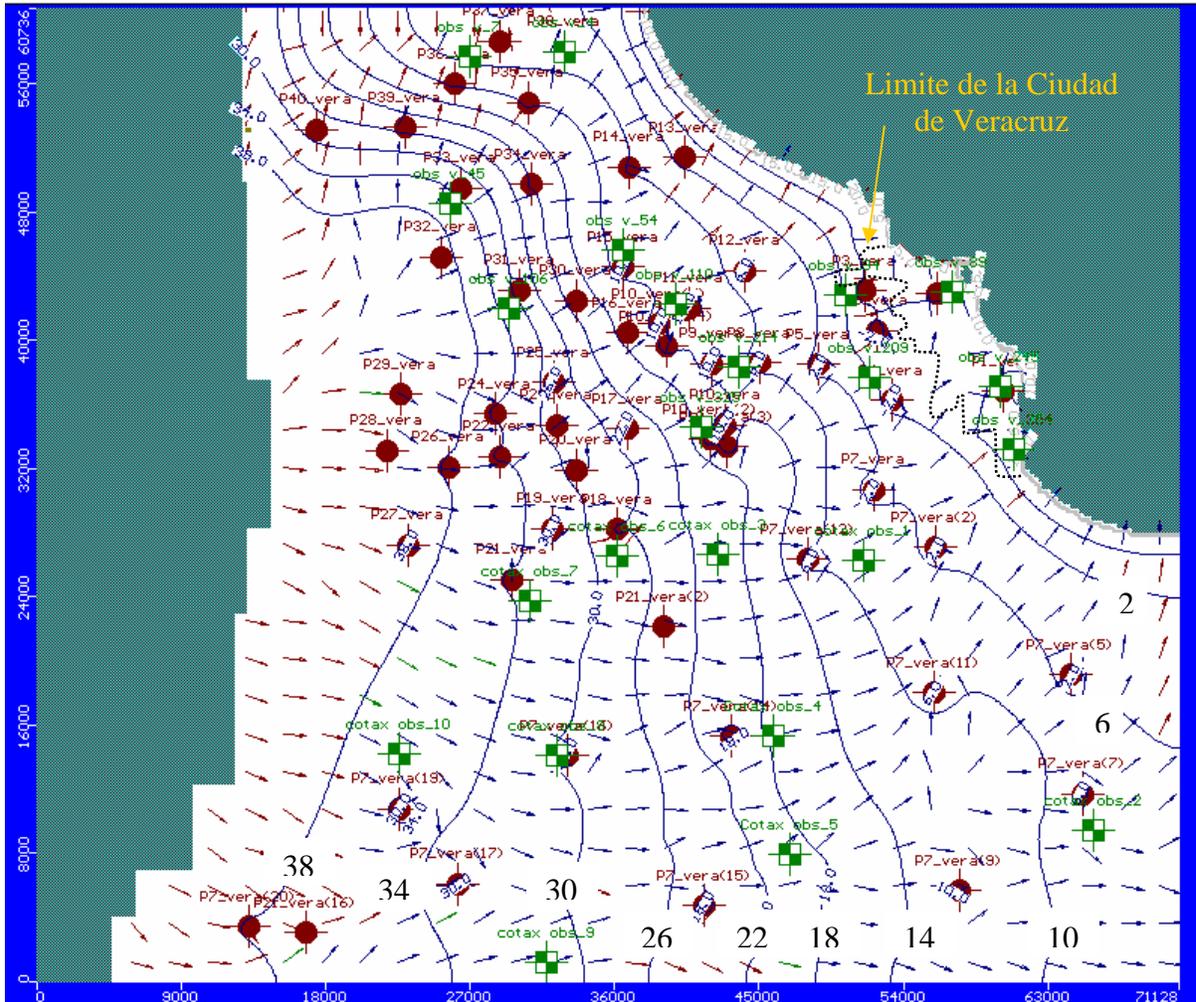


Figura V.9. Evolución de los niveles estáticos así como de las direcciones de flujo y dispersión de contaminantes del año 2011.

Los vectores de flujo muestran ya un cambio de dirección (figura V.9) mostrando que este está gobernado por la extracción en los pozos, dicho fenómeno no solo se observa dentro de la ciudad de Veracruz sino también en zonas alejadas, esto refleja que el impacto de las extracciones influye en el flujo de agua en la zona.

En la figura V.9 se aprecia el avance de los contaminantes dentro de la ciudad de Veracruz, con una aproximación al pozo P1\_vera cercano a la costa, los niveles de abatimiento son aún más notorios y generales en la ciudad de Veracruz y sus alrededores.

La intrusión salina para este año muestra un avance a lo largo de la costa que va de sur a norte, la intrusión salina cercana al pozo P1\_vera avanza y se propaga hacia el pozo P2\_vera.

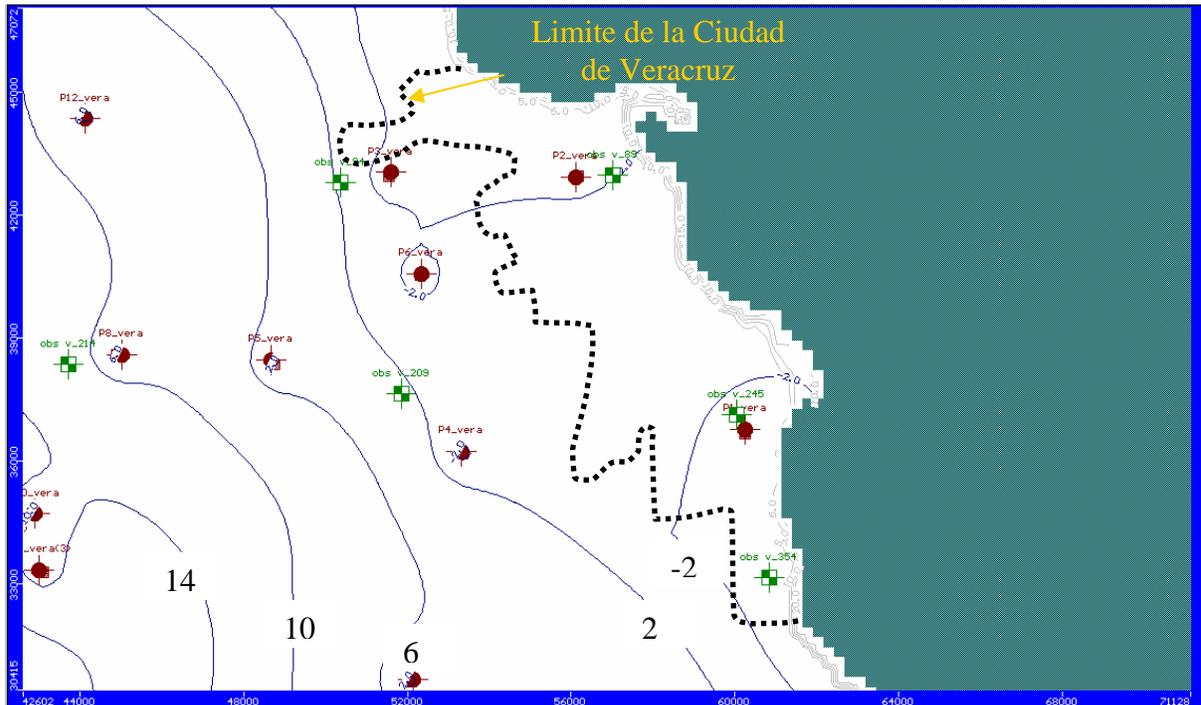


Figura V.9. Movimiento de contaminantes para la ciudad de Veracruz correspondiente al año 2011.

## V.6 Año 2016

La misma tendencia de descenso para las curvas equipotenciales del año 2011 es observada dentro de este registro, los vectores de flujo muestran que los efectos de la extracción son evidentes dentro de la ciudad de Veracruz, las curvas de contaminación alejadas de los pozos de extracción no muestran cambios en su distribución (figura V.10).

Los niveles estáticos para el año 2011 mostraron conos con 2 y 3 metros de abatimientos dentro de la ciudad, ahora para el año 2016 se muestran estos abatimientos como una condición general dentro de esta zona.

Las curvas que describen el movimiento de los contaminantes muestran poco avance comparado con los resultados del año 2011, la intrusión salina avanza 100 metros aproximadamente tierra adentro como lo muestra la figura V.11. La intrusión salina muestra también avance hacia el pozo P2\_vera.

