

Dónde:

Q_i = Tasas de flujo entrando y/o saliendo de la celda [L^3T^{-1}]

Ss= Almacenamiento específico por unidad de volumen, por cambio de la carga piezométrica [L^3]

ΔV = Volumen de la celda [L^3]

Δh = Cambio de la carga piezométrica [L]

Δt = Intervalo de tiempo [T]

Se usa la notación que las entradas y el aumento del almacenamiento son positivos. Las salidas y la disminución del almacenamiento son negativas (Figura 44).

Las seis celdas adyacentes a la celda i,j,k son:

$$\begin{array}{ll} i - 1, j, k ; & i + 1, j, k ; \\ i, j - 1, k ; & i, j + 1, k ; \\ i, j, k - 1 ; & i, j, k + 1. \end{array}$$

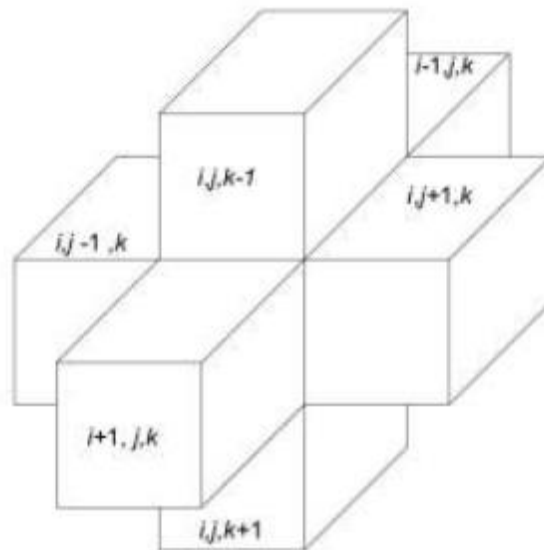


Figura 44 Índice para las seis celdas adyacentes alrededor de la celda (Modificado de McDonal and Harbaugh, 1988).

Para las celdas adyacentes el cálculo de los caudales de entrada a la celda i, j, k , y en base con la Ley de Darcy, se expresan de la siguiente manera (figura 44):

$$\text{De } i, j-1, k \quad q_{i,j-1/2,k-} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3)$$

$$\text{De } i, j+1, k \quad q_{i,j+1/2,k-} = KR_{i,j+\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (4)$$

$$\text{De } i+1, j, k \quad q_{i+1/2,j,k-} = KC_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta r_i \Delta v_k \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i-1/2}} \quad (5)$$

$$\text{De } i-1, j, k \quad q_{i-1/2,j,k-} = KC_{i-\frac{1}{2},j,k} \Delta r_i \Delta v_k \frac{h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i-1/2}} \quad (6)$$

$$\text{De } i, j, k+1 \quad q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta r_i \Delta c_i \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{i+1/2}} \quad (7)$$

$$\text{De } i, j, k-1 \quad q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_i \Delta c_i \frac{h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{i-1/2}} \quad (8)$$

Dónde:

$KR_{ij-1/2, k}$ = Conductividad hidráulica a lo largo de i entre los dos nodos. El índice $\frac{1}{2}$ representa el espacio entre los dos nodos.

$h_{i, j, k}$ = Carga hidráulica en el nodo i, j, k [L-]

$q_{i, j-1/2, k}$ = Descarga volumétrica entre las caras i, j, k e $i, j-1, k, j$. [L³T⁻¹]

$\Delta c_i \Delta v_k$ = Área de la cara de la celda normal a la dirección de flujo [L²]

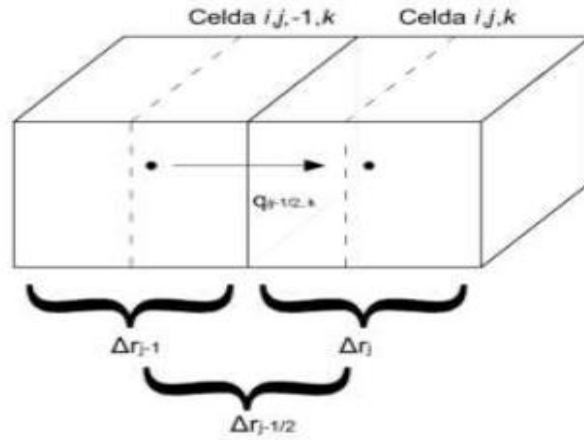


Figura 45 Flujo en la celda i, j, k a partir de la celda $i, j-1, k$. (Modificado de McDonald and Harbaugh, 1988).

El producto entre la conductividad hidráulica por el área, dividida entre la separación de nodos es llamado conductancia.

$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} [L^2 T^{-1}] \quad (9)$$

Cuando se sustituye la ecuación 12 de conductancia en las ecuaciones (10) a (15)

Se obtiene:

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (10)$$

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (11)$$

$$q_{i,-1/2,j,k} = CC_{i,-1/2,j,k} (h_{i,-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (12)$$

$$q_{i,+1/2,j,k} = CC_{i,+1/2,j,k} (h_{i,+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (13)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (14)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (15)$$

Los caudales (13) a (18) son las entradas para la celda i, j, k de las 6 celdas adyacentes dentro del sistema acuífero. Las entradas a la celda i, j, k , provenientes de otras fuentes se pueden hacer depender de la carga piezométrica de la celda en la cual son recibidas. La expresión general:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} [L^3T^{-1}] \quad (16)$$

Dónde:

$a_{i,j,k,n}$ Es el flujo de la fuente n

$p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} [L^2T^{-1}]$ Es una constante

$q_{i,j,k,n} [L^3T^{-1}]$ Es una constante

El software de modelación de aguas subterráneas Visual Modflow Classic Interface de Waterloo Hydrogeologic Inc., resuelve la ecuación en derivadas parciales del flujo subterráneo, a través del método de diferencias finitas. Para realizar la modelación es necesario conocer una serie de componentes y distintas variables que intervienen en el área y su comportamiento en el tiempo. Además de considerarse un modelo sencillo y eficientemente comprobado en numerosos acuíferos.

En este estudio, se justifica plenamente la implementación de un modelo tridimensional debido a la heterogeneidad del acuífero estudiado, propias de los acuíferos aluviales, donde se considera que los movimientos verticales, son en mucha mayor medida, menor que los movimientos horizontales.

El modelo se realizó en estado transitorio, debido a los datos con que se cuenta para la realización de un modelo en estado transitorio o no estacionario, en tal caso se realiza un modelo transitorio para este estudio.

2.7.4 Etapa preliminar del modelo

Consistió en la recopilación de la información precedente, su procesamiento y análisis para una primera interpretación del modelo conceptual del acuífero. En esta etapa se definió el área de estudio. La información fue ordenada, clasificada, seleccionada, analizada y evaluada para tener la base de datos que específicamente sirviera al estudio, disponiendo la información en formatos fáciles de interpretar.

La información recopilada fue referente a hidrografía, fisiografía, hidrología, climatología, geología, censos anteriores, historiales piezométricos y de extracción, datos de escurrimientos superficiales en la zona, entre otros; de tal forma que fue posible con dicha información tener un marco de referencia respecto a las condiciones actuales e históricas del sistema en su funcionamiento superficial y subterráneo, así como la interacción que guarda con el medio existente (fisiografía, geomorfología, geología del subsuelo). Estos datos que se obtuvieron del último censo que realizó la CONAGUA en 2008 del acuífero Valle de Juárez, fueron utilizados como referente inicial del modelaje realizado.

2.7.5 Análisis de información recopilada

Esta fase consistió en el análisis e interpretación de la información recopilada. El análisis de la información recopilada ayudó a definir la forma de planeación general del trabajo de modelación, la metodología específica a seguir para la obtención de los objetivos propuestos. Se utilizaron diferentes modelos de aproximación para el análisis de la información, principalmente mapas, soluciones gráficas y numéricas que incluyeron:

- Interpretación de mapas y perfiles geológicos e hidrogeológicos.
- Confección del mapa de isofreáticas del cual se puede deducir la dirección de flujo, obtenidos del monitoreo de los niveles estáticos del agua.
- Información del cálculo de la evapotranspiración y cálculo de las pruebas de infiltración para determinar la capacidad de infiltración f_c , el cual, es un elemento del balance hídrico de suelo para la determinación de la recarga.
- Análisis y de parámetros hidráulicos (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc), el cual se obtuvo de las pruebas de bombeo con que se cuentan, utilizando el método de Cooper-Jacob, el análisis consiste en determinar la intercepción del eje de tiempo para $S=0$ y el delta de abatimiento (Δs) para un ciclo logarítmico cuando los valores se ajusten a la recta se obtiene los siguientes parámetros hidráulicos

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta s} \quad (17)$$

$$S = \frac{2.25Tt}{r^2} = \frac{2.3Qt}{1.78\pi^2\Delta s} \quad (18)$$

- haciendo uso del programa Aquifer Test y GWW cálculos elaborados por la Comisión nacional del Agua en el 2008
- Determinación del modelo conceptual del acuífero para la aplicación del modelo matemático hidrogeológico tridimensional Visual Modflow.

Flujo de agua subterránea

El flujo de agua subterránea está regido por ecuaciones en derivadas parciales, que incorporan parámetros espacialmente distribuidos, tales como la conductividad hidráulica y

la dispersividad. Sin embargo, es por lo general imposible medir estos parámetros directamente a una escala requerida para describir el flujo en los sistemas acuíferos.

Si bien las pruebas de aforo y de bombeo pueden activar un volumen grande del acuífero, en la práctica éstas siguen siendo de un valor limitado para parametrizar la transmisividad (T) o la conductividad hidráulica (K) en los modelos de agua subterránea. Los valores reportados de estos parámetros pueden ser espurios debido a errores en la ejecución de la prueba y, más comúnmente, a errores de interpretación. Destacan entre estos últimos los casos en que por lejanía hidráulica la respuesta en los pozos de observación hacia el bombeo es muy pequeña, aquellos en que las condiciones hidrogeológicas del sitio están lejos de satisfacer las hipótesis de los modelos teóricos, y además es frecuente confundirse con soluciones ambiguas a la hora de ajustar los modelos teóricos a los datos de campo (Chávez et al., 2006).

Para la conductividad hidráulica en particular, el problema de escala se encuentra ampliamente documentado en la literatura hidrogeológica (Rovey y Cherkauer, 1995).

Las propiedades de acuífero, que en un modelo tridimensional son la conductividad hidráulica, el rendimiento específico, y el almacenamiento específico. Los valores de las propiedades de acuífero se toman como variables en el espacio y constantes en el tiempo, los esfuerzos hidrológicos actuantes, donde se incluyen los caudales de recarga y de descarga del acuífero y las condiciones de frontera. Los esfuerzos pueden cambiar tanto en el espacio como en el tiempo.

El problema de la parametrización se ven generalmente en los términos de la conductividad hidráulica, pero es claro que cualquier otra propiedad de acuífero es parametrizable. Esto se debe a que, por lo general, la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica es superior

en varios órdenes de magnitud a la variabilidad de las propiedades de almacenamiento, como son el almacenamiento específico (S_s) y el rendimiento específico (S_y); y a que normalmente se dispone de más datos de campo para la conductividad hidráulica que para las propiedades de almacenamiento (Chávez et al, 2006).

Si se opta por el esquema de parametrización por zonificación, se demarcan las zonas de conductividad hidráulica en la malla del modelo, para luego estimar por calibración el valor efectivo del parámetro en cada una de sus zonas de definición. En la práctica, se parte de una zonificación preliminar de la conductividad hidráulica y de estimaciones previas del valor de este parámetro en cada una de las zonas, para luego ir modificando tanto la zonificación como los valores zonales hasta obtener un resultado satisfactorio. Se enfatiza que los valores estimados mediante la calibración son conceptual y numéricamente distintos a los que se obtienen a partir de mediciones en campo (Carrera y Neuman, 1986).

Algunos esfuerzos hidrológicos, donde destaca la recarga difusa, son también parametrizables y es necesario adoptar un criterio para zonificarlos en los modelos numéricos y recurrir a métodos para cuantificarlos. Al igual que con las propiedades hidráulicas, los distintos métodos de evaluación hidrogeológica proporcionan sólo estimaciones previas de los esfuerzos hidrológicos, que en muchos casos son estimaciones sesgadas y muy pobres.