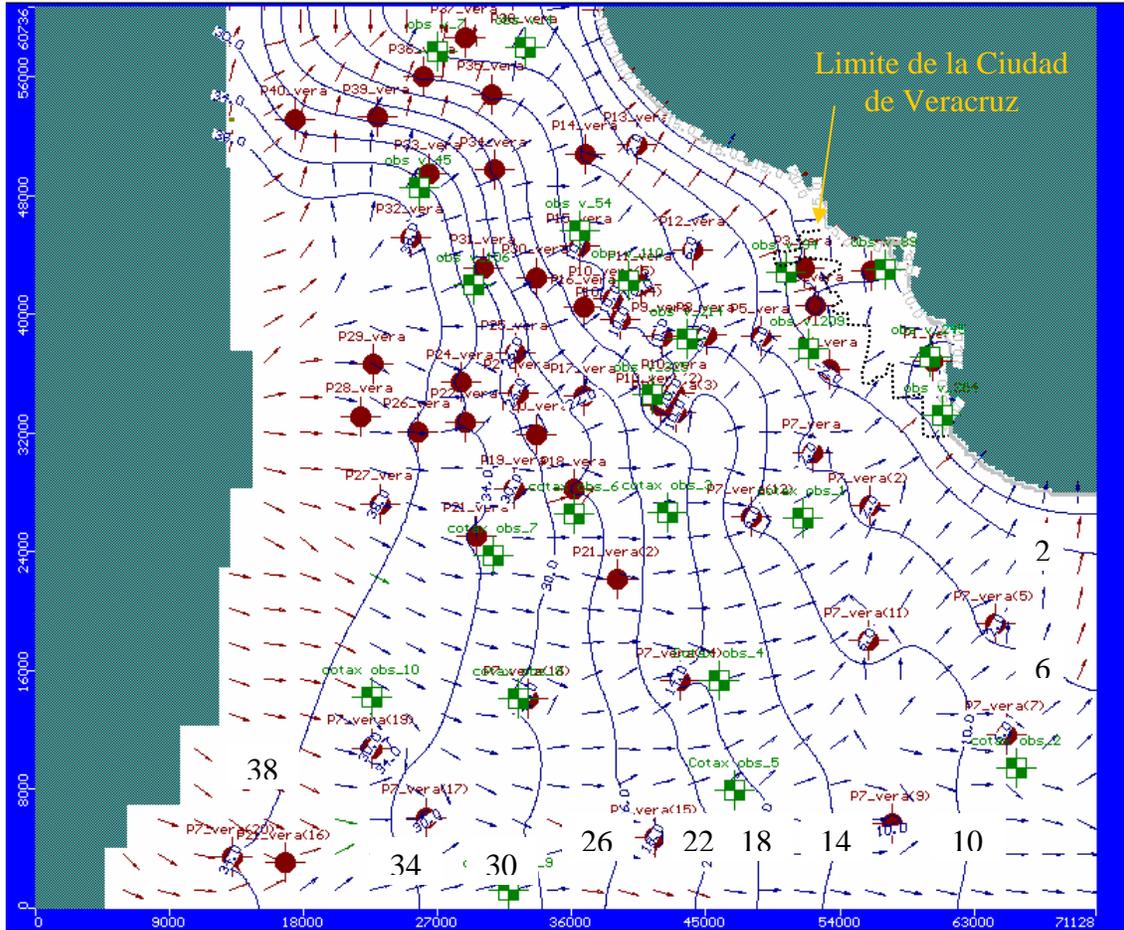


Figura V.10. Evolución del nivel estático para el año 2016.

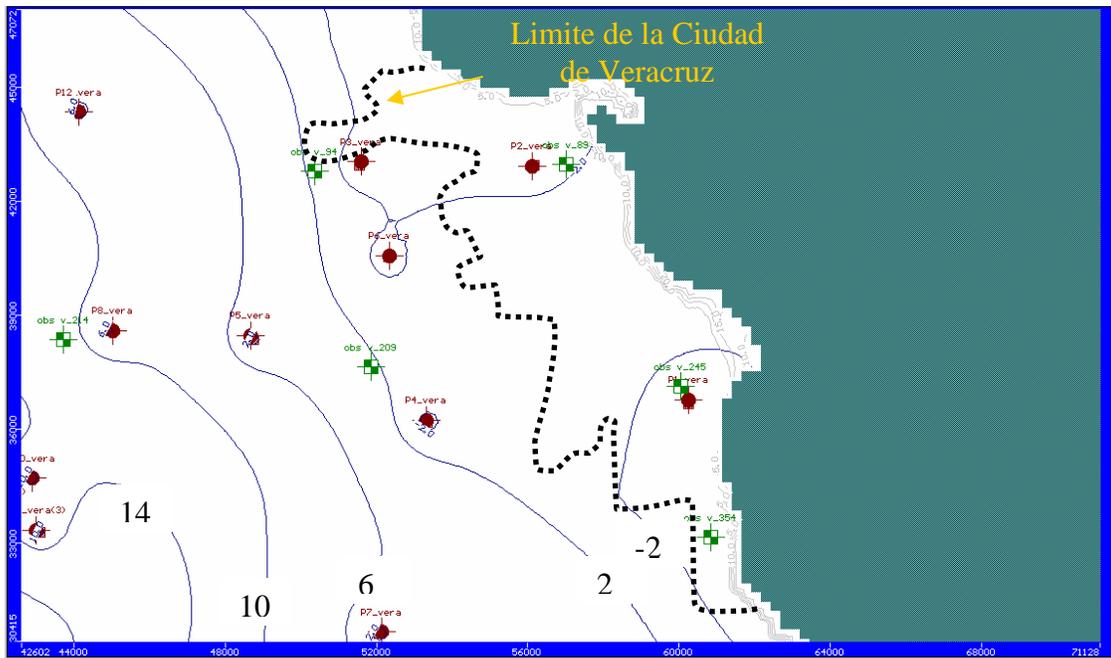


Figura V.11. Movimiento de los contaminantes dentro de la Ciudad de Veracruz para el año 2016.



## V.8 CONCLUSIONES

Los escenarios de explotación del acuífero Costera de Veracruz nos permiten establecer que existe un abatimiento dentro de la zona costera especialmente en la ciudad de Veracruz. Las proporciones de bombeo fueron elevadas un 10% dentro de los rangos declarados en estudios de CONAGUA para el acuífero Costera de Veracruz, la distribución y la cantidad de agua al ser bombeada impacta de forma clara en el modelo.

Las fuentes contaminantes colocadas dentro de la zona costera de Veracruz nos ayudan a visualizar el desplazamiento del agua salada considerada como el contaminante, el movimiento de este, es poco en las zonas de baja explotación, mientras que en la ciudad de Veracruz donde la explotación es mayor, se observa un movimiento de la pluma contaminante hacia el continente; los contaminantes han mostrado un avance persistente, por lo tanto, se concluye que aunque se cuenta con un importante flujo horizontal de agua dulce hacia el mar, la posibilidad de intrusión salina aumenta con el exceso de explotación en los pozos de la Ciudad de Veracruz.

Los elementos de mayor influencia en la intrusión salina son la distribución de pozos y la extracción por bombeo, el hecho de colocar pozos cercanos a la costa y en la periferia de la ciudad, provoca una disminución del flujo aumentando el riesgo de intrusión salina que en el modelo muestra un avance de 900 metros tierra adentro en un periodo de 23 años a partir de 1993 hasta el año 2016.

Los resultados que se muestran dan un panorama general del comportamiento del acuífero bajo las condiciones y consideraciones históricas aplicadas a este modelo, la modificación del flujo según los niveles de extracción nos reflejan la fragilidad del sistema en estudio.

Se recomienda una cuidadosa distribución de los nuevos pozos, la ubicación de cada uno es factor determinante para la explotación, se recomienda también explotar zonas más alejadas de la ciudad como el poblado de Santa Fe donde hay una mayor disponibilidad del recurso, así mismo se recomienda un control en la cantidad de extracción para cada uno de ellos especialmente los que se encuentren dentro de la ciudad.



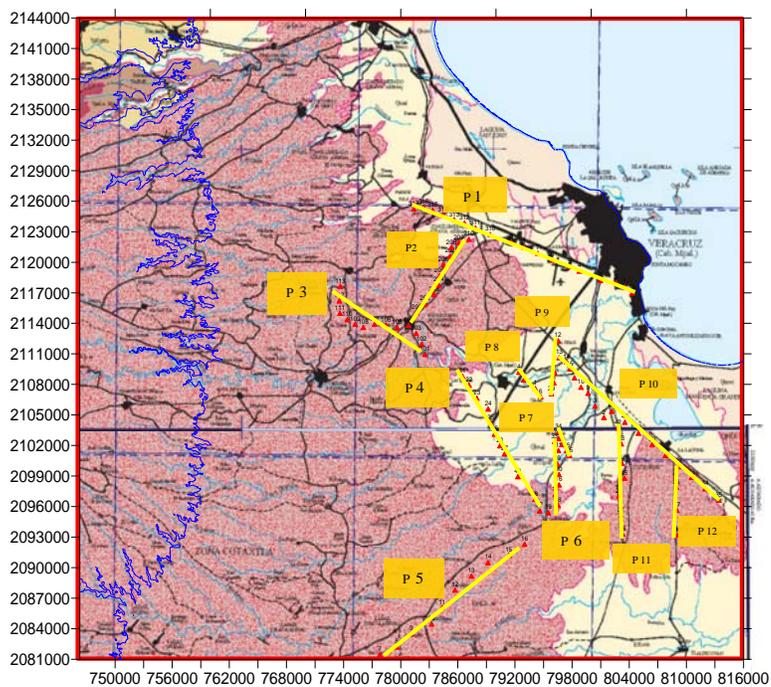
113	773668.126	2117552.83	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	165	7	14.5	0.776	64.6	1	10.3	6.48	60.4	15.6	15	11.2	19.3	165	16.3	0	0	0	0
112	773542.3414	2116134.367	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	121	7	136	1.5	335	1.84	103	41.6	14	53.5	31.9	67.5	10	197	40.7	0	0	0	0
111	773614.2185	2114913.411	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	170	7	39.9	1.59	15.6	3.98	56.1	24.4	30	40.5	41.2	130	13	404	49.7	0	0	0	0
110	774386.8978	2114284.978	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	91	6	31.7	2.04	4.44	1.67	18.3	22.8	68.2	68	6.66	256	66	0	0	0	0	0	
109	775213.485	2113836.097	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	155	5	24.3	5.48	80.3	19.4	30	85.1	62.4	70	13.5	0	0	0	0	0	0	0	
108	776076.011	2113530.858	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	155	4	76.5	1.6	8.64	13.5	40	155	18.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
107	777244.0147	2113836.097	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	181	6	150	1.77	40.7	38.2	62.3	19.3	18	181	46.4	209	4.21	0	0	0	0	0	
106	778447.9572	2113746.321	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	130	7	116	1.26	163	18.7	24.2	30	55.6	100	11.8	70	47.2	80	21.2	0	0	0	0
105	779633.93	2113476.993	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	114	6	30	3	120	12.6	33	34.4	50	80	25.7	210	20	0	0	0	0	0	
104	780822.9773	2113744.99	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	114	5	98.4	1.3	414	4.44	31.9	14.4	118	99.5	22	0	0	0	0	0	0	0	
103	781631.5954	2112937.005	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	169	6	146	2	234	9.21	60	45.3	26	50.3	69.8	73.3	12.8	0	0	0	0	0	
102	782188.6432	2111859.691	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	226	4	48.3	9.12	91.4	15.2	27.2	226	13.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
101	782548.0294	2110872.153	SARHb,1980-Jamapa	Wenner	500	INF05-Ipi2Win	3	228	5	65	5.61	20.6	30.9	53.4	66.8	17.5	130	14	0	0	0	0	0	0	0	
21	786492.7689	2108731.4678	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	166	7	25	1	64	4.8	136	28.2	34	166	50	50	27	200	6.6	0	0	0	0
22	787174.0710	2107850.2958	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	161	5	25	1.1	75	10.6	19.5	61.3	11.8	447	2.3	0	0	0	0	0	0	0	
23	788002.5867	2106565.3348	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	165	6	32	1.5	55	4.2	23	33.3	39	32	13.5	319	31	0	0	0	0	0	
24	789179.1622	2105506.3238	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	217	7	19	1.1	24	3.9	69	28	42	39	71	41	36	137	14	0	0	0	0
25	789468.2849	2104185.3543	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	100	6	19	1.6	12	4.9	20	10	52	18.5	8.6	370	7.4	0	0	0	0	0	
26	789857.5133	2103042.4456	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	83	6	12.5	0.92	22	2.58	15	2	62	8.8	23	82.7	9.5	0	0	0	0	0	
28	790420.2495	2101905.1956	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	125	4	2.6	1.1	9.5	4.3	34	125	9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	790908.4253	2101107.2625	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4	114	5	3.2	1.1	4.9	2	11	12.9	46	114	6.7	0	0	0	0	0	0	0	
40	792304.7652	2098864.5855	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4b	50	9	11.5	1	8.4	1	12	1.8	7	4	13.1	10.2	19.2	21	44.5	29	9.1	242	1.9
38	794074.7906	2096623.4762	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4b	90	6	12	1.5	18	3	7	1	16.8	17.5	43	72	10.2	0	0	0	0	0	
37	794594.3032	2095508.3462	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	4b	104	6	30	0.75	7.2	2.65	65	14.4	16.5	38.2	34	66	13.3	0	0	0	0	0	
7	777804.0862	2081339.6025	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	5	60	5	11.2	1	17	2.8	155	60.2	69	60	17	0	0	0	0	0	0	0	
8	779588.6065	2082120.9188	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	5	64	7	30	1.3	13.2	2.7	61	10	32	6	58	64	15	222	41	0	0	0	0
9	781090.7838	2083428.8038	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	5	64	6	14.5	1.6	32	9.9	72	27.5	44	36	12	315	36	0	0	0	0	0	
10	783247.7442	2084391.1526	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	5	133	5	20.5	1	25.5	8	64	23	19	110	9	0	0	0	0	0	0	0	
11	784355.0847	2086007.2474	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	5	74	7	30	0.82	12	2.78	97	8.4	170	17	59	57	13	549	78	0	0	0	0
12	785708.7642	2087721.4175	SARHa,1980-Cxtla	Schulumberger	400	INF05-Ipi2Win	5	134	8	19	1.1	34	4.7	25	3.7	83	6.5	34	27	56	25	21	82	14.5	0	0