En consecuencia, en la modelación aplicada es muy importante ponderar debidamente los datos de campo, ya que esto determina qué tanta diferencia se puede esperar entre los valores medidos en campo y los valores efectivos del modelo, y qué tanto peso se debe conceder a un cierto dato de campo o tipo de dato de campo en la parametrización de una propiedad de acuífero (Chávez et al., 2006).

2.8 Hidrogeológicos

2.8.1 Parámetros Hidráulicos para el Modelado del Acuífero

Los parámetros hidráulicos es el principal objetivo para la obtención y definición en el modelaje matemático, y en algunos casos, el de predecir el funcionamiento y la repuesta del acuífero ante determinadas acciones externas sometidas en el modelaje, como por ejemplo las extracciones de agua por bombeo (Custodio & Llamas, 2000). Por lo que, en este estudio, se establecieron los aspectos hidrogeológicos que permitieron definir el modelo conceptual que están definidas por su transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, para permitir un buen funcionamiento hidrodinámico del acuífero, para lo cual se analizaron las siguientes actividades.

2.8.2 Pruebas de Bombeo

Con el propósito de conocer las características hidráulicas del acuífero la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizo en el año 2008, 10 pruebas de bombeo, que se llevaron a cabo en sus etapas de abatimiento y recuperación. La localización de dichas pruebas se muestra en la figura 46. Los pozos de prueba se seleccionaron considerando su localización geográfica, características constructivas, condiciones del equipo de bombeo, susceptibilidad de ser sondeables y de medir el caudal de descarga.

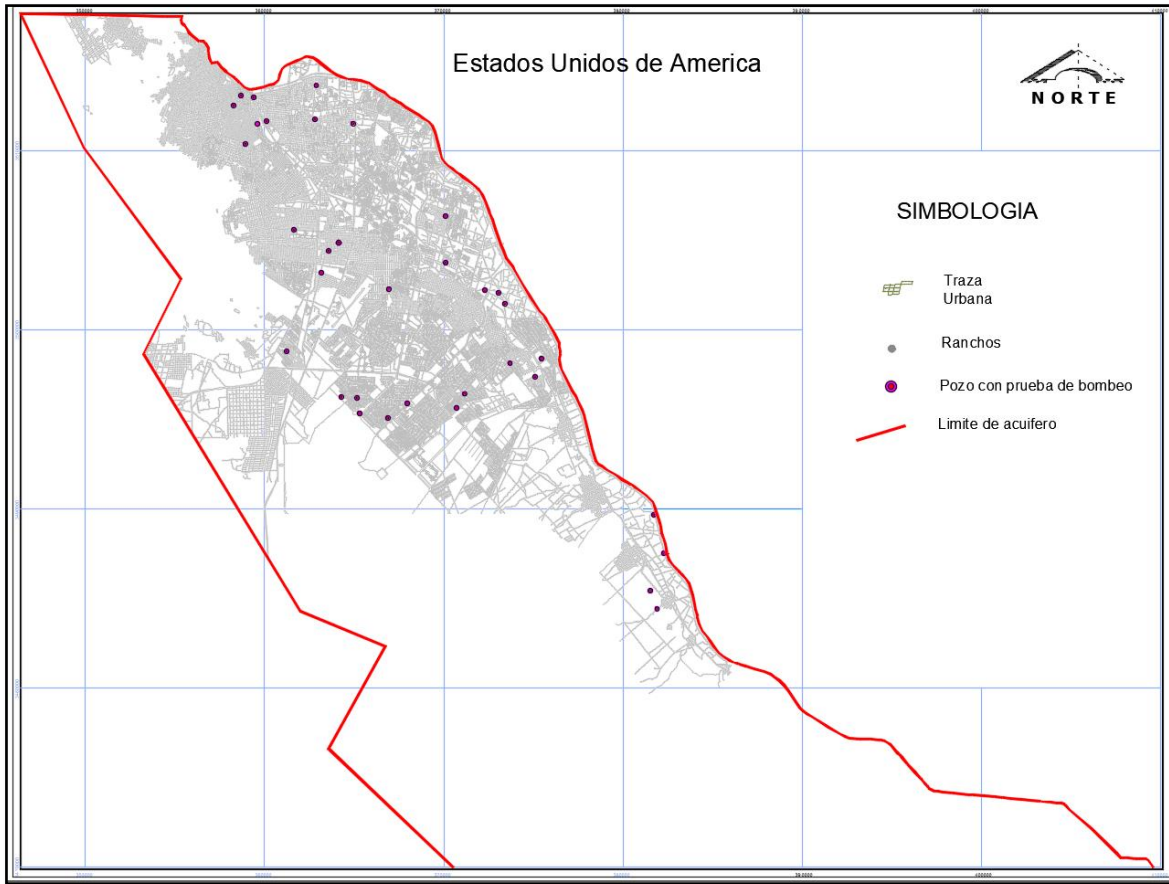


Figura 46 Localización de los pozos con prueba de bombeo

Los procedimientos metodológicos para realizar las pruebas de bombeo consistieron en medir el nivel estático justo antes de iniciar el bombeo, de verificar que el pozo no hubiera estado operando en por lo menos las 24 horas previas, y de que pozos situados a menos de un km de distancia no se encontraran bombeando. Posteriormente, se midieron en el pozo de bombeo las profundidades al nivel dinámico del agua subterránea con respecto al tiempo durante la etapa de abatimiento. Esta etapa se dio por terminada cuando se observó una estabilización del nivel dinámico. Inmediatamente después de haber terminado con la etapa de abatimiento se apagó la bomba y se inició la etapa de recuperación, tomando nuevamente la profundidad al nivel dinámico contra el tiempo. Esta etapa finalizó en algunos casos

cuando se observó una estabilización del nivel y en otros cuando se alcanzó virtualmente el nivel estático.

Durante las pruebas de bombeo se graficaron las lecturas en las etapas de abatimiento y de recuperación, con el fin de determinar si las mediciones de nivel estuvieron bien tomadas y si los datos de campo eran interpretables. Los datos de campo del pozo 410, localizado en las coordenadas Este 401102.000, Norte 3471984.000 el cual se analizó con pruebas de bombeo y que se muestran en la tabla 17.

Tabla 17 Reporte de prueba de bombeo

AFORO DEL POZO 410						
NIVEL ESTÁTICO		2.54	ADEME	16"	PROF. POZO	100
BOMBA		Vertical 8"	TRAMOS		Bomba a 45 m	
FECHA		22 de Noviembre del 2008		Hora		18:00:00
FECHA	HORA	TIEMPO (min)	NIVEL DINÁMICO (m)	ABATIMIENTO (m)	GASTO (lps)	
22-nov-08	18:00:15	0.25	7.2	4.66	75	
22-nov-08	18:00:30	0.5	8.76	6.22	75	
22-nov-08	18:01:00	1	10.27	7.73	68	
22-nov-08	18:02:00	2	11.27	8.73	68	
22-nov-08	18:04:00	4	12.06	9.52	68	
22-nov-08	18:08:00	8	12.5	9.96	68	
22-nov-08	18:15:00	15	12.7	10.18	68	
22-nov-08	18:30:00	30	12.9	10.36	68	
22-nov-08	19:00:00	60	13.08	10.54	68	
22-nov-08	19:30:00	90	13.16	10.62	68	
22-nov-08	20:00:00	120	13.22	10.68	68	
22-nov-08	21:00:00	180	13.22	10.68	68	
22-nov-08	22:00:00	240	13.28	10.74	68	
22-nov-08	23:00:00	300	13.28	10.74	68	
23-nov-08	0:00:00	360	13.3	10.76	68	
23-nov-08	1:00:00	420	13.28	10.74	68	
23-nov-08	2:00:00	480	13.26	10.72	68	
23-nov-08	3:00:00	540	13.29	10.75	68	
23-nov-08	4:00:00	600	13.26	10.72	68	
23-nov-08	5:00:00	660	13.34	10.8	68	
23-nov-08	6:00:00	720	13.35	10.81	68	
23-nov-08	7:00:00	780	13.31	10.77	68	
23-nov-08	8:00:00	840	13.35	10.81	68	
23-nov-08	9:00:00	900	13.35	10.81	68	
23-nov-08	10:00:00	960	13.29	10.75	68	
23-nov-08	11:00:00	1020	13.35	10.81	68	

La determinación de los parámetros transmisividad y coeficiente de almacenamiento de un acuífero a partir de una prueba de bombeo, involucra la aplicación directa de las fórmulas de hidráulica de pozos que permiten determinar por ejemplo el abatimiento producido por la operación de un pozo, a cierto caudal, distancia y tiempo de operación conocidos los valores de T y S, de igual manera es posible conocer estos parámetros a partir del análisis de los

valores de abatimiento registrados en un pozo a diferentes tiempos. Los métodos que generalmente se aplican para la interpretación de las pruebas de bombeo y que constituyen los tradicionales, se refieren a procedimientos de ajuste de la curva de campo con curvas tipo, desarrolladas para diversos tipos de acuíferos y condiciones hidrogeológicas. Se muestran las figuras que ilustran los métodos usados para interpretar las pruebas, usando ajuste de curvas, Cooper – Jacob y el método de K. R. Rushton y K.S. Rathod para dos capas. En la figura 47 se presenta la interpretación de 3 diferentes métodos que se usaron por la CNA para la interpretación de las pruebas de bombeo.

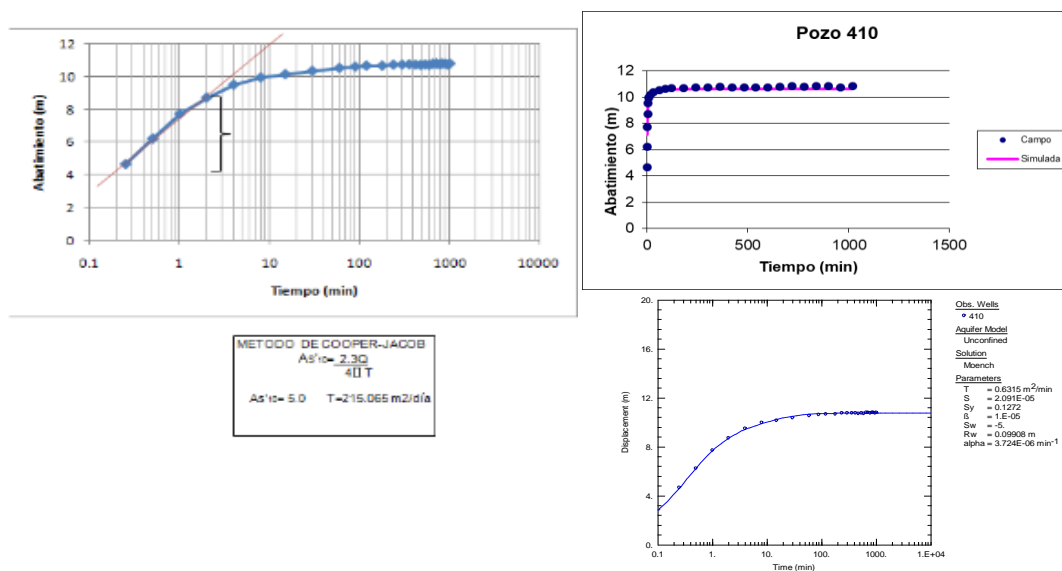


Figura 47 Interpretación de las pruebas de bombeo por los métodos Cooper-Jacob, Solución Moench y método Rushton.

Asimismo, derivado de la recopilación de información de estudios anteriores en el acuífero, se hizo un compilado de 41 pruebas de bombeo realizadas e interpretadas en otros trabajos geohidrológicos, por lo que se cuenta con una cobertura amplia de parámetros hidráulicos.