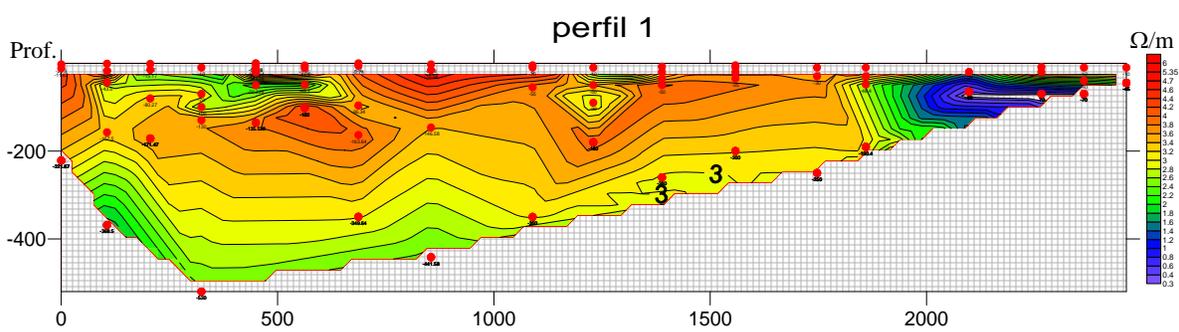


# ANEXO B

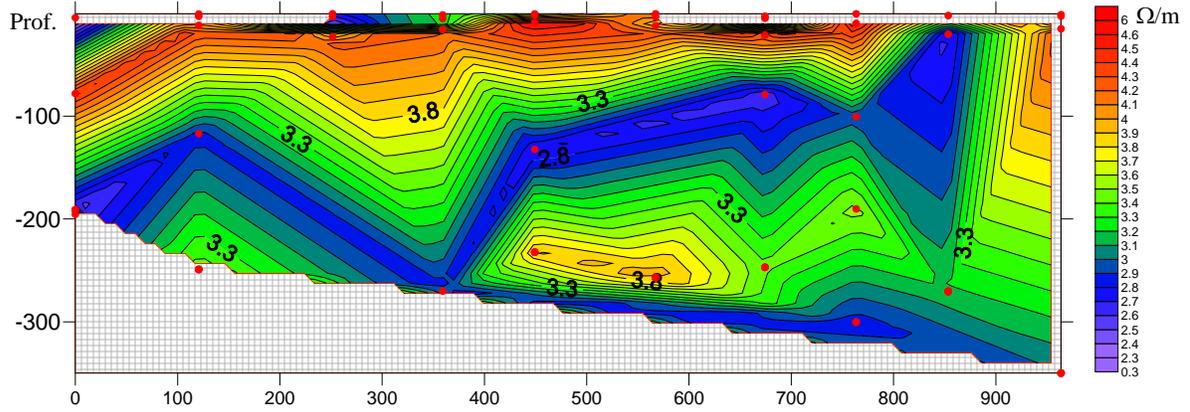
## FIGURAS DE LOS SEV'S



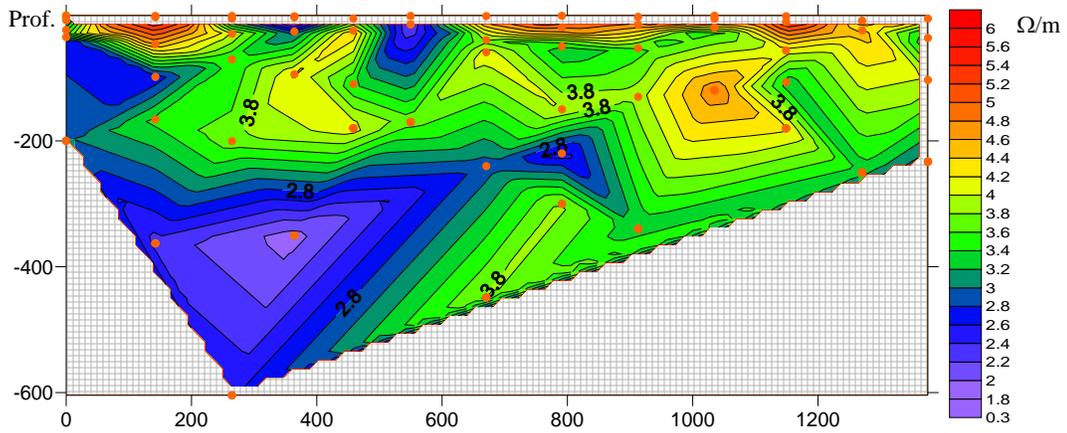
Ubicación de líneas SEV's



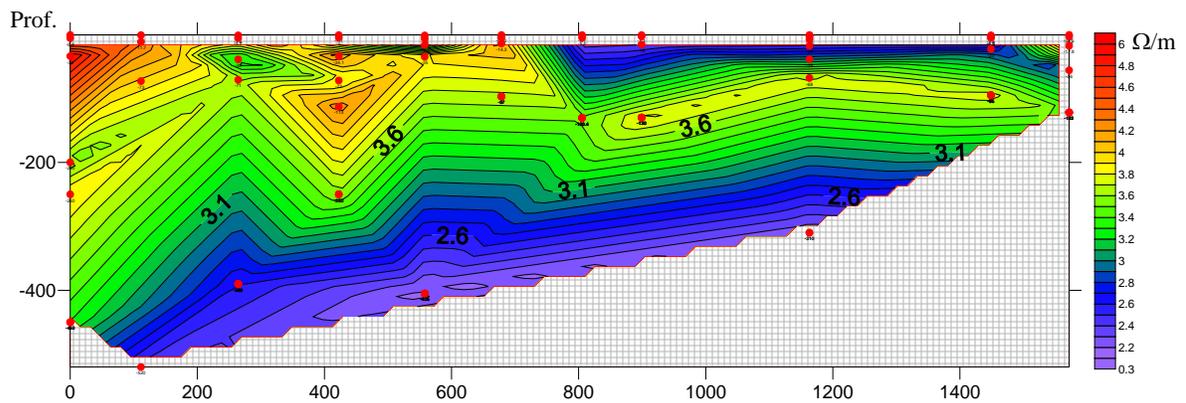
perfil 2

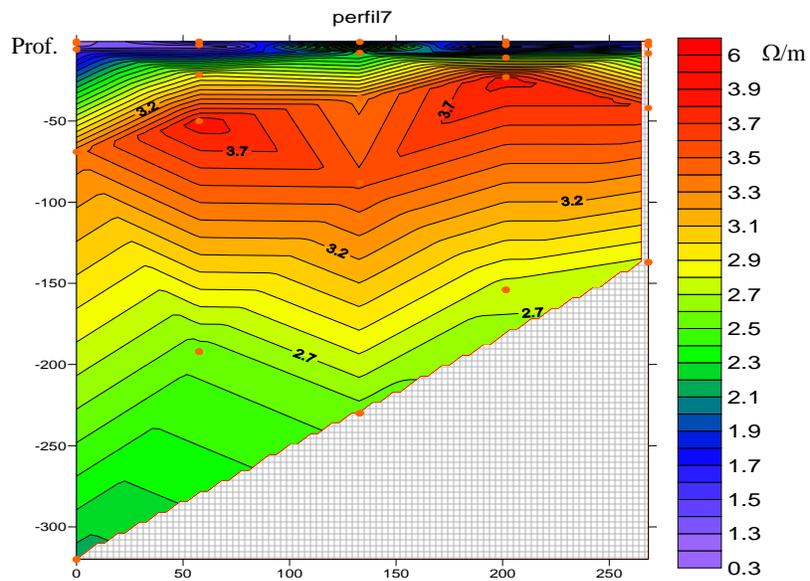
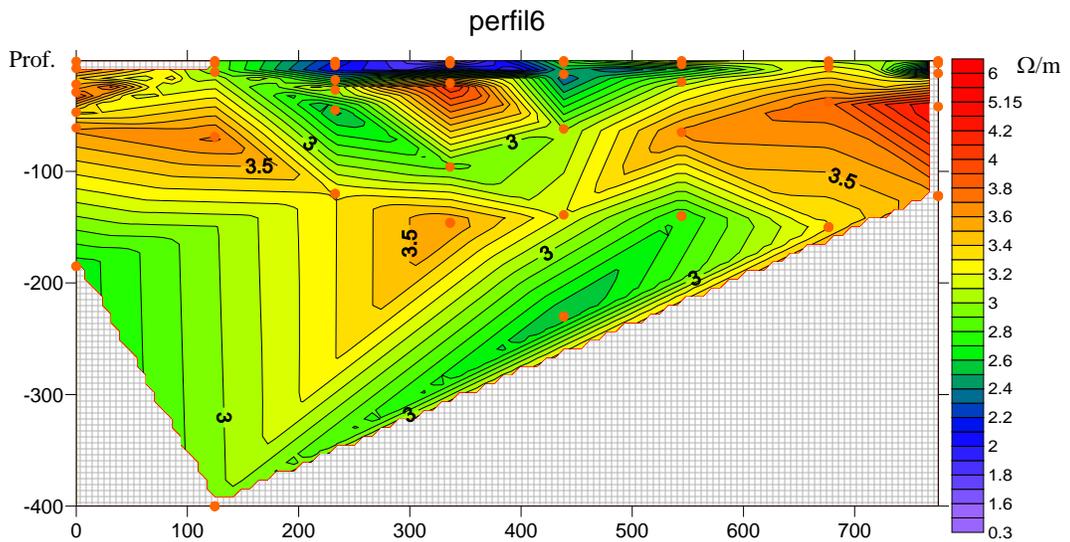
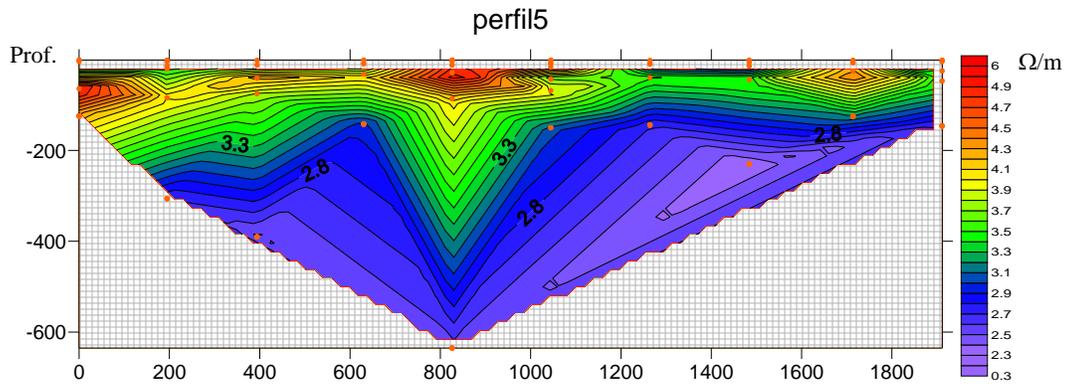


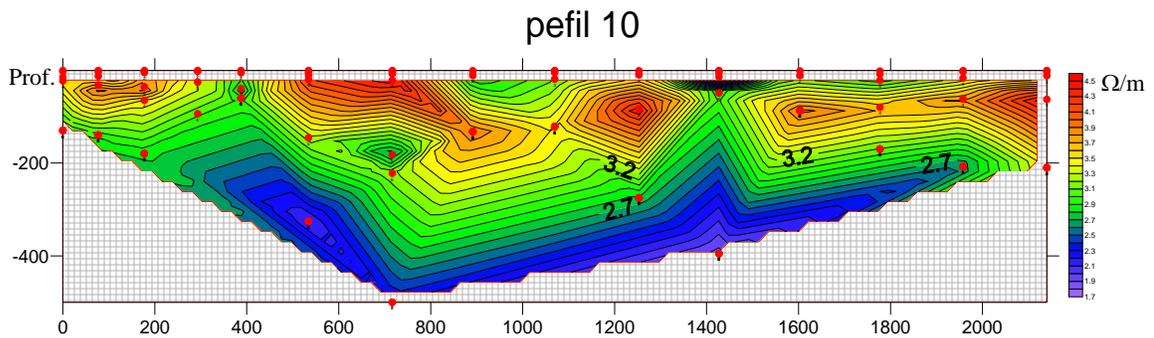
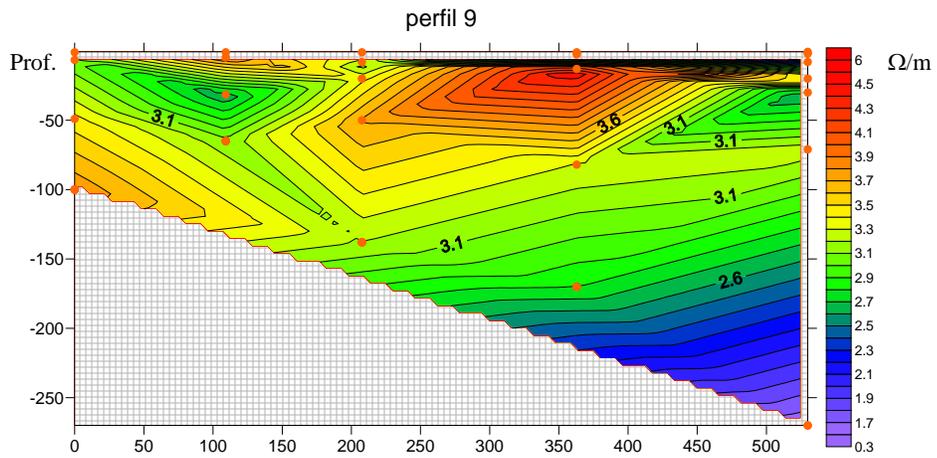
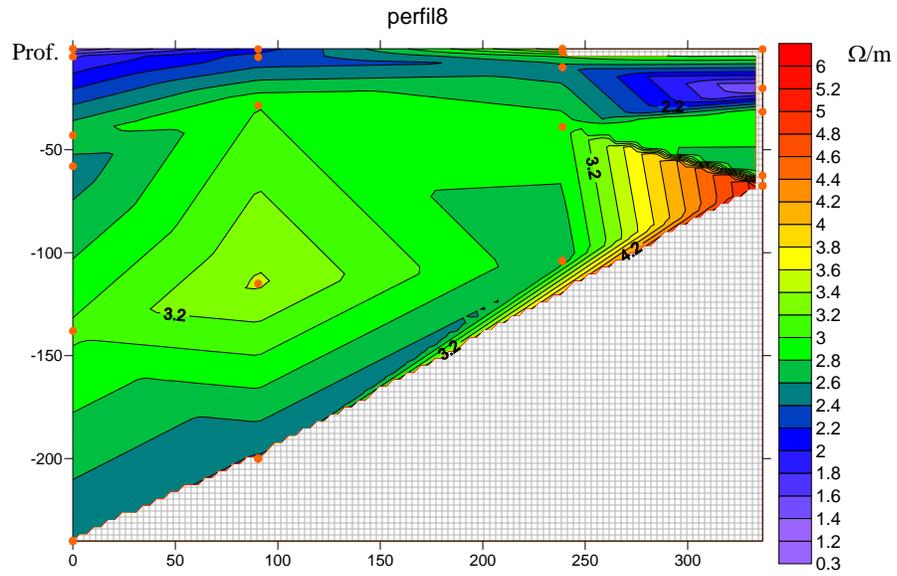
perfil 3