En la tabla 18 se presentan las 41 pruebas realizadas con anterioridad y utilizadas en los respectivos estudios de donde se obtuvieron. En la primera columna se identifica el pozo

mediante su número consecutivo de acuerdo con el presente censo, mientras que en la segunda columna se identifica con su número anterior o como es conocido. La distribución de estas pruebas de bombeo cubre prácticamente toda el área de estudio y proporcionan muy buena información para la evaluación Geohidrológica posterior.

Tabla 18 Pruebas de bombeo recopiladas

Número de pozo	Número Equivalente	UTM Este	UTM Norte	K (m/d)	S
20	13-RB	358924	3510352	10.7	4.46E-04
23	15-RB	360121	3511631	9	7.44E-04
50	53-RB	358273	3512524	3.7	3.34E-04
51	54-RB	364131	3504830	4.1	6.88E-04
53	55-RB	359406	3512969	6.5	3.19E-04
54	56-RB	370070	3506344	7.4	1.21E-04
57	58-RB	362889	3513596	4.6	2.07E-04
75	71-RB	364934	3511509	7.2	1.91E-04
76	72-RB	361623	3505588	11	1.41E-04
80	75-RO	366892	3502285	19.6	2.82E-03
11	7-RB	362754	3511729	4.9	1.63E-04
110	98-RO	363562	3504386	13.5	6.97E-04
112	99-RO	363151	3503174	17.4	1.79E-02
13	9-RB	358652	3513071	7.1	5.16E-04
210		371135.5	3496431.1	3.7	3.84E-04
213		373682.7	3498139	2.7	1.00E-02
216		368831.9	3496487.6	4.6	7.09E-04
217		370720.8	3495636.6	3.8	1.09E-04
218		366858.8	3495082.2	4.7	2.62E-04
219		364265.8	3496248.1	3.5	4.67E-04
221		365313	3495342.8	3.3	1.56E-04
222		365163.8	3496202.7	2.7	1.04E-04
223		370088.9	3503750	1.3	1.32E-04
224		361223.9	3498774.5	1.6	3.31E-03
225		367935.3	3495898.3	2.9	1.67E-04
317	MA-12	399295	3466460	1.2	1.00E-05
641	PGI-75	375427	3498400	9.8	1.68E-05
340	PGI-83	381691	3489688	2	2.51E-05
642	PGI-24	373045	3502046	8.4	1.83E-06
640	PGI-90	375098	3497388	5.1	3.16E-06
643	PGI-49	372281	3502232	5.7	4.07E-06
535	PGI-52	373396.1	3501457.8	10.2	5.00E-06
641	PGI-75	375427	3498400	22	1.10E-06
290	PGI-79	381524	3485416	16.5	1.00E-04

Número de pozo	Número Equivalente	UTM Este	UTM Norte	K (m/d)	S
644	PGI-82	382272	3487534	28.5	5.00E-07
340	PGI-83	381691	3489688	8.1	1.50E-06
318	MA-8	399709	3466717	18.6	1.00E-07
565	PR-3	413576	3461692	17.2	1.00E-04
518	PR-13	417608	3457955	8	1.00E-05
430	PT-25	406981	3464095	11	5.50E-06
438	CE-6	408868	3464162	24.5	5.00E-05

En general se puede considerar que el acuífero presenta muy buenas propiedades hidráulicas principalmente hacia la zona del Valle y tiende a disminuir hacia las zonas cercanas a las sierras.

En la tabla 19 se muestran los valores obtenidos de las pruebas realizadas por CONAGUA, mostrándose de igual forma esa tendencia de valores de conductividad altos hacia el valle y más bajos hacia las sierras.

Tabla 19 Resultados de interpretación de pruebas de bombeo

Pozo Bomb.	x	y	Pozo Obs.	Dist. a pozo de Obs. (m)	Tipo acuífero	Nivel estático	Q (l/s)	Saturado (m)	AQT Solver (Moench)				Two Zone Model (Rushton)			Ajuste Cooper Jacob		PROMEDIO		
									T (m2/d)	K (m/d)	S	Sy	K (m/d)	S	Sy	T (m2/d)	K (m/d)	K (m/d)	S	Sy
287	381852.067	3484422.937	287	0	Libre	19	18.5	131.0	112	0.85	2.43E-05	0.12	0.90	7.50E-04	0.17	48.76	0.37	0.71	3.872E-04	0.145
306	391723.000	3471174.000	306	0	Libre	29.77	2.6	170.0	17.28	0.10	1.02E-10	0.102	0.15	6.50E-05	0.12	15.81	0.09	0.12	3.250E-05	0.1111
311	397640.000	3467667.000	312	38	Libre	3.79	16.8	116.0	157.97	1.36	3.50E-04	0.148	1.16	2.20E-04	0.16	221.39	1.91	1.48	2.848E-04	0.154
385	402653.592	3465039.652	386	62	Semi-conf	36.535	25	113.5	1017	8.96	3.30E-03	N.D.	9.96	3.30E-03	0.26	-	-	9.46	3.300E-03	0.26
410	401102.000	3471984.000	410	0	Libre	2.54	75	97.5	1448	14.86	1.00E-10	0.127	11.85	6.00E-06	0.13	215.065	2.21	9.64	3.000E-06	0.1286
510	416103.000	3460078.000	510	0	Libre	2.96	64	97.0	433.87	4.47	5.38E-05	0.16	4.35	8.50E-05	0.152	119.07	1.23	3.35	6.940E-05	0.156
572	414034.000	3456049.000	572	0	Libre	39	13	51.0	72.3	1.42	9.41E-06	N.D.	1.80	5.90E-04	0.152	39.534	0.78	1.33	2.997E-04	0.152
580	421756.943	3454787.287	580	0	Libre	2.9	62	97.1	475	4.89	1.38E-05	0.175	4.10	5.40E-05	0.142	108.94	1.12	3.37	3.392E-05	0.1585
584	427876.121	3443603.467	piezom.	17.2	Libre	44.25	25	145.8	170.3	1.17	2.60E-03	0.136	1.57	9.70E-04	0.134	232.55	1.60	1.44	1.785E-03	0.135
587	426671.229	3445107.377	587	0	Semi-conf	32.1	16.8	117.9	82.08	0.70	1.63E-07	N.D.	1.39	1.70E-04	0.12	59.04	0.50	0.86	8.508E-05	0.12
																		3.18	6.281E-04	0.152

2.8.3 Transmisividad

Se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada (Custodio y Llamas, 1983). Tiene dimensiones de velocidad

por longitud $(T = (L)^2 * (T)^{-1}$, y se expresa en m²/día o cm²/seg. La transmisividad se determina directamente del análisis de las pruebas de bombeo realizadas en los pozos o indirectamente por medio de relaciones con otros parámetros como puede ser el caudal específico.

Los valores de transmisividad de las pruebas de bombeo se obtuvieron mediante la utilización principalmente del método de Jacob & Cooper (1946), a través del programa AquiferTest (Waterloo Hydrogeologic, Inc). En este método los datos tiempo-abatimiento se presentan en un gráfico semilogarítmico y el cálculo de la transmisividad se realiza por medio de la fórmula:

$$T = 2.3 Q/4\pi \Delta s \quad (19)$$

Donde:

T: Transmisividad (m²/día)

Q: Caudal de bombeo (m³/día)

π: Constante pi

Δ: Diferencia de abatimiento para un ciclo logarítmico de tiempo.

Los resultados de la interpretación y los valores obtenidos de las pruebas recopiladas, se puede establecer que los valores de transmisividad del Acuífero Valle de Juárez varían de 72 a 1448 m²/d. La variación de la transmisividad sigue un patrón de comportamiento bien definido: los valores más altos se registran en la porción noroeste de la zona, disminuyendo gradualmente hacia el sureste, en cuyo extremo se encuentran los valores más bajos (Conagua, 2008).

2.8.4 Conductividad Hidráulica (Permeabilidad)

La conductividad hidráulica es un coeficiente de proporcionalidad. Está relacionado con la permeabilidad de cada unidad geológica y al medio poroso en que circula. Según Horton, la razón de infiltración constante al final de la curva de capacidad de infiltración es numéricamente equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo.

Se define como el caudal que pasa por una sección unidad de acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada (Custodio y Llamas, 1983). La permeabilidad (K) es igual al cociente entre la transmisividad (T) y el espesor del acuífero (b). Tiene dimensiones de velocidad y se expresa m/día.

$$K = T/b \quad (20)$$

En cuanto a la parametrización de las propiedades de acuífero en los modelos, se reconoce que las pruebas de bombeo son de una utilidad útil pero algo limitada, en virtud de errores de ejecución y de interpretación de estas, del problema de escala, y porque normalmente éstas sólo se han ejecutado en algunas zonas de los acuíferos, es necesario utilizar otras piezas de información para proponer una zonificación preliminar de las propiedades hidráulicas, y para establecer el ámbito de valores realistas que estos parámetros pueden tomar.

Así, la zonificación de la conductividad hidráulica en el modelo se realizó mediante la inspección y análisis de distintas piezas de información hidrogeológica disponibles. Algunas de las pruebas de bombeo y de aforo se recurrió al método del caudal específico (Logan, 1964) para obtener estimaciones previas de la transmisividad. Pero como elementos adicionales, se consideraron los tipos y distribución espacial de las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio, la topografía del terreno, los gradientes hidráulicos, la ubicación de los

pozos y sus caudales de bombeo, la consistencia con la recarga difusa, y el análisis de los residuales de calibración.

La distribución espacial de los pozos de extracción, también son auxiliares para la delimitación de las zonas de conductividad hidráulica en el modelo. En zonas donde no hay pozos de bombeo o donde hay pocos y su extracción es baja, el criterio del gradiente hidráulico resulta muy útil. Si en una zona del acuífero la extracción es pequeña, esto no supone que la conductividad hidráulica lo sea también, pero por lo general en zonas donde el bombeo es elevado, la conductividad hidráulica también lo es. Es posible que se tenga una extracción relativamente alta en una zona de conductividad relativamente baja, pero esto se deberá ver reflejado en el modelo numérico con un abatimiento muy grande alrededor de los pozos de extracción.

Un criterio adicional para la zonificación de la conductividad hidráulica es el de consistencia entre los valores de esta propiedad de acuífero y la recarga difusa. En la zona no saturada del terreno la recarga no puede exceder la magnitud de la conductividad vertical saturada (Spitz y Moreno, 1996). Si se supone una cierta correlación entre la conductividad hidráulica horizontal y la vertical, y entre esta última y la intensidad de la recarga, entonces la zonificación que se tenga de la recarga difusa en el modelo puede auxiliar en la demarcación de las zonas de conductividad hidráulica. Es evidente que este criterio se debe aplicar con cautela y en combinación con otros (Chávez et al., 2006).

Finalmente, otro de los criterios empleados para la zonificación de la conductividad hidráulica en el modelo, es el análisis de los residuales, que son la diferencia entre las cargas simuladas y las observadas. Durante el proceso de calibración los residuales pueden ir revelando la necesidad de definir nuevas zonas para este parámetro o de fusionar algunas de

las ya existentes. Los residuales también ayudan a delimitar la extensión y forma de las zonas de conductividad hidráulica.

Los valores de la conductividad hidráulica del Acuífero Valle de Juárez oscilan entre 0.1 y 28.5 m/día. En la zona urbana su valor promedio es de 7.4 m/día; en el resto del valle los valores fluctúan entre 0.12 y 9.64 m/día con un valor promedio de 3.2 m/día. En el valle de Bandejas se presenta un valor medio de 9 m/día (Conagua, 2008).

2.8.5 Coeficiente de Almacenamiento

Se define como la cantidad de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime la unidad. Consecuentemente, no tiene dimensiones. En el caso de que el acuífero trabaje como libre, el coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que puede ceder un volumen unitario de acuífero por acción de la gravedad. Se presenta por “S” y es adimensional (Custodio & Llamas, 2000).

Para el caso de los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento es conocido como rendimiento específico “Sy” (specific yield), el cual representa el volumen de agua liberado de una unidad de acuífero saturado como producto del desecamiento de los poros del material, es decir su valor es igual al de la porosidad eficaz. En los acuíferos confinados, el coeficiente de almacenamiento depende de los efectos mecánicos elásticos de la compresión del material del acuífero y de la expansión propia del agua, cuando se reduce la presión de ésta por efectos de bombeo (Custodio & Llamas, 2000).

El rango usual de valores de coeficientes de almacenamiento para acuíferos libres es de 0.01 a 0.30, mientras que para acuíferos confinados o semiconfinados es de 5×10^{-3} a 5×10^{-5} (Freeze & Cherry). El coeficiente de almacenamiento “S” se obtiene solamente de pruebas de bombeo con pozos de observación en los alrededores del pozo de bombeo.

Por lo que respecta al coeficiente de almacenamiento S del Acuífero Valle de Juárez, para la zona urbana su valor promedio es 0.00044 y para el resto del valle 0.00063. El valor del rendimiento específico varía de 0.12 a 0.26, con promedio de 0.15 (Conagua, 2008).

2.8.6 Niveles Estáticos

La medición de los niveles estáticos de agua provee una información básica en los estudios hidrogeológicos, ya que determina el nivel estático y dinámico del acuífero, dependiendo si el pozo en el que se toma la medida se encuentre bombeando (dinámico) o no (estático) (Sanders,1998). Para la elaboración del mapa de isofreáticas se utilizó el método de interpolación de Kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones. Esto para obtener datos en los lugares donde no hay información de pozos, las curvas interpretativas se basan en deducciones con ayuda de las curvas y se indican como hipotéticas. Juntando la información se obtuvieron los niveles piezométricos de los pozos de los años 2008 y 2014. El equipo utilizado para la medición de los niveles fue una sonda eléctrica. En esta misma fase se realizó la ubicación exacta de los pozos por coordenadas UTM y la determinación de la altitud de los brocales. Obtenidos por la Comisión Nacional del Agua, midiéndose los abatimientos en el pozo de extracción, para posteriormente en gabinete crear una tabla con los datos obtenidos como lo vemos en la tabla 20.

Tabla 20 Información de niveles Piezométricos de los años 2008 y 2014

No. de Pozo	Este X	Norte Y	Profundidad total del pozo (m)	Profundidad NE 2008 (m)	Profundidad NE 2014 (m)	Promedio NE (m)	Elevación Brocal (msnm)	Elev NE (msnm)
5	361817	3512064	252.67	51.03	52.8	51.915	1128.67	1076.755
5-R	360341	3513563	239.58	54.15	54.21	54.18	1129.58	1075.4
6	359740.4	3511645	292.93	95.25	102.8	99.025	1160.93	1061.905
9-R	358652	3513071	193.764	68.03	67.87	67.95	1132.95	1065
12	359850	3509936	249.66	81.5	81.15	81.325	1148.18	1066.855
14	359616	3511498	261.68	59.78	68.35	64.065	1130.68	1066.615
14-R	359616	3511498	275	68.92	68.35	68.635	1144	1075.365
15-R	360121	3511631	205.31	64.2	65.98	65.09	1129.31	1064.22
16-R	358797	3512198	234.89	60.58	74.8	67.69	1141.95	1074.26
17-R	363148	3514330	248.68	60.65	54.01	57.33	1127.18	1069.85
19-R	365742	3507954	194.58	5.35	48.55	26.95	1123	1096.05
28	362430	3510373	189.22	54.99	55.42	55.205	1128.48	1073.275
33	362193	3512992	223.12	55.51	56.48	55.995	1129.92	1073.925
37	363499	3512340	220.326	52.36	53.5	52.93	1126.64	1073.71
38	364090	3511062	245.48	53.2	53.9	53.55	1126.72	1073.17
39	364090	3511062	178.183	50.24	52.58	51.41	1126.92	1075.51
42-R	364616	3509804	240.06	57.89	52.81	55.35	1125.59	1070.24
43	363472	3510405	198.67	53.56	53.41	53.485	1127.3	1073.815
45	362499	3509306	184.259	65.25	69.95	67.6	1127.48	1059.88
50-R	363691	3506543	273.7	90.3	93.94	92.12	1171.7	1079.58
55-R	359406	3512969	464.296	68.08	64.7	66.39	1130.62	1064.23
58Y58-R	362889	3513596	483.33	53.66	54.72	54.19	1128.33	1074.14
61Y61-R	363361	3508802	198.8	62.34	64.61	63.475	1125.8	1062.325
64	361310	3510027	233.474	70.03	75.36	72.695	1129.1	1056.405
66	362210	3508143	318.013	82.63	85.15	83.89	1140.98	1057.09
68-R	365800	3509266	187.15	46.5	48.96	47.73	1122.15	1074.42
70-R	362708	3505091	152.5	105.6	109.15	107.375	1170.5	1063.125
73 Y 73-R	365256	3504139	255.877	93.15	94.48	93.815	1156.9	1063.085
73-RR	365254	3504131	260.5	112.65	48.96	80.805	1156.9	1076.095
74	363896	3508587	261.383	60.59	55.03	57.81	1126.29	1068.48
75 Y 75-R	366892	3502285	253.611	100.28	95.54	97.91	1156.35	1058.44
78 Y 78-R	365601	3501040	177.83	46.61	44.65	45.63	1122.83	1077.2
80-B	365834	3504499	247.37	86.77	87.76	87.265	1152.37	1065.105
88	363493	3505086	249.437	99.52	110.98	105.25	1167.93	1062.68
91	360217	3505656	248.603	145	145.6	145.3	1206.22	1060.92
97Y97-R	362003.38	3501817.9	287.809	116.99	128.91	122.95	1190.441	1067.491
99-R	363151	3503174	259.5	116.35	120.85	118.6	1179.14	1060.54
116	368511	3504839	204.655	31.69	35.55	33.62	1120.2	1086.58
131	366589	3507167	205.28	42.84	45.77	44.305	1122.28	1077.975
139	367674	3504128	257.374	70.21	68.64	69.425	1133.82	1064.395
142	360762.52	3503333.73	284.395	159.97	154.7	157.335	1221.86	1064.525

No. de Pozo	Este X	Norte Y	Profundidad total del pozo (m)	Profundidad NE 2008 (m)	Profundidad NE 2014 (m)	Promedio NE (m)	Elevación Brocal (msnm)	Elev NE (msnm)
144	367541	3501702	281.39	100.7	98.8	99.75	1170.87	1071.12
146	364384	3506304	235.89	76.3	76.21	76.255	1133.89	1057.635
168	363916	3499281	299.237	109.2	114.06	111.63	1182.65	1071.02
196	365648.91	3497007.24	320.373	105.23	111.09	108.16	1184.659	1076.499
200	365839.85	3498472.08	300	113.35	118.55	115.95	1187.135	1071.185
220	370088.9	3503750	244	24.5	27.11	25.805	1118.49	1092.685
221	361223.89	3498774.49	244	126.37	131.58	128.975	1207.482	1078.507
238	371090.88	3494760.25	235.25	101.72	105.22	103.47	1189.804	1086.334
PGI-39	376048	3498872	298.7	95.89	100.07	97.98	1108	1010.02

A partir de las mediciones de la profundidad del nivel estático en los pozos piloto, que se realizaron en Octubre – Noviembre de 2008 (cifras que se mostraron en la tabla anterior), se procedió a elaborar la configuración de las curvas de igual valor de profundidad del nivel estático para este periodo, se puede apreciar que se tienen zonas con profundidades someras, del orden de 1 a 3 metros, sobre todo en las regiones sureste y este de la zona de estudio, esto es en las partes más planas del valle, en las proximidades del cauce natural del río Bravo (CONAGUA, 2008).

También existen profundidades considerables, de hasta 145 metros como máximas, en la zona noroeste, lo cual se asocia al hecho de que están situados en las partes elevadas del valle, en las estribaciones de las elevaciones que conforman las sierras que limitan el valle en esta parte. En la zona urbana de ciudad Juárez, se tienen profundidades del nivel del agua en el acuífero entre 40 y 100 m. preferentemente. En el resto del valle las profundidades al nivel del agua en los pozos varían preferentemente entre 49 y 5 m. En el valle de Bandejas, las profundidades del nivel estático varían entre 40 y 100 m.

2.8.7 Evolución histórica de la extracción, producción y proyección de agua potable en Cd. Juárez Chihuahua.

Para los años del 2016-2030 se tiene una proyección estimada de extracción de 2,642,777,915 m³, Por lo que de 1926-2030 se tendría un volumen extraído de 8,374,599,751 m³ El acuífero del Bolsón de la Mesilla, desde el 27 de mayo del 2010, que inicio su monitoreo, la extracción ha sido de 120,399,524 m³ hasta la fecha y su abatimiento es de 1.20m al año.

Con la proyección de población de CONAPO analizadas anteriormente se calculó el volumen de extracción tomando en consideración para el cálculo de extracciones futuras, la dotación en litros por habitante por día, a continuación, se muestra la tabla 21 de cálculo de volúmenes extraídos de 2015 al 2030. A estas cantidades se le debe agregar a cada año 20,530,225 m³ cantidad que entra al sistema del Acuífero Bolsón de la Mesilla como lo vemos en la figura 48. El consumo propuesto es de 230 l/hab/día, ya que se considera que es Zona Media con un Clima Cálido. Considerando un porcentaje 27.79% de perdida inicial y 14.95% final

Tabla 21 Volúmenes Proyectados del 2015-2030

Año	Población Hab.	Consumo l/hab/día	Perdidas %	Dotación l/hab/día	Q Medio (m ³ /s)	Q max d (m ³ /s)	Volumen Extraído	Q max h (m ³ /s)
2015	1,409,987	230	27.79%	319	5.21	7.29	164,171,808	11.3
2016	1,422,149	230	27.15%	316	5.2	7.28	164,030,668	11.28
2017	1,434,783	230	26.51%	313	5.2	7.28	163,916,780.40	11.28
2018	1,447,564	230	25.86%	310	5.19	7.27	163,791,882	11.27
2019	1,460,232	230	25.22%	308	5.21	7.29	164,159,276.70	11.3
2020	1,472,717	230	24.58%	305	5.2	7.28	163,950,190.30	11.28
2021	1,485,190	230	23.94%	302	5.19	7.27	163,71,2443.5	11.27
2022	1,497,815	230	23.30%	300	5.2	7.28	164,010,741.70	11.28
2023	1,510,419	230	22.65%	297	5.19	7.27	163,737,011.10	11.27
2024	1,522,956	230	22.01%	295	5.2	7.28	163,984,303.80	11.28
2025	1,535,350	230	21.37%	293	5.21	7.29	164,198,004.60	11.3
2026	1,547,515	230	20.73%	290	5.19	7.27	163,804,446.90	11.27
2027	1,559,412	230	20.09%	288	5.2	7.28	163,925,351.30	11.28
2028	1,571,021	230	19.44%	286	5.2	7.28	163,998,933.40	11.28
2029	1,582,316	230	18.80%	283	5.18	7.26	163,445,344.50	11.25
2030	1,593,238	230	18.16%	281	5.18	7.25	163,410,504.30	11.24
			14.95%					

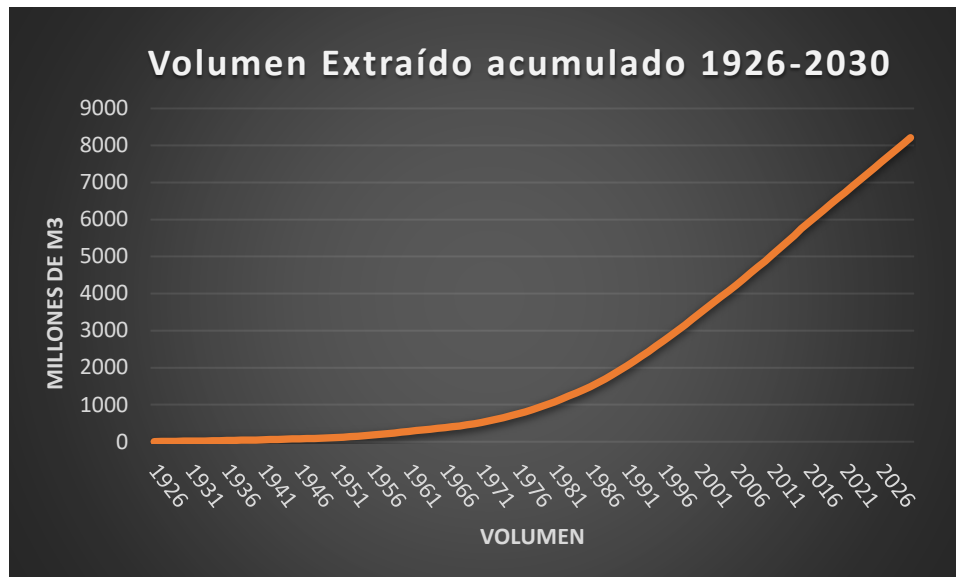


Figura 48 Volúmenes extraídos de 1926-2015 y proyectados 2016-2030

2.9 Abatimientos de los niveles de agua subterránea

Una de las piezas básicas de los datos en hidrogeología es el nivel de agua subterránea que puede ser medido en un pozo. En la práctica, el nivel del agua subterránea se mide en términos de agua desde la parte superior de la carcasa del pozo, esto puede traducirse en una elevación del agua subterránea restando la profundidad al agua de la elevación de la parte superior de la carcasa, estos datos son importantes en dos aspectos:

Primero, la medición rutinaria de elevaciones de agua subterránea con el tiempo puede producir información sobre si el almacenamiento de agua subterránea está disminuyendo (disminuyendo la elevación del agua subterránea con el tiempo), estable (sin cambios significativos en las aguas subterráneas elevación con el tiempo), o aumentando (aumentando la elevación del agua subterránea con el tiempo).