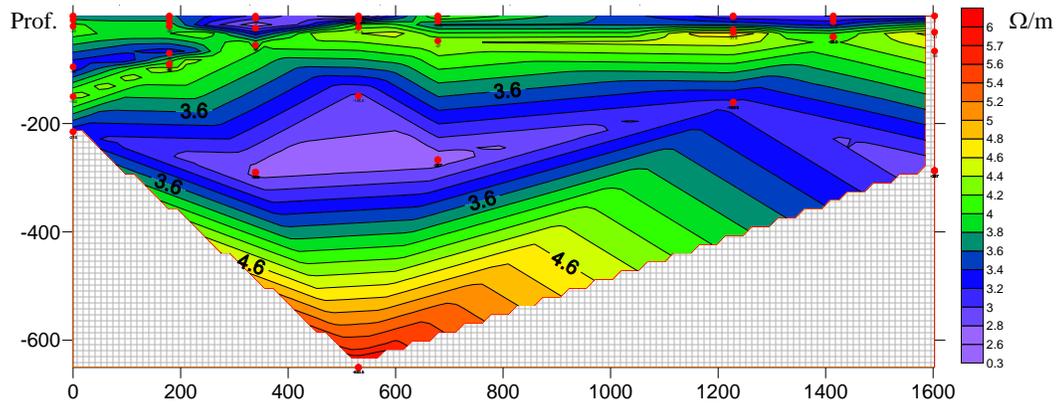
perfil 4



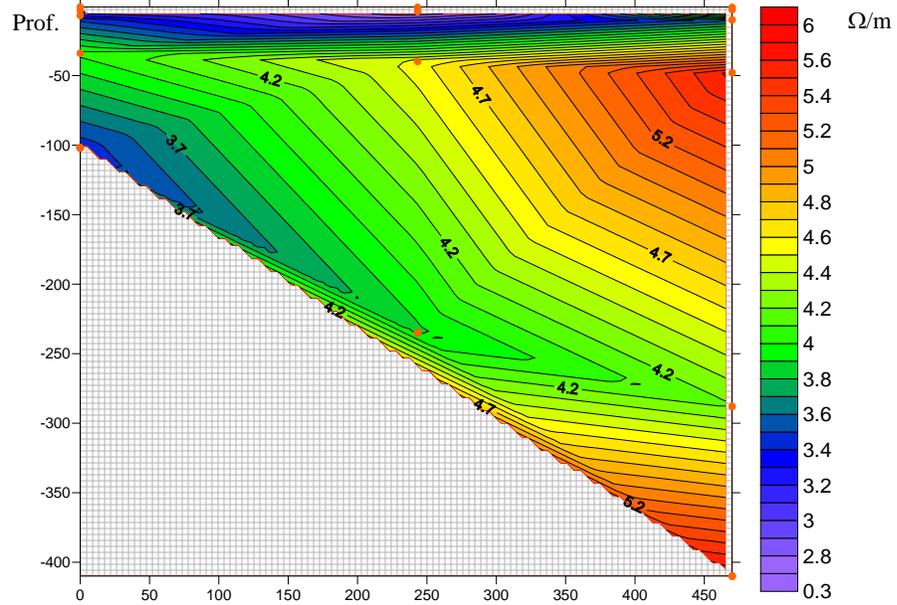




perfil 11



perfil 12



## ANEXO C DATOS DE PIEZOMETRIA

Pozo	UTMX	UTMY	Usuario	Municipio	Uso	Elev.Terr	Prof.N e93	Prof.NE. 97	Prof.NE03	Elev.NE.93	ElevNE9 7	ElevNE03	Info- Geog	Elev_NE 2006	Fuente
V-3	774178	2141160	Asoc. U. Ejido Mata Grande (P-1)	Paso de Ovejas	Agrícola	29.36	27.53	28.08	27.31	1.83	1.28	2.05	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-4	777865	2140630	C.M.A.P.S. Cardel (Pobl. Salmoral)	La Antigua		15.39	6.29	5.28	4.17	9.1	10.11	11.22		9.94	CNA. Gerencia Regional X.
V-7	770695	2139630	Asoc. U.U. de R. El Guayabal (P-1)	Paso de Ovejas	Agr-Púb-Urb	52.72	50.51	49.85	47.93	2.21	2.87	4.79	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-12	775657	2137950	CEAS (Pobl. El Faisan)	Paso de Ovejas	Púb-Urb	18.00	2.00	2.10	2.19	16	15.9	15.81	S	15.52	CNA. Gerencia Regional X.
V-14	772689	2137170	CEAS (Pobl. Carretas)	Paso de Ovejas	Púb-Urb	20.00	6.78	6.89	7.98	13.22	13.11	12.02	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-15	776228	2136850	CEAS (Pobl. La Vibora)	Paso de Ovejas	Púb-Urb	28.00		11.96	11.84		16.04	16.16	S	16.14	CNA. Gerencia Regional X.
V-17	763335	2135680	Julian García Acosta	Puente Nacional	Agrícola	140.10		67.57	67.36		72.53	72.74		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-18	768442	2135940	Francisco Mora Domínguez	Paso de Ovejas		94.29		56.13	56.78		38.16	37.51		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-20	785155	2134000	Fracc. La Catalana, S.A. de C.V.	La Antigua	Púb-Urb	43.70		41.65	43.12		2.05	0.58		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-27	782039	2133310	CMAPS Cardel (Pobl. La Pureza y El Hatillo)	La Antigua	Púb-Urb	17.26		6.82	6.99		10.44	10.27		10.04	CNA. Gerencia Regional X.
V-28	772640	2132640	Benito Coquet Lagunes	Paso de Ovejas	Agrícola	60.00		31.84	32.04		28.16	27.96		27.79	CNA. Gerencia Regional X.
V-37	775978	2132170	Gerardo Treviño García	Paso de Ovejas	Agroindust	27.50		10.24	10.55		17.26	16.95		16.87	CNA. Gerencia Regional X.
V-45	771056	2131110	Asoc. U.U. de R. El Tejon	Paso de Ovejas	Agrícola	60.00	14.30	15.07	15.31	45.7	44.93	44.69		30	CNA. Gerencia Regional X.
V-53	770758	2127540	Asoc. U.U. de R. Palmaritos (P-4)	Paso de Ovejas	Agrícola	70.00		22.88	23.64		47.12	46.36	S	46.18	CNA. Gerencia Regional X.
V-54	781480	2127860	CRAS Pto. de Veracruz (Pobl. Vargas)	Veracruz	Púb-Urb	20.00	7.26	7.97	8.37	12.74	12.03	11.63	S	11.53	CNA. Gerencia Regional X.
V-58	796131	2127470	CRAS Pto. de Veracruz (Pozo N° 45)	Veracruz		20.00		8.42	9.78		11.58	10.22		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-60	788972	2127300	Ejido Villarin (P-4)	Veracruz		25.00	14.50	18.76	19.51		6.24	5.49		6.41	CNA. Gerencia Regional X.
V-62	775768	2126780	Ejido Plan de Manantial	Paso de Ovejas		30.00	9.46	9.56	9.57	20.54	20.44	20.43		20.73	CNA. Gerencia Regional X.
V-77	799546	2126020	CRAS Pto. de Veracruz (P-6)	Veracruz	Púb-Urb	24.00		20.78	7.01		3.22	16.99		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-78	788733	2125780	Ejido Villarin (P-2)	Veracruz		34.00	22.97	24.54	25.43	11.03	9.46	8.57		9.57	CNA. Gerencia Regional X.