Las elevaciones de agua subterránea en los pozos cercanos se pueden utilizar para evaluar la dirección del flujo. El agua subterránea fluye de la elevación más alta a la más baja, además,

la medición de rutina se puede utilizar para evaluar si la dirección del flujo va cambiando con el tiempo.

Un modelo de flujo de agua subterránea es una simplificación de un sistema de flujo real de agua subterránea, los sistemas de flujo de aguas subterráneas son complejos, y es utilizada generalmente para la planificación del recurso y tomar decisiones de la gestión hídrica.

La US Geological Survey desarrolló un modelo de flujo de agua subterránea en el año 2003 (Heywood y Yager, 2003) para el Bolsón del Hueco. Los resultados del modelo fueron que el sistema de Dinámica (el flujo hacia el sistema no es fijo y está influenciado por el bombeo). La clave la delimitación del modelo es que es un modelo regional, por lo que no se puede abordar las cuestiones locales tales como predecir el rendimiento del pozo en un lugar particular, predecir el movimiento de las aguas subterráneas en pequeña escala, o evaluar los cambios en el bombeo en una escala de campo de pozos. Bajo este panorama el área de estudio tiene que ser regional. (Hutchison, 2004)

2.10 Dirección y Disposición del Flujo de Aguas Subterráneas

Se presenta la dirección del flujo de agua subterránea en tiempos de "pre-desarrollo". Que se considera al año de 1903 donde la extracción en Ciudad Juárez era mínima figura 49.

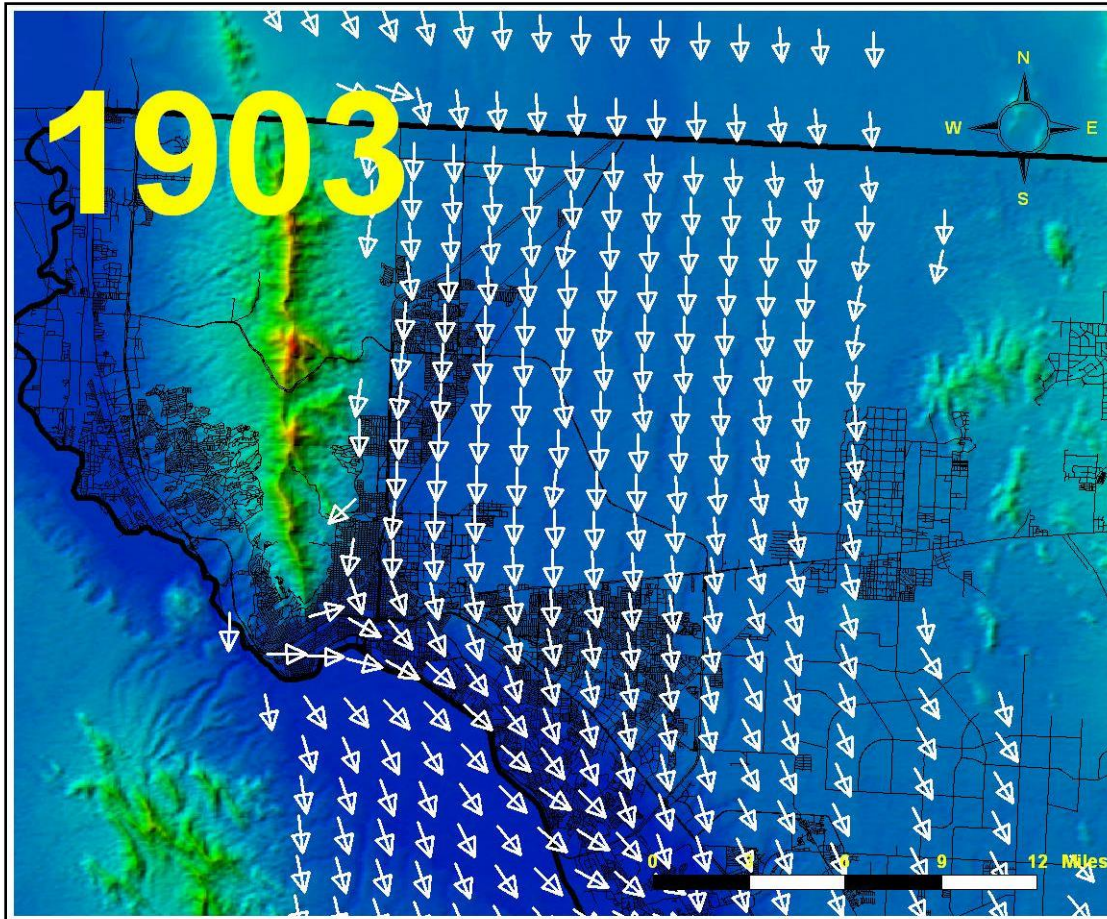


Figura 49 Líneas de flujo en el predesarrollo de Ciudad Juárez-El Paso (Hibbs, 1988).

Hay que tomar en cuenta que el agua subterránea está fluyendo esencialmente de norte a sur en Nuevo México y Texas hasta que llega al Río Grande, cuando gira hacia el sureste, se puede observar que las líneas de flujo van siguiendo la Corriente del Rio Bravo.

La dirección del flujo de agua subterránea en 2002. Se observa un importante cono de abatimiento en el área del aeropuerto de El Paso Texas y la parte central de Ciudad Juárez causado por el alto bombeo. Moviéndose el flujo en respuesta a dichas extracciones, hay que tomaren cuenta que antes de 1960, el agua subterránea fluía de Juárez a El Paso, y a partir de 1960, por el aumento del bombeo en Ciudad Juárez, ha dado como resultado una inversión de esta tendencia y ahora el agua subterránea fluye de El Paso a Juárez.

2.11 Método Estadístico de Interpolación IDW y Kriging.

La herramienta IDW (Ponderación de distancia inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio, Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra figura 50 (Esri, 2017).

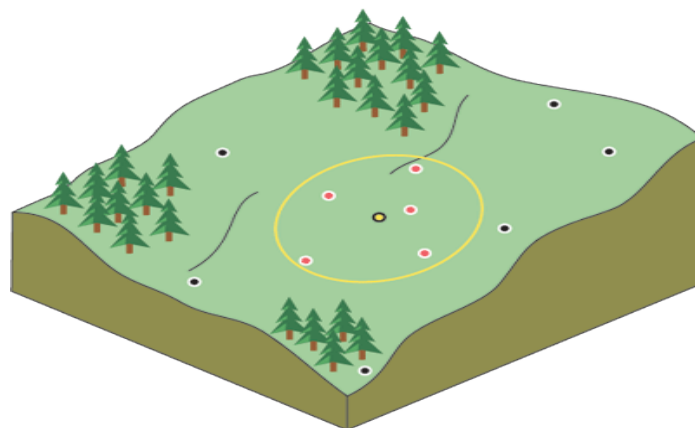


Figura 50 Vecindad de IDW del punto seleccionado (Esri, 2017).

Las herramientas de interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los

puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

El método geoestadístico Kriging pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i) \quad (21)$$

Donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = un peso desconocido para el valor medido en la ubicación i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = el número de valores medidos

En el método Kriging, las ponderaciones están basadas no sólo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de estos puntos medidos. Para utilizar la disposición espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada. Por tanto, en Kriging ordinario, el peso, λ_i , depende de un modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción. La ventaja del kriging sobre los métodos determinísticos es la estimación de la varianza del error de predicción, lo cual permite además estimar intervalos de confianza para dicha predicción además de que el kriging es un método de estimación que da el mejor

estimador lineal insesgado (cuando se cumplen todos los supuestos). Inicialmente, el kriging fue desarrollado para aquellos casos donde hay presencia de estacionariedad y posteriormente fue extendido para casos donde se cumple la hipótesis intrínseca. En la actualidad la organización Fundecor que ha sido uno de los grandes precursores del desarrollo sostenible y manejo responsable de los recursos naturales en Costa Rica, utiliza este método de interpolación de modelos de elevación digital para la planificación del aprovechamiento del recurso hídrico (Fundecor, 2018). Dicho método provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regulares o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una mínima varianza conocida.

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie, gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de los pronósticos, con la interpolación de los años propuestos, el cual se utilizó para estimar la elevación, y con ello las isolíneas con las profundidades y elevaciones de los niveles estáticos.

En la imagen a continuación se muestra la asociación de un punto (en color rojo) con todas las demás ubicaciones medidas. Este proceso continúa con cada punto medido como se muestra en la figura 51 (Esri, 2017).

Tabla 22 Nivel Estático para el año 1980 (73 pozos) (CONAGUA, 2008).

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 1980(m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
5	1128.67	40.6	1088.11	36109.37	3512064.1
9	1133.02	47.2	1085.8	358705.53	3513045.3
10	1129.18	40.4	1088.58	361377.37	3513172.2
11	1131.04	44.6	1086.4	359689.58	3510865.7
12	1142.34	54	1088.36	359847.38	3509931.2
13	1164.68	79.1	1085.58	358915.44	3510352.6
14	1129.31	44.3	1085.06	359611.24	3511496.8
15	1129.31	43.3	1086.03	360118.6	3511638.1
16	1141.95	52.5	1089.45	358776.44	3512189.1
17	1127.18	38	1089.23	363145.67	3514331.9
19	1123	40.2	1082.76	365129.24	3507960.4
23	1128.58	43.1	1085.5	363208.77	3511415.2
33	1129.92	48.4	1081.56	362113.55	3512997.7
37	1126.81	39.1	1087.76	363485.37	3512342.3
38	1126.72	38.2	1088.57	364462.63	3512249.9
39	1126.92	36.3	1090.61	364081.68	3511073.8
42	1125.13	27.5	1097.59	364636.92	3509820.8
43	1127.3	36	1091.27	363466.48	3510409.3
44	1140.55	50.4	1090.45	360915.66	3509438.3
45	1127.48	35.5	1091.95	362497.04	3509310.4
46	1123.24	72.2	1051.06	364034.22	3503424.4
41	1120.77	12.3	1108.46	369611.11	3505373.9
48	1122.16	18.9	1103.24	367275.44	3508107.5
50	1171.7	68.9	1102.8	363679.94	3506551.1
52	1179.2	84.7	1094.55	360695.26	3507635
53	1139.56	51.3	1088.31	358249.9	3512515.3
54	1154.25	51.5	1102.79	364110.21	3504835.4
55	1130.62	47.6	1082.99	359387.03	3512991.7
56	1118.66	8.04	1110.62	310046.98	3506368.5
51	1146.04	56.8	1089.25	358349.32	3511983.4
58	1128.33	38.8	1089.57	362882.33	3513588.1
59	1156.98	65.2	1091.76	360761.68	3508336.2
60	1156.8	66	1090.8	359494.1	3509347
62	1131.25	46.9	1084.34	35898.2	3513157.8
64	1129.1	40.6	1088.53	361325.47	3510031.2
65	1125.4	33.9	1091.47	364288.84	3511775.3
66	1115.28	46.7	1068.58	362200.22	3508144.8
67	1127.3	25.1	1102.24	366197.41	3512088.1
68	1122.15	30.7	1091.44	365786.52	3509268.2
70	1147.92	63.8	1084.05	359202.52	3510764
71	1109.71	33.7	1016.03	364914.39	3511506.9
72	1187.6	79.9	1107.7	361604.79	3505587.4
73	1152.92	49.3	1103.6	365253.62	3504137.8
74	1126.29	27.9	1098.39	363884.45	3508598.8

La información disponible de niveles estáticos proporcionada por la junta Municipal de Aguas y saneamiento para el año de 1990 es la tabla 23.

Tabla 23 Nivel Estático para el año 1990 (65 pozos) (CONAGUA, 2008).

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 1990 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
5	1128.67	51.62	1077.05	361809.37	3512064.1
10	1129.18	50.34	1078.84	361377.37	3513172.2
14	1129.31	50.87	1078.44	359611.24	3511496.8
28	1128.48	48.95	1079.53	362425.12	3510382.1
37	1126.81	47.73	1079.08	363485.37	3512342.3
38	1126.72	49.19	1077.53	364462.63	3512249.9
39	1126.92	45.13	1081.79	364081.68	3511073.8
43	1127.3	46.53	1080.77	363466.478	3510409.3
45	1127.48	45.67	1081.81	362497.04	3509310.4
62	1131.25	53.86	1077.39	358928.2	3513157.8
64	1129.1	52.53	1076.57	361325.47	3510031.2
67	1127.3	26.55	1100.75	366197.41	3512088.1
77	1136	56.36	1079.64	363245.82	3507677.9
79	1123.87	27.07	1096.8	365155.72	3507488.4
81	1155.52	68.85	1086.67	361997.41	3507330.9
84	1178.41	98.83	1079.58	360977.21	3507413.4
86	1169.74	88.35	1081.39	362214.13	3506320.8
88	1175.67	78.8	1096.87	363482.37	3505085.3
91	1179.2	122.6	1056.6	360203.96	3505651.9
92	1178.26	91.41	1086.85	362379.41	3504560.9
94	1206.24	111.43	1094.81	361077.98	3502693.8
98	1178.82	85.59	1093.23	363555.52	3504379.5
104	1178	79.67	1098.33	365040.47	3502451.0
106	1127.48	52.31	1075.17	363290.24	3513976.5
110	1128.36	55.6	1072.76	363472.79	3513539.0
111	1128.69	43.57	1085.12	365543.87	3513374.6
114	1112.12	28.57	1083.55	366944.2	3505500.3
117	1119.68	16.71	1102.97	369369.39	3504393.2
118	1127.49	51.65	1075.84	364165.05	3508069.6
119	1126.15	48.9	1077.25	363970.88	3509142.6
120	1122.69	28.85	1093.84	367221.35	3507513.8
121	1122.45	28.53	1093.92	366587.28	3507824.0
128	1123.86	35.8	1088.06	365293.34	3506315.6
129	1121.35	21.48	1099.87	368515.27	3506792.7
130	1120.86	19	1101.86	368971.82	3506297.0
138	1175.54	80.3	1095.24	366153.62	3502077.3
139	1133.82	37.88	1095.94	367664.98	3504127.8
141	1186.88	92.04	1094.84	364121.593	3502007.6
143	1143.73	46.2	1097.53	368135.05	3503655.7
145	1127.06	42.85	1084.21	365913.54	3511356.0
146	1133.89	51.54	1082.35	364378.3	3506305.6
149	1157.56	61.31	1096.25	367973.3	3502329.8
150	1151.56	48.87	1102.69	367935.79	3503097.2

Tabla 23 (Continuación) Nivel Estático para el año 1990 (65 pozos) (CONAGUA, 2008).

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 1990 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
126R	1123.87	50.75	1073.12	364460.01	3512758.2
13R	1164.68	82.32	1082.36	358915.44	3510352.6
15R	1129.31	52.28	1077.03	360118.6	3511638.1
17R	1127.18	50	1077.18	363145.67	3514331.9
47R	1120.77	15.46	1105.31	369612.11	3505373.9
53R	1139.56	55.3	1084.26	358249.9	3512515.3
54R	1154.25	65.6	1088.65	364111.21	3504835.4
55R	1130.62	53.07	1077.55	359387.03	3512991.7
56R	1118.66	12.79	1105.87	370046.98	3506368.5
58R	1128.33	51.55	1076.78	362882.33	3513588.1
5R-CHAM	1129.58	51.25	1078.33	360330.77	3513565.2
71R	1109.71	45.21	1064.5	364914.39	3511506.9
72R	1187.6	90.78	1096.82	361604.79	3505587.4
73R	1152.92	64.16	1088.76	365253.62	3504137.8
75R	1156.35	71.75	1084.6	366865.68	3502300.3
76R	1123.34	31.08	1092.26	367163.35	3511665
78R	1122.83	37.05	1085.78	365592.31	3510040.7
80A	1146.34	52.65	1093.69	366528.96	3504344.9
80B	1152.37	51.17	1101.2	365831.04	3504499
90R	1192.26	102.19	1090.07	360454.71	3504921.2
99R	1178.15	79.18	1098.97	363140.69	3503158.2
9R	1133.02	51.55	1081.47	358634.41	3513056.7

Por último, la información más reciente con que se cuenta de niveles estáticos proporcionada por la Junta Municipal de Aguas y saneamiento para el año de 2014 es la tabla 24.

Tabla 24 Nivel Estático para el año 2014 (176 pozos) (CONAGUA, 2008).

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 2014 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
3-Z	1118.54	11.5	1107.04	372962.44	3503749.5
5	1128.67	52.8	1075.87	361809.37	3512064.1
6	1160.93	102.8	1058.13	360289.91	3508650.6
12	1142.34	81.15	1061.19	359847.38	3509931.2
14	1129.31	68.35	1060.96	359611.24	3511496.8
28	1128.48	55.42	1073.06	362425.12	3510382.1
33	1129.92	56.48	1073.44	362173.55	3512997.7
37	1126.81	53.5	1073.31	363485.37	3512342.3
38	1126.72	53.9	1072.82	364462.63	3512249.9
39	1126.92	52.58	1074.34	364081.68	3511073.8
43	1127.3	53.41	1073.89	363466.478	3510409.3
45	1127.48	69.95	1057.53	362497.04	3509310.4
48	1122.16	44.09	1078.07	367275.44	3508707.5

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 2014 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
59	1156.98	100.3	1056.68	360761.68	3508336.2
60	1156.8	95.7	1061.1	359494.1	3509347
64	1129.1	75.36	1053.74	361325.47	3510031.2
66	1115.28	85.15	1030.13	362200.22	3508144.8
74	1126.39	55.03	1071.36	363884.45	3508598.8
76	1123.54	42.22	1081.32	367163.353	3511665
81	1156.43	101.5	1054.93	361997.41	3507330.9
84	1178.41	122.66	1055.75	367935.61	3507413.4
87	1162.81	106.7	1056.11	362698.83	3505829.6
88	1175.67	110.98	1064.69	363482.37	3505085.3
91	1179.2	145.6	1033.6	367935.61	3505651.9
92	1178.4	121.02	1057.38	367935.61	3504560.9
95	1173.05	123.38	1049.67	367935.61	3503482.4
96	1177.39	119.02	1058.37	362213.96	3502498.9
100	1154.91	90.32	1064.59	364476.91	3504233.1
106	1126.98	53.92	1073.06	363290.24	3513976.5
111	1125.53	48.4	1077.13	365543.87	3513374.6
112	1126.48	63.13	1063.35	365866.999	3506031.5
114	1122.12	64.2	1057.92	366944.2	3505500.3
116	1120.2	35.55	1084.65	368513.87	3504841.9
117	1119.68	31.32	1088.36	369369.39	3504393.2
119	1126.99	56.87	1070.12	363970.88	3509142.58
120	1126.15	48.55	1077.6	367221.35	3507513.8
121	1122.45	45.78	1076.67	366587.28	3507824
122	1120.95	47.54	1073.41	366063.37	3508322.5
124	1122.22	43.82	1078.4	367041.27	3508179.8
128	1123.86	63.03	1060.83	365293.34	3506315.6
129	1121.35	38	1083.35	368515.27	3506792.7
130	1120.86	25.9	1094.96	368971.82	3506297
131	1122.28	45.77	1076.51	366578.54	3507165.1
132	1122.02	39.53	1082.49	366693.1	3506155.5
134	1121.86	33.55	1088.31	368883.52	3510733.7
138	1175.54	109.2	1066.34	366153.62	3502077.3
141	1186.88	127.29	1059.59	367935.61	3502007.6
142	1221.27	154.7	1066.57	367935.61	3503331.3
144	1170.869	98.8	1072.069	367525.19	3501707.5
146	1133.89	76.21	1057.68	364378.3	3506305.6
147	1173.86	113.5	1060.36	364849.59	3503289.5
148	1178.61	109.55	1069.06	366221.92	3501376.6
149	1157.59	90.42	1067.17	367973.3	3502329.8
150	1151.562	85.45	1066.112	367935.79	3503097.2
152	1178.5	112.9	1065.6	367864.194	3500949.1
157	1144.52	76.36	1068.16	369278.84	3501616.1
160	1175.83	103.23	1072.6	368546.622	3500821.3
161	1193.72	123.69	1070.03	367935.61	3498296.6
164	1121.95	39.51	1082.44	367135.69	3506625.3
165	1122.07	61.52	1060.55	367058.09	3504880.3
168	1182.65	114.06	1068.59	363887.02	3499306
170	1180.44	116.44	1064	364727.45	3499452.7

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 2014 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
171	1173.46	107.47	1065.99	366843.643	3501015
172	1177.21	111.84	1065.37	367270.74	3500552
174	1184.71	90.57	1094.14	369349.82	3500687.8
176	1185.29	106.86	1078.43	362816.08	3497814.4
177	1179.722	60.4	1119.322	363989.661	3497751.4
178	1142.28	60.4	1081.88	372411.38	3499695.7
179	1162.48	83.55	1078.93	371808.22	3498581
180	1146.12	51.8	1094.32	372757.35	3498765.6
182	1179.68	110	1069.68	364783.72	3497708.3
183	1185.65	131.26	1054.39	367935.61	3499930.1
184	1185.65	124.05	1061.6	367935.61	3500642.4
185	1185.65	110.71	1074.94	365553.714	3497678.4
186	1181.4	117	1064.4	366360.198	3497635.3
187	1183.73	139.85	1043.88	367935.61	3498559.4
188	1180.41	113.94	1066.47	367788.51	3499743.2
190	1187.58	121.97	1065.61	367935.61	3497595.79
191	1182.79	117.92	1064.87	368554.49	3497255.7
193	1183.94	104	1079.94	369694.8	3499193.3
194	1189.94	114.22	1075.72	369324.03	3497231.8
195	1177.726	111.53	1066.196	368454.98	3500223
196	1179.291	111.09	1068.201	365651.36	3497009.1
197	1193.92	121.96	1071.96	367935.61	3496680.5
198	1157.337	68.85	1088.487	373166.6	3497639.2
199	1189.229	120.1	1069.129	367935.61	3496749.5
200	1186.27	118.55	1067.72	365838.335	3498472
201	1188.679	106.14	1082.539	370591.48	3497852.5
202	1193.042	112.16	1080.882	370351.81	3496746.5
203	1189.027	118.46	1070.567	368932.22	3498751.8
204	1190.227	117.8	1072.427	369572.91	3498388.3
205	1182.077	103.1	1078.977	370904.9	3498696.9
206	1195.317	116.5	1078.817	369661.57	3495992.3
207	1190.024	109	1081.024	371135.505	3496431.1
209	1189.1	92.45	1096.65	371252.74	3496875.8
210	1138.558	122.96	1015.598	367935.61	3498143
211	1189.444	114.19	1075.254	368833.98	3496488.9
213	1193.35	108.5	1084.85	370721.16	3495634.8
215	1184.916	94.95	1089.966	366858.23	3495080.6
216	1185.552	107.15	1078.402	364267.51	3496246.4
218	1185.583	102.26	1083.323	365316.25	3495340.4
219	1184.932	106.92	1078.012	365167.6	3496202.6
220	1118.033	27.11	1090.923	370087.23	3503752.8
221	1205.965	131.58	1074.385	367935.61	3498773
222	1192.708	119.93	1072.778	367935.61	3495901.1
223	1133.412	41.48	1091.932	373639.91	3498788.7
231	1207.416	101.13	1106.286	370662.17	3485720.6
235	1189.892	100.04	1089.852	372136.47	3494539.2
238	1189.804	105.22	1084.584	371087.01	3494751.4
245	1194.237	100.07	1094.167	370951.974	3491116.3
10 10-R	1129.18	48.6	1080.58	361377.37	3513172.2