V-86	781750	2125520	Camerino Arrieta Gonzalez	Veracruz	Agrícola	12.50		6.85	5.56		5.65	6.94		12.5	CNA. Gerencia Regional X.
V-89	801107	2125340	Remigio y Luis Haces Sordo (Hotel Oriente)	Veracruz	Servicios	1.44	1.91	1.82		-0.47	-0.38		S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-94	794707	2125140	CRAS Pto. de Veracruz (P-39)	Veracruz	Púb-Urb	30.00	20.38	21.44	23.82	9.62	8.56	6.18	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-104	778722	2124740	CEAS (Pobl. Puente Jula)	Paso de Ovejas	Púb-Urb	31.00		24.88	24.43		6.12	6.57		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-106	774723	2124370	Florencio Acosta Lagunes	Paso de Ovejas	Agrícola	66.67	28.96	29.65	29.68	37.71	37.02	36.99	S	36.97	CNA. Gerencia Regional X.
V-110	784629	2124580	Carlos Sosa Lagunes (R.San Miguel)	Veracruz	Agrícola	20.00	3.15	3.56	3.54	16.85	16.44	16.46		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-117	797381	2124260	CRAS Pto. de Veracruz (P-32)	Veracruz	Púb-Urb	27.00		21.66	21.05		5.34	5.95		3.35	CNA. Gerencia Regional X.
V-119	786453	2123900	Gasolinera Santa Fe	Veracruz	Servicios	20.00	3.72	4.64	5.38	16.28	15.36	14.62	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-125	799903	2123870	CRAS Pto. de Veracruz (P-3)	Veracruz		10.00	6.21	9.14	11.34	3.79	0.86	-1.34	S	-0.42	CNA. Gerencia Regional X.
V-145	781909	2122790	Julio Alejandro Hernández G.	Manlio F. Altamirano	Agrícola	20.00		3.62	3.34		16.38	16.66		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-164	790168	2121870	Metalver, S.A. de C.V.	Veracruz		20.00	14.70	14.97	16.48	5.3	5.03	3.52	S		CNA. Gerencia Regional X.
V-170	795863	2122360	Aluminio y Derivados, S.A. de C.V. (P-1)	Veracruz	Industrial	20.00	10.46	12.49	13.47	9.54	7.51	6.53	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-178	787132	2121600	Miguel Niceforo García Palacios	Veracruz	Agr-Pec	32.86		19.70	20.84		13.16	12.02		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-191	792023	2121130	Cd. Industrial Bruno Pagliai (P-2)	Veracruz	Industrial	30.00		22.80	23.43		7.2	6.57		6.59	CNA. Gerencia Regional X.
V-209	794869	2120560	C.F.E. (Bodega, entrada Aluminio y Derivados, S.A. de C.V.)	Veracruz	Servicios	10.00	4.07	4.47	3.89	5.93	5.53	6.11		5.91	CNA. Gerencia Regional X.
V-211	785307	2120500	Manuel Ortiz	Veracruz	Agrícola	46.00		30.00	30.84		16	15.16		15.81	CNA. Gerencia Regional X.
V-214	788347	2120550	Poblado Sta. Rita	Veracruz		58.00	42.00	44.29	45.5	16	13.71	12.5			CNA. Gerencia Regional X.
V-230	803010	2119830	CRAS Pto. de Veracruz (P-7A)	Boca del Río	Púb-Urb	20.00		17.71	11.58		2.29	8.42		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-232	777426	2119520	Rodhe López Meza	Manlio F. Altamirano		35.00		17.49	17.54		17.51	17.46		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-242	796194	2119930	Esc. de Aviación Naval	Veracruz	Servicios	25.00		17.10	17.28		7.9	7.72		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-243	790704	2119450	C.F.E. (Subestación Eléctrica Dos Lomas)	Veracruz	Servicios	39.58	24.62	25.39	26.55	14.96	14.19	13.03		0	CNA. Gerencia Regional X.

V-245	803956	2119200	Unión Ganadera Regional del Centro de Veracruz	Boca del Río	Servicios	8.00	5.62	5.61	5.63	2.38	2.39	2.37	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-255	804621	2119730	Fracc. Costa de Oro	Boca del Río		6.00		3.40	3.52		2.6	2.48		2.45	CNA. Gerencia Regional X.
V-261	768230	2118610	C.M.A.P.S. Soledad de Doblado (Pobl. Mata Cazuela)	Soledad de Doblado	Púb-Urb	100.00		45.39	46.41		54.61	53.59	S	53.21	CNA. Gerencia Regional X.
V-264	793454	2119370	Miguel Urreta Paul	Veracruz		28.00		15.68	16.02		12.32	11.98		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-275	799169	2118660	Isabel Cantu (Rancho La Roca)	Veracruz	Dom.	10.00		2.86	2.45		7.14	7.55		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-278	804018	2118900	S.C.T. (Residencia General)	Boca del Río	Servicios	6.00		4.72	4.52		1.28	1.48		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-286	804786	2118600	Desarrollo Turístico del Golfo, S.A. de C.V. (Hotel Torremar)	Boca del Río	Servicios	6.00		4.78	4.86		1.22	1.14		1.19	CNA. Gerencia Regional X.
V-290	773947	2117560	CRAS Pto. de Veracruz (Pobl. Tenenexpan)	Manlio F. Altamirano	Púb-Urb	35.50		6.71	6.64		28.79	28.86	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-294	788745	2117540	Asoc. U.U. de R. Ej. El Cedral (P-1)	Medellin	Agrícola	65.00	49.76	52.54	54.08	15.24	12.46	10.92		11.87	CNA. Gerencia Regional X.
V-310	796322	2117440	Ejido Mata de Pita	Veracruz		26.00		20.38	20.54		5.62	5.46		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-315	804539	2117580	Jose Luis Lagunes R.(Rest. Villa Rica)	Boca del Río	Servicios	5.00		3.16	2.93		1.84	2.07		1.98	CNA. Gerencia Regional X.
V-316	778547	2117010	Gerardo Treviño García	Manlio F. Altamirano	Agrícola	25.00		9.35	8.92		15.65	16.08		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-325	786183	2116820	Asoc. U.U. de R. Ej. Mata Loma (P-1)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	55.69	34.79	37.64	39.5	20.9	18.05	16.19		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-329	776242	2116640	Asoc. U.U. de R. Ej. Tenenexpan (P-5)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	30.00		8.01	7.85		21.99	22.15		0	CNA. Gerencia Regional X.

V-335	773892	2115370	Ejido Loma de los Carmona	Soledad de Doblado		45.00		20.32	20.69		24.68	24.31		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-336	781799	2116630	Asoc. U. Ej. Fco. J. Moreno (P-4)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	28.00		17.03	17.46		10.97	10.54		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-344	788741	2115940	CRAS Pto. de Veracruz (Pobl. El Cedral)	Medellin	Púb-Urb	48.00	26.26	29.39	31.08	21.74	18.61	16.92	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-347	767401	2115220	Asoc. U.U. de R. Ej. Izote y Tizaltepetl (P-4)	Soledad de Doblado	Agrícola	66.67		11.22	11.18		55.45	55.49		55.29	CNA. Gerencia Regional X.
V-354	804752	2115300	Jorge Malpica Martínez (Gasolinera La Boqueña)	Boca del Río	Servicios	6.00	4.61	4.67	4.56	1.39	1.33	1.44	S	1.37	CNA. Gerencia Regional X.
V-355	771585	2115120	Asoc. U.U. de R. Espinal de Sta. Barbara (P-2)	Soledad de Doblado	Agrícola	100.00		65.84	66.09		34.16	33.91		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-363	780022	2114230	Asoc. U.U. de R. Ej. Manlio F. Altamirano (P-4)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	25.00		15.36	15.56		9.64	9.44		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-366	774553	2114180	CRAS Pto. de Veracruz (Pobl. Loma del Faro)	Manlio F. Altamirano		26.38		4.33	4.66		22.05	21.72		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-384	770619	2113170	Asoc. U.U. de R. Vista Hermosa y La Unión (P-1)	Soledad de Doblado	Agrícola	100.00		56.10	56.92		43.9	43.08	S	42.66	CNA. Gerencia Regional X.
V-385	777630	2113770	Asoc. U.U. de R. Ej. El Sauce (P-1)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	40.00		20.74	20.51		19.26	19.49	S	0	CNA. Gerencia Regional X.
V-390	796516	2112710	Francisco Díaz Gonzalez	Medellin	Agrícola	13.00		7.07	6.78		5.93	6.22	S	5.38	CNA. Gerencia Regional X.
V-406	776269	2110880	Ejido Plataforma	Manlio F. Altamirano		38.00		16.35	17.59		21.65	20.41			CNA. Gerencia Regional X.
V-413	781226	2110130	Patronato de Agua Villa del Río	Manlio F. Altamirano	Púb-Urb	33.40		19.51	19.98		13.89	13.42		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-414	778125	2110050	Florencio Acosta Lagunes (Rcho 4 Vtos)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	55.00		30.20	31.15		24.8	23.85		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-425	769970	2109560	Centro de Rehabilitación "El Chaparral"	Soledad de Doblado	Dom.	81.91		39.37	40.55		42.54	41.36		40.59	CNA. Gerencia Regional X.
V-426	767374	2109090	Ejido El Coyol	Soledad de Doblado		125.00		53.45	54.63		71.55	70.37		0	CNA. Gerencia Regional X.
V-440	774922	2107080	Asoc. U.U. de R. San Cenobio (P-1)	Manlio F. Altamirano	Agrícola	80.00		43.05	43.72		36.95	36.28	S	35.82	CNA. Gerencia Regional X.

## ANEXO D

### NORMA OFICIAL MEXICANA 1994 Y MODIFICACIÓN 2000

#### **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-  
Secretaría de Salud.

GUSTAVO OLAIZ FERNANDEZ, Director General de Salud Ambiental, por acuerdo del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 3o. fracción XIV, 13 apartado A fracción I, 118 fracción II y 119 fracción II de la Ley General de Salud; 38 fracción II, 40 fracción I y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 218, 224, 227 y demás aplicables del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios; 8o. fracción IV y 25 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud, y

#### **INDICE**

0. INTRODUCCION
1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION
2. REFERENCIAS
3. DEFINICIONES
4. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DEL AGUA
5. TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACION DEL AGUA
6. BIBLIOGRAFIA
7. CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES
8. OBSERVANCIA DE LA NORMA
9. VIGENCIA

#### **0. Introducción**

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización.