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 2014 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
104-(104-R)	1178	114.02	1063.98	365040.47	3502451
110 100-R	1128.16	56.3	1071.86	363472.79	3513539
11-R	1126.88	52.66	1074.22	364152.65	3514038.2
11S	1120.87	33.94	1086.93	367734.157	3505190.9
11S	1126.8	63.57	1063.23	366272.094	3505535.3
123-(123-R)	1122.2	52.54	1069.66	365252.36	3508765.6
126-R	1123.87	47.21	1076.66	364460.01	3512758.2
136-R	1187.43	121.39	1066.04	367935.61	3502460.3
13-RR	1166.5	101.65	1064.85	358873.27	3510325.3
13S 13S-R	1126.3	42.05	1084.25	366627.37	3512668.5
140-(5Z)	1148.432	75.37	1073.062	368962.44	3502110.6
14S	1127.06	46.8	1080.26	365913.54	3511356
14S	1143.73	74	1069.73	368135.05	3503655.7
15 15-R	1129.31	65.98	1063.33	360118.6	3511638.1
156-R	1154.41	95.1	1059.31	368548.65	3501503.2
158-(7Z)	1138.57	55.4	1083.17	371600.59	3500728.8
167-(167-R)	1184.21	114.33	1069.88	362813.806	3499584.3
16-R	1141.95	74.8	1067.15	358776.44	3512189.1
17-R	1127.18	54.01	1073.17	363145.67	3514331.9
192(VICTORIA)	1184.754	120.82	1063.934	367935.61	3497233.2
19-R	1123	48.55	1074.45	365729.24	3507960.4
1S9	1133.82	68.64	1065.18	367664.98	3504127.8
1SS	1132.3	71.75	1060.55	364058.45	3507078.3
210-R	1187.659	122.96	1064.699	367935.61	3499421.5
23-R	1128.58	57.96	1070.62	363208.77	3511415.2
240-(IVI-13)	1193.832	85.09	1108.742	371548.14	3491549
2S4	1189.858	85.09	1104.768	372590.508	3493382.9
2S9-(IVI-12)	1192.58	98.63	1093.95	372477.027	3490803.93
2-Z	1142.44	67.2	1075.24	370149.64	3502266.1
42-R	1125.59	52.81	1072.78	364636.92	3509820.8
46-R	1123.24	117.6	1005.64	364034.22	3503424.4
47-R	1120.77	28.2	1092.57	369611.106	3505373.9
4-R	1130.64	16.5	1114.14	360851.78	3512533.9
4-Z	1140.6	54.9	1085.7	371345.47	3501856.3
50-R	1171.7	93.94	1077.76	363679.94	3506551.1
53-R	1139.56	68.5	1071.06	358249.9	3512515.3
54-R	1154.25	98.8	1055.45	364110.214	3504835.4
55-R	1130.62	64.7	1065.92	359387.03	3512991.7
58 58-R	1128.58	54.72	1073.86	362882.33	3513588.1
5-R	1129.58	54.21	1075.37	360330.77	3513565.2
62-R	1131.25	65.24	1066.01	358928.2	3513157.8
63-R	1185.78	133.88	1051.9	367935.61	3506410.4
67-R	1127.3	43.92	1083.38	366197.41	3512088.1
68-R	1122.15	48.96	1073.19	365786.52	3509268.2
6Z-(151)	1151.178	72.5	1078.678	369955.84	3501464.2
71-R	1109.71	51.23	1058.48	364914.39	3511506.9
72-R	1187.6	125.25	1062.35	367935.61	3505587.4
75-(75-R)	1156.35	95.54	1060.81	366865.68	3502300.3
78-R	1122.83	44.65	1078.18	365592.31	3510040.7

No. de Pozo	Elev. Brocal (msnm)	Prof. NE 2014 (m)	Elevación Ne (msnm)	Este X	Norte Y
79-R	1121.937	29.28	1092.657	369766.181	3507577.2
7-R	1129.1	62.46	1066.64	362725.64	3511730.2
7S-R	1152.92	94.48	1058.44	365253.621	3504137.8
80-B	1152.37	87.76	1064.61	365831.04	3504499
82-R	1192.5	135.26	1057.24	367935.61	3505680.8
86-(86-R)	1169.74	115.22	1054.52	362214.13	3506320.8
89-(89-R)	1187.74	131.61	1056.13	367935.61	3504837.5
8-Z	1117.27	33.81	1083.46	371286.49	3503215.4
90-RR	1192.2	133.72	1058.48	367935.61	3505001.5
93-R	1198.94	142.7	1056.24	367935.61	3503921.3
94-R	1206.24	149.8	1056.44	367935.61	3502693.8
97-(97-R)	1185.78	128.91	1056.87	367935.61	3501824.6
98-R	1178.82	112.69	1066.13	363555.52	3504379.5
99-R	1178.15	120.85	1057.3	367935.61	3503158.2
9-R	1132.95	67.87	1065.08	358634.41	3513056.7
S6-R	1118.66	23.56	1095.1	370046.98	3506368.5

2.11 Etapa del diseño del modelo

En esta etapa se determina el dominio del modelo, lo que incluye: condiciones de frontera o límites, parámetros hidráulicos, espesores de las capas geológicas, recarga difusa y caudales de extracción de los pozos, etc. Toda esta información fue pasada a formato digital compatible con las usadas por el programa Visual Modflow Clásico.

El modelo numérico necesita una serie de datos de entrada para representar las condiciones del acuífero. Entre los datos de entrada se pueden mencionar las condiciones de frontera o límites, parámetros hidráulicos, espesores de las capas geológicas, recarga directa y caudales de extracción de los pozos. Entre los datos de salida están la distribución de las cargas piezométricas y el balance de masa para el área analizada.

Para la delimitación de la frontera y propiedades del acuífero se utilizan los mapas bases de la zona en estudio importados en formato dxf y posteriormente se definen como entrada directa al modelo.

El primer grupo de información corresponde a los pasos básicos necesarios para la creación del nuevo modelo del sistema que se desea resolver. Visual MODFLOW Clásico para este propósito posee dos alternativas:

Importar un plano del sector a modelar preexistente, el cual debe ser un archivo *.DXF, que corresponde a un formato del programa de dibujo AUTOCAD o *.BMP (Imagen), y luego definir dentro del modelo el número de columnas, filas y capas del sistema, especificando cota mínima (Zmin) y cota máxima (Zmax). Si bien con la definición de las columnas, filas y capas queda definida una malla factible a ser usada por el método de diferencias finitas, ésta puede ser refinada dentro del modelo, particularmente en áreas de interés, como por ejemplo zonas de discontinuidad del acuífero, zonas de concentración de pozos, etc.

Otra opción es definir dentro de Visual MODFLOW la geometría del sistema, definiendo las dimensiones en planta de la zona y luego el número de columnas, filas y las capas de manera análoga al caso anterior. Esta opción presenta como desventaja que elementos tales como ríos, zonas de discontinuidad de las propiedades del acuífero y otros elementos, no son visualizados tan fácilmente como en la alternativa anterior, en donde éstas podían venir dibujadas en el mismo plano.

Una vez creado el modelo, se definió el sistema métrico a ocupar entre los disponibles en Visual MODFLOW el cual es m³/día. Además, para el caso de superficies variables de las capas (layers) del sistema, éstas se importaron desde un archivo de Autocad (dwg). Como se explica a continuación.

2.12 Capas del Modelo

Para la definición de las capas del modelo se correlacionó los perfiles creados a partir de los estudios geofísicos, desde un archivo de Autocad además de las características hidráulicas del acuífero, lo que ha permitido identificar 2 capas en función de la disposición geométrica tridimensional de éstas y las unidades hidroestratigráficas definidas, cada una tiene características hidráulicas diferentes.

Capa 1: Se presentan algunos estratos arcillosos, están constituido principalmente por material arenoso con algunas capas delgadas de arcilla. Esta sección muestra la parte del acuífero que está siendo aprovechada por los pozos que abastecen de agua potable a Ciudad Juárez Chihuahua.

Capa 2: Arcillas limos y arenas.

Es muy importante mencionar que el basamento del acuífero no se encontró en los datos de los pozos perforados, los estudios geológicos y los estudios geofísicos por encontrarse a una profundidad mayor del alcance de los estudios y los pozos perforados, por lo que se tuvo que asumir que se encuentra a la máxima profundidad de los pozos, para efectos del modelo. La figura 52 muestra los cortes transversales de la geología del área de estudio.

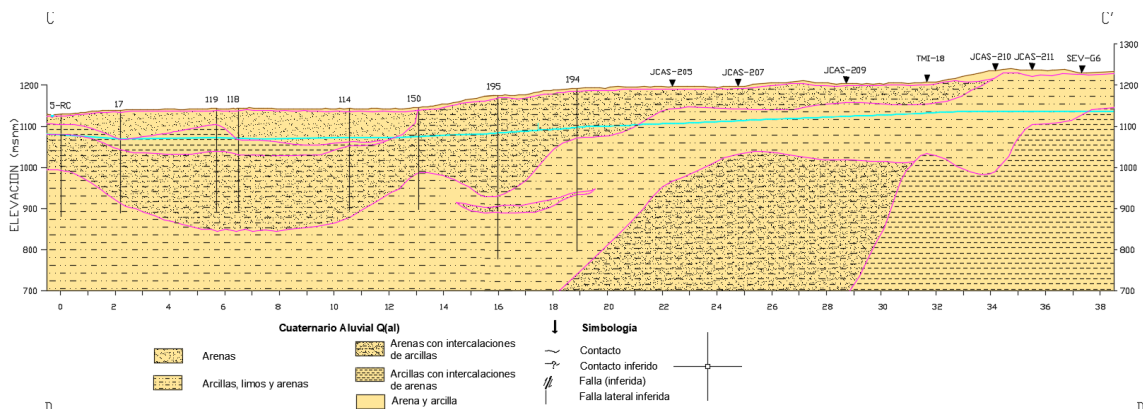


Figura 52 Capas en corte transversal del área de estudio

Además de definir las capas, hay que importar la topografía del área de estudio al modelo. Lo más cómodo es elaborar previamente un documento Excel con tres columnas: X, Y, Z. En las dos primeras columnas escribimos las coordenadas X, Y de situación del punto; en la 3ª columna la cota (topográfica o del contacto geológico). Para lo cual se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) Con los puntos disponibles, Visual Modflow interpolará y generará una superficie continua para toda la extensión del modelo. Como lo vemos en la figura 61 donde se observa un corte transversal del modelo donde se aprecia la topografía del terreno como las capas geológicas del modelo previamente explicadas.