#### **1. Objetivo y campo de aplicación**

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

## **2. Referencias**

NOM-008-SCF1-1993 "Sistema General de Unidades de Medida".

## **3. Definiciones**

3.1 Ablandamiento: Proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.

3.2 Adsorción: Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.

3.3 Agua para uso y consumo humano: Aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.

3.4 Características bacteriológicas: Son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales.

3.5 Características físicas y organolépticas: Son aquellas que se detectan sensorialmente.

Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.

3.6 Características químicas: Son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

3.7 Características radiactivas: Son aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

3.8 Coagulación química: Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

3.9 Contingencia: Situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa, que ponga en riesgo la salud humana.

3.10 Desinfección: Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

3.11 Filtración: Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

3.12 Floculación: Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.

3.13 Intercambio iónico: Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.

3.14 Límite permisible: Concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

3.15 Neutralización: Ajuste del pH, mediante la adición de agentes químicos básicos o ácidos al agua en su caso, con la finalidad de evitar incrustación o corrosión de materiales que puedan afectar su calidad.

3.16 Osmosis inversa: Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.

3.17 Oxidación: Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos.

3.18 Potabilización: Conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano.

3.19 Precipitación: Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.

3.20 Sistema de abastecimiento: Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

#### **4. Límites permisibles de calidad del agua**

4.1 Límites permisibles de características bacteriológicas El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Ta bla 1. Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes deben establecer los agentes biológicos nocivos a la salud a investigar.

TABLA 1

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml

Organismos coliformes fecales

2 UFC/100 ml

No detectable NMP/100 ml  
Cero UFC/100 ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

#### 4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

TABLA 2

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

#### 4.3 Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA 3

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl -)	250.00

Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de Heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

4.4 Límites permisibles de características radiactivas El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

TABLA 4

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1.0

## **5. Tratamientos para la potabilización del agua**

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

### **5.1 Contaminación biológica**

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

### **5.2 Características físicas y organolépticas**

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción en carbón activado u oxidación.

### **5.3 Constituyentes químicos**

5.3.1 Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.3 Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o destilación.

5.3.4 Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros.- Ósmosis inversa o coagulación química.

5.3.8 Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

5.3.9 Mercurio.- Proceso convencional: coagulación-floculación-precipitación-filtración, cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Procesos especiales: en carbón activado granular y ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga

hasta 10 microgramos/l; con carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

5.3.10 Nitratos y nitritos. - Intercambio iónico o coagulación -floculación-sedimentación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos.

5.3.11 Nitrógeno amoniacal.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

5.3.12 pH (potencial de hidrógeno).- Neutralización.

5.3.13 Plaguicidas.- Adsorción en carbón activado granular.

5.3.14 Sodio.- Intercambio iónico.

5.3.15 Sólidos disueltos totales.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

5.3.16 Sulfatos.-Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.17 Sustancias activas al azul de metileno.- Adsorción en carbón activado.

5.3.18 Trihalometanos.- Aireación u oxidación con ozono y adsorción en carbón activado granular.

5.3.19 Zinc.- Destilación o intercambio iónico.

5.3.20 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, se deben coordinar con la autoridad sanitaria competente, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas involucrados en la contingencia, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

## **6. Bibliografía**

6.1 "Desinfección del Agua". Oscar Cáceres López. Lima, Perú. Ministerio de Salud. Organización

Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1990.

6.2 "Guías para la Calidad del Agua Potable". Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1985.

6.3 "Guías para la Calidad del Agua Potable". Volumen 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Organización Panamericana de la Salud. 1987.

6.4 "Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas". Proyecto de Revisión. SECOFI. 1992.

6.5 "Guide to Selection of Water Treatment Processes". Carl L. Hamann Jr., P.E. J. Brock Mc. Ewen, P.E. Anthony G. Meyers, P.E.

6.6 "Ingeniería Ambiental". Revista No. 23. Año 7. 1994.

6.7 "Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública". Francisco

Unda Opazo. UTEHA 1969.

6.8 "Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales". Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel A. Okun. Limusa Wiley. 1971.

6.9 "Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano". Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud. 1987.

6.10 "Integrated Design of Water Treatment Facilities". Susumu Kawamura. John Willey and Sons, Inc. 1991.

6.11 "Manual de Normas de Calidad para Agua Potable". Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1982.

6.12 "Manual de Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras". Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1979.

6.13 "Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios". Diario Oficial de la Federación. 18 de enero de 1988.

6.14 "Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality". IPS. International Programme on Chemical Safety. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1991.

6.15 "WHO Guidelines for Drinking-Water Quality". Volume 1. Recommendations. World Health Organization. 1992.

6.16 "WHO Guidelines for Drinking-Water Quality". Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Chapter 1: Microbiological Aspects. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1992.

## **7. Concordancia con normas internacionales**

Al momento de la emisión de esta Norma no se encontró concordancia con normas internacionales.

## **8. Observancia de la Norma**

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que distribuya agua para uso y consumo humano.

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas en coordinación con la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

## **9. Vigencia**

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor con carácter de obligatorio, al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 30 de noviembre de 1995.- El Director General de Salud Ambiental,  
Gustavo Olaiz

Fernández.- Rúbrica.

**Modificación de la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.**

---

**Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-  
Secretaría de Salud.**

---

MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION.

JAVIER CASTELLANOS COUTIÑO, Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 4o. y 69-H de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo; 13, apartado A) fracción I, 118, fracción II y 119, fracción II de la Ley General de Salud; 41, 43, 45, 46, fracción II, y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 214, fracción IV y 225 del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, y 7, fracciones V y XIX y 25, fracción IV del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud, y

#### **CONSIDERANDO**

Que con fecha 16 de diciembre de 1999, en cumplimiento del acuerdo del Comité y de lo previsto en el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó en el **Diario Oficial de la Federación** el proyecto de la presente Norma Oficial Mexicana a efecto que dentro de los sesenta días naturales posteriores a dicha publicación, los interesados presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

Que con fecha 20 de junio de 2000, fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** las respuestas a los comentarios recibidos por el mencionado Comité, en términos del artículo 47 fracción III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Que en atención a las anteriores consideraciones, contando con la aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, se expide la siguiente:

**MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION**

#### **INDICE**

0. Introducción
1. Objetivo y campo de aplicación
2. Referencias
3. Definiciones
4. Límites permisibles de calidad del agua

5. Tratamientos para la potabilización del agua
6. Métodos de prueba
7. Concordancia con normas internacionales y mexicanas
8. Bibliografía
9. Observancia de la Norma
10. Vigencia

## **0. Introducción**

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor.

Por tales razones la Secretaría de Salud, propone la modificación a la presente Norma Oficial Mexicana, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales.

## **1. Objetivo y campo de aplicación**

**1.1** Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

**1.2** Esta Norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

## **2. Referencias**

**2.1** NOM-008-SCF1-1993 Sistema General de Unidades de Medida.

**2.2** NOM-012-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.

**2.3** NOM-013-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y distribución de agua para uso y consumo.

**2.4** NOM-014-SSA1-1993 Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano, en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.

**2.5** NOM-112-SSA1-1994 Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.

**2.6** NOM-117-SSA1-1994 Bienes y Servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, hierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.

## **3. Definiciones**

Para los efectos de esta Norma Oficial Mexicana se entiende por:

- 3.1 Ablandamiento**, proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.
- 3.2 Adsorción**, remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.
- 3.3 Agua para uso y consumo humano**, agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud. También se denomina como agua potable.
- 3.4 Características microbiológicas**, debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes fecales.
- 3.5 Características físicas y organolépticas**, las que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.
- 3.6 Características químicas**, las debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.
- 3.7 Características radiactivas**, aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.
- 3.8 Coagulación química**, adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.
- 3.9 Contingencia**, situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa, que ponga en riesgo la salud humana.
- 3.10 Desinfección**, destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.
- 3.11 Evaporación**, separación del agua de los sólidos disueltos, utilizando calor como agente de separación, condensando finalmente el agua para su aprovechamiento.
- 3.12 Filtración**, remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.
- 3.13 Floculación**, aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.
- 3.14 Intercambio iónico**, proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.
- 3.15 Límite permisible**, concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.
- 3.16 Neutralización**, adición de sustancias básicas o ácidas al agua para obtener un pH neutro.
- 3.16.1 Estabilización**, obtención de determinada concentración de sales y pH del agua, para evitar la incrustación o corrosión de los materiales con que se fabrican los elementos que la conducen o contienen.

**3.17 Osmosis inversa**, proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.

**3.18 Oxidación**, pérdida de electrones de un elemento, ion o compuesto por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.

**3.19 Potabilización**, conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua en los sistemas de abastecimiento públicos o privados, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano.

**3.20 Sedimentación**, proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas en el agua, por efecto gravitacional.

**3.21 Sistema de abastecimiento de agua**, conjunto de elementos integrados por las obras hidráulicas de captación, conducción, potabilización, desinfección, almacenamiento o regulación y distribución.

#### 4. Límites permisibles de calidad del agua

4.1 Límites permisibles de características microbiológicas.

4.1.1 El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

**TABLA 1**

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE</b>
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables

4.1.2 Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes podrán establecer los agentes biológicos nocivos a la salud que se deban investigar.

4.1.3 Las unidades de medida deberán reportarse de acuerdo a la metodología empleada.

4.1.4 El agua abastecida por el sistema de distribución no debe contener *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 ml. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml; en sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50 000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

4.2.1 Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

**TABLA 2**

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE</b>
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

#### 4.3 Límites permisibles de características químicas.

4.3.1 El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

**TABLA 3**

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE</b>
Aluminio	0,20
Arsénico (Nota 2)	0,05
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1,50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10,00
Etilbenceno	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00

Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00
Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00
2,4 – D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO4=)	400,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

**Nota 1.** Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

**Nota 2.** El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

**TABLA DE CUMPLIMIENTO GRADUAL**

Límite permisible mg/l	Año
0,045	2001
0,040	2002
0,035	2003

0,030		2004
0,025		2005

**4.3.2** En caso de que en el sistema de abastecimiento se utilicen para la desinfección del agua, métodos que no incluyan cloro o sus derivados, la autoridad sanitaria determinará los casos en que adicionalmente deberá dosificarse cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual libre dentro del límite permisible establecido en la Tabla 3 de esta Norma.

#### **4.4 Límites permisibles de características radiactivas.**

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

**TABLA 4**

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE Bq/l</b>
Radiactividad alfa global	0,56
Radiactividad beta global	1,85

### **5. Tratamientos para la potabilización del agua**

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes microbiológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua listados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4 de esta Norma.

#### **5.1 Contaminación microbiológica.**

**5.1.1** Bacterias, helmintos, protozoarios y virus. Deben desinfectarse con cloro, compuestos de cloro, yodo<sup>1</sup>, ozono, luz ultravioleta; plata iónica o coloidal; coagulación-sedimentación-filtración; filtración en múltiples etapas.

#### **5.2 Características físicas y organolépticas.**

**5.2.1** Color, olor, sabor y turbiedad.- Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado.

#### **5.3 Constituyentes químicos.**

**5.3.1** Arsénico. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.2** Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.3** Cloruros. Intercambio iónico, ósmosis inversa o evaporación.

**5.3.4** Dureza. Ablandamiento químico o intercambio iónico.

**5.3.5** Fenoles o compuestos fenólicos. Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

**5.3.6** Hierro y/o manganeso. Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.7** Fluoruros. Alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa.

**5.3.8** Hidrocarburos aromáticos. Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

**5.3.9** Mercurio. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado granular u ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Adsorción en carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

**5.3.10** Nitratos y nitritos. Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

**5.3.11** Nitrógeno amoniacal. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

**5.3.12** pH (potencial de hidrógeno). Neutralización.

**5.3.13** Plaguicidas. Adsorción en carbón activado granular.

**5.3.14** Sodio. Intercambio iónico.

**5.3.15** Sólidos disueltos totales. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

**5.3.16** Sulfatos. Intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.17** Sustancias activas al azul de metileno. Adsorción en carbón activado.

**5.3.18** Trihalometanos. Oxidación con aireación u ozono y adsorción en carbón activado granular.

**5.3.19** Zinc. Evaporación o intercambio iónico.

**5.4** En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas, involucrados en la contingencia, deben coordinarse con la autoridad sanitaria competente, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

## **6. Métodos de prueba**

La selección de los métodos de prueba para la determinación de los parámetros definidos en esta Norma, es responsabilidad de los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, y serán aprobados por la Secretaría de

Salud a través del área correspondiente. Deben establecerse en un Programa de Control de Calidad Analítica del Agua, y estar a disposición de la autoridad competente, cuando ésta lo solicite, para su evaluación correspondiente.

## **7. Concordancia con normas internacionales y nacionales**

Esta Norma Oficial Mexicana no es equivalente a ninguna norma internacional.

## **8. Bibliografía**

**8.1** Directrices Canadienses para la Calidad del Agua Potable. 6ta. edición. Ministerio de Salud. 1996.

**8.2** Desinfección del Agua. Oscar Cáceres López. Lima, Perú. Ministerio de Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1990.

**8.3** Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1985.

**8.4** Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1995.

**8.5** Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1987.

**8.6** Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas. Proyecto de Revisión. SECOFI. 1992.

**8.7** Guías para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1995.

**8.8** Guide to Selection of Water Treatment Processes. Carl L. Hamann Jr., P.E. J. Brock Mc. Ewen, P.E. Anthony G. Meyers, P.E.

**8.9** Ingeniería Ambiental. Revista No. 23. Año 7. 1994.

**8.10** Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública. Francisco Unda Opazo. UTEHA 1969.

**8.11** Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel A. Okun. Limusa Wiley. 1971.

**8.12** Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud 1987.

**8.13** Importancia para la Salud Pública de los Indicadores Bacterianos que se Encuentran en el Agua Potable. Martin J. Allen. Organización Panamericana de la Salud. OMS. Lima Perú, 1996.

**8.14** Integrated Design of Water Treatment Facilities. Susumu Kawamura. John Willey and Sons, Inc. 1991.

**8.15** Manual de Normas de Calidad para Agua Potable. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1982.

**8.16** Manual de Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1979.

**8.17** Manual de Técnicas Analíticas del Laboratorio Nacional de Salud Pública. Secretaría de Salud.

**8.18** Método de Tecnología de Substrato Definida para el Conteo Simultáneo Rápido y Específico de los Coliformes Totales y la *Escherichia coli* del agua. Stephen C. Edberg, Martin J. Allen & Darrell B. Smith. Journal Association Official Analytical Chemists (Vol. 74 No. 3, 1991).

**8.19** Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM- -SSA1- 1996 Vigilancia y evaluación del control de la calidad del agua para uso y consumo humano, distribuidas por sistemas de abastecimiento público.

**8.20** Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios. **Diario Oficial de la Federación**. 18 de enero de 1988.

**8.21** Regulaciones Nacionales Primarias del Agua Potable, Técnicas Analíticas: bacteria coliforme. Agencia de Protección Ambiental (USA). 1992.

**8.22** Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. IPS. International Programme on Chemical Safety. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1991.

**8.23** WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 1. Recommendations. World Health Organization. 1992.

**8.24** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th. Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1995.

**8.25** WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Chapter 1: Microbiological Aspects. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1992.

## **9. Observancia de la Norma**

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

## **10. Vigencia**

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los noventa días de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 20 de octubre de 2000.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, **Javier Castellanos Coutiño**.- Rúbrica.

## Referencias

Adalberto Tejeda Martínez, David A. Rivas Camargo. El bioclima humano en urbes del sur de México para condiciones de duplicación de CO<sup>2</sup> atmosférico. Investigaciones Geográficas, agosto, número 051, Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 37-52 2003

Consejo del Sistema Veracruzano del Agua. CNA. Evolución y expectativas de los requerimientos hidráulicos en usos distintos al público urbano en el estado de Veracruz 2003.

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológico. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Costera de Veracruz 2002.

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológico. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Cotaxtla Veracruz 2002.

Iris Neri Flores Posgrado en Ciencias de la Tierra-Aguas Subterráneas- Identificación de Zonas Vulnerables a Intrusión Salina en el acuífero costero de Veracruz UNAM 2007.

Yuridia Crusillo Hernández, Licenciatura en Geología, IPN, Título: Modelo Hidrogeológico del Valle de Etna, Oaxaca, Méx. 2005.

Gabriel Jiménez Suárez, Título: "Modelo de flujo y transporte del Acuífero del Valle de Puebla Posgrado en Ciencias de la Tierra, opción exploración, IGEF. 2005.

Custodio, E. Lamas, M.R., Hidrología Subterránea Tomo 1, Segunda Edición. Ediciones Omega. Barcelona 1996.

Monografía geológico-minera del Estado de Veracruz / comité edit., coordinación José Cárdenas Vargas et. al. México Consejo de Recursos Minerales: Subsecretaría de Minas e Industria Básica, 1994

K. R. Rushton Groundwater hydrology: conceptual and computational models Hoboken, New Jersey: J. Wiley, c2003

Cano Rodríguez I. ed. al. Transporte y destino final de fósforo en el Acuífero de Puenteillas de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad de Guanajuato Noria Alta S/N 36050, Guanajuato, Gto. 2004.

Marks Steven Quantifying Transverse Dispersion in a Subsurface Flow Constructed Wetland Department of Chemical Engineering. The University of Queensland 1999

Custodio, Emilio, ed. Study and modeling of saltwater intrusion into aquifers E. Custodio and A. Galofre, eds. 1993.

Kruyssen, M. P. C. and Bear, J. Investigations of ground water movement and related problems in Zeeland Flanders by means of a horizontal slit model (viscous flow analogy). Government Institute for Water Supply, The Hague, Netherlands, 55p., 1956.

Bear, J., and Kahana, Y., The determination of ground water levels from measurements in pumping wells, Tahal, P.N. 40, 12 p. (in Hebrew), March 1958.

Bear, J., and Todd David, K., The transition zone between fresh and salt waters in coastal aquifers, Hydraulics Laboratory, Univ. of California, Berkeley, Water Resources Center, 1960.

Kahana, Y., and Bear, J., Safe yield determination in a coastal aquifer, Water Planning for Israel, Tel Aviv, P.N. 208, June 1961.

Irmay, S., Bear, J., and Zaslavsky, D., Determination of Hydraulic conductivity of soils by means of infiltration rings, Technion, Israel Institute of Technology, Hydraulic Lab., P.N. 1/62, May 1962.