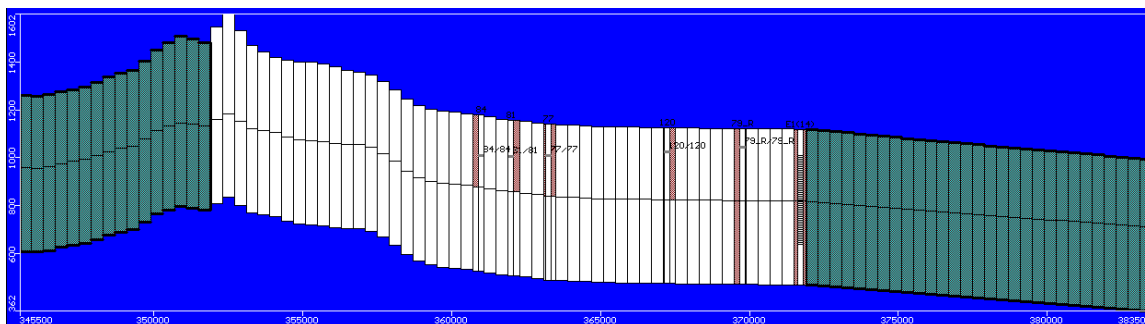


Figura 53 Topografía de superficie y capas del acuífero para el modelo matemático.

2.13 Acciones externas del modelo

Las dos acciones externas que consideraron en el modelo de simulación de aguas subterráneas son la recarga y la extracción.

Recarga Difusa

La recarga difusa es aquella que ocurre de manera espacialmente indiferenciada en superficies más o menos extensas, como es la que ofrece la porción de la lluvia que se infiltra y alcanza el nivel freático por percolación directa a través de la zona no saturada. Una recarga así también puede ocurrir por excedentes de riego en las superficies agrícolas, y por fugas en las redes hidráulicas en las áreas urbanas.

La recarga difusa en el modelo se demarcó con base en los diferentes usos de suelo que se identifican en zona de estudio según la carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional). Estos usos se clasificaron en o zonas para su incorporación en el modelo, a saber: matorral, agricultura de temporal, asentamientos humanos, entre otros.

La recarga ocurre por infiltración y percolación profunda del agua pluvial, la cual se calculó como la diferencias entre la precipitación y la evapotranspiración media anual, se generó una primera estimación de la recarga difusa en las áreas urbanas con los datos de la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento, para este cálculo se tomó en cuenta el volumen total distribuido en este período en las cabeceras municipales que se encuentran dentro de acuífero, el porcentaje de pérdidas en la red de distribución, y el área de la mancha urbana. También se incluye la recarga por retorno de riego en las superficies agrícolas. Para generar una primera estimación de la misma se utilizó el método del balance hídrico.

La extracción incluye aquella realizada mediante pozos de bombeo, un aspecto importante en la modelación de un determinado sistema, así como la incorporación de la recarga. Visual MODFLOW permite incorporar (o eliminar) pozos en forma gráfica. Los tipos de pozos que se pueden definir en Visual MODFLOW son:

–**Pozos de extracción:** Se definen asignando una tasa de extracción negativa.

–**Pozos de observación:** Estos pozos pueden ser utilizados como puntos de observación para las cargas hidráulicas. Un pozo queda definido al especificar su nombre dentro del modelo, su tasa de extracción (o inyección), tiempo de funcionamiento (inicio y término), profundidad, coordenadas y ubicación de cribas (dónde efectivamente se extrae el agua). Se

realizó y se recabo información con los pozos del área de estudio donde se elaboró una tabla de Excel con 71 pozos como se muestra en la tabla 25

Tabla 25 Bombeo de pozos de extracción del área de estudio

No de pozo	Este X	Norte Y	TRAMO RANURADO		Tiempo (días)	Q(m ³ /d)	Tiempo (días)	Q(m ³ /d)
			Top (msnm)	Base (msnm)				
5	361817	3512064	1076.755	876	793	5184	2085	4752
5-R	360341	3513563	1075.4	890	793	5903.7	2085	4959.36
6	359740.4	3511645	1061.905	868	793	4607.7	2085	2678.4
9-R	358652	3513071	1065	939.186	793	2592	2085	4032.29
12	359850	3509936	1066.855	898.52	793	3888	2085	2400.19
14	359616	3511498	1066.615	869	793	5039.7	2085	4464.29
14-R	359616	3511498	1075.365	869	793	5149.44	2085	4371.84
15-R	360121	3511631	1064.22	924	793	3311.7	2085	2937.6
16-R	358797	3512198	1074.26	907.06	793	3024	2085	3801.6
17-R	363148	3514330	1069.85	878.5	793	4607.7	2085	3391.2
19-R	365742	3507954	1096.05	928.42	793	5327.4	2085	3185.57
28	362430	3510373	1073.275	939.26	793	2879.7	2085	2297.38
33	362193	3512992	1073.925	906.8	793	4031.4	2085	4794.34
37	363499	3512340	1073.71	906.314	793	4607.7	2085	4320
38	364090	3511062	1073.17	881.24	793	4752	2085	4320
39	364090	3511062	1075.51	948.737	793	6335.7	2085	4699.3
42-R	364616	3509804	1070.24	885.53	793	3715.2	2085	3531.17
43	363472	3510405	1073.815	928.63	793	6480	2085	2160
45	362499	3509306	1059.88	943.221	793	3311.7	2085	2725.06
50-R	363691	3506543	1079.58	898	793	2735.4	2085	2929.82
55-R	359406	3512969	1064.23	666.324	793	4031.4	2085	3414.53
58 Y 58-R	362889	3513596	1074.14	645	793	5759.4	2085	5903.71
61 Y 61-R	363361	3508802	1062.325	927	793	2620.5	2085	3024
64	361310	3510027	1056.405	895.626	793	2879.7	2085	3988.22
66	362210	3508143	1057.09	822.967	793	1296	2085	2160
68-R	365800	3509266	1074.42	935	793	4031.4	2085	3976.13
70-R	362708	3505091	1063.125	1018	793	3024	2085	3024
73 Y 73-R	365256	3504139	1063.085	901.023	793	4175.7	2085	3573.5
73-RR	365254	3504131	1076.095	896.4	793	4138.56	2085	3481.92
74	363896	3508587	1068.48	864.907	793	2879.7	2085	2505.6
75 Y 75-R	366892	3502285	1058.44	902.739	793	3167.4	2085	2160
78 Y 78-R	365601	3501040	1077.2	945	793	4320	2085	2160
80-B	365834	3504499	1065.105	905	793	3311.7	2085	2094.34
88	363493	3505086	1062.68	918.493	793	3311.7	2085	2505.6
91	360217	3505656	1060.92	957.617	793	2592	2085	1468.8
97 Y97-R	362003.38	3501817.9	1067.491	902.632	793	2303.4	2085	3561.41
99-R	363151	3503174	1060.54	919.64	793	3456	2085	2608.42
116	368511	3504839	1086.58	915.545	793	4752	2085	4567.1
131	366589	3507167	1077.975	917	793	5327.4	2085	2160
139	367674	3504128	1064.395	876.446	793	4031.4	2085	2947.97
142	360762.52	3503333.73	1064.525	937.465	793	4895.4	2085	2147.9
144	367541	3501702	1071.12	889.48	793	3383.4	2085	3124.22

No de pozo	Este X	Norte Y	Top (msnm)	Base (msnm)	Tiempo (días)	Q(m ³ /d)	Tiempo (días)	Q(m ³ /d)
146	364384	3506304	1057.635	898	793	2879.7	2085	2937.6
168	363916	3499281	1071.02	883.413	793	3309.12	2085	2597.184
196	365648.91	3497007.24	1076.499	864.286	793	3456	2085	2678.4
200	365839.85	3498472.08	1071.185	887.135	793	3309.12	2085	2597.184
220	370088.9	3503750	1092.685	874.49	793	3743.712	2085	3456
221	361223.89	3498774.49	1078.507	963.482	793	3888	2085	3115.584
238	371090.88	3494760.25	1086.334	954.554	793	4175.712	2085	4761.504
PGI-39	376048	3498872	1010.02	809.3	793	2879.712	2085	2505.6
4-R	360870	3512553	1101.7	887	793	0	2085	3253.82
7-R	362754	3511729	1078.98	887.59	793	0	2085	3269.38
10-R	361405	3513175	1083.215	933	793	0	2085	2678.4
11-R	364157	3514032	1075.65	896.082	793	0	2085	3748.03
49-R	361386	3508730	1054.945	807.286	793	0	2085	3638.3
67-R	366206	3512085	1082.42	818	793	0	2085	2592
79-R	369763.98	3507578.21	1093.647	960.067	793	0	2085	4184.35
104-R	365062	3502468	1053.245	879.67	793	0	2085	4289.76
161	362028	3498273	1073.475	804.561	793	0	2085	2505.6
180	372764.8	3498766.22	1092.391	854.953	793	0	2085	3024
203	368934.54	3498749.78	1078.537	895.027	793	0	2085	3645.22
213	370720.78	3495636.62	1087.55	963.35	793	0	2085	3779.14
218	365313.04	3495342.84	1085.513	955.583	793	0	2085	3433.54
223	373632	3498785	1092.82	889.83	793	0	2085	3024
224	375450	3499935	1095.415	864	793	0	2085	760.32
3-Z	372976	3503755	1106.025	883.04	793	0	2085	2207.52
4-Z	371350.3	3501861.9	1086.88	890.05	793	0	2085	3074.11
13-RR	358880	3510324	1063.455	995	793	3888	-----	-----
42	364363	3510149	1072.44	932.454	793	4031.4	-----	-----
44	360924	3509436	1088.855	898.14	793	3391.2	-----	-----
126Y126-R	364463	3512751	1080.04	908.905	793	4161	-----	-----

Posteriormente se convirtió en formato de texto, que es la forma en que se pudo importar la base de datos de los pozos al programa Visual Modflow Clásico, esta base de datos se creó con la información disponible de los pozos del 2008 al 2014, esta información está compuesta por el número de pozos identificándolo como la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento, su coordenada, además de identificar el tramo ranurado (top y su base) en msnm, el tiempo de bombeo, en este caso en particular fue de 1 a 793 y 793 a 2085 que es el tiempo en días de 2008 al 2014, y por supuesto el gasto en m³/día, como se muestra en la figura 54.

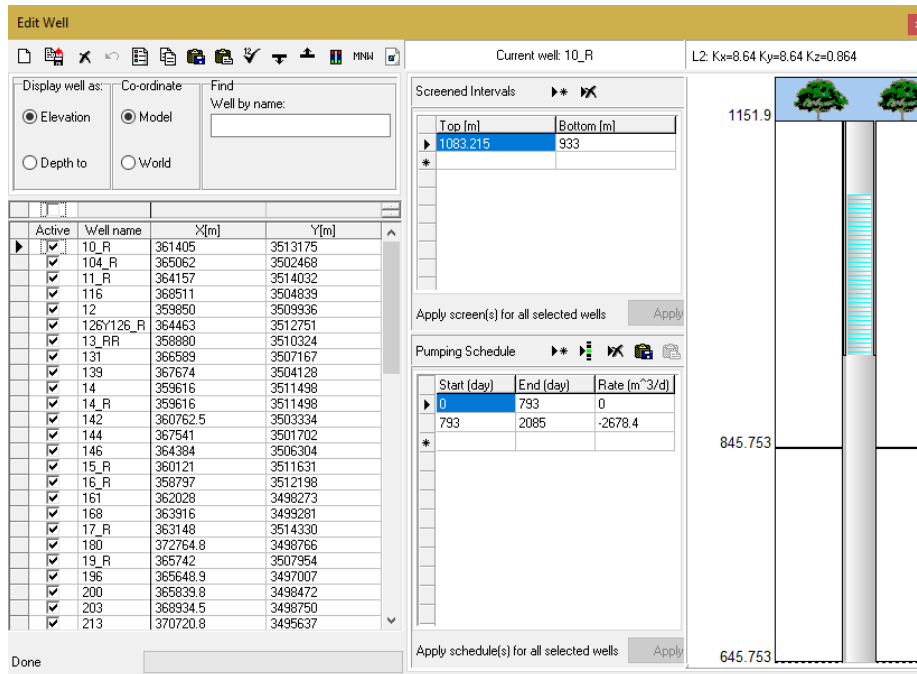


Figura 54 Base de datos de información de pozos en formato Visual Modflow

2.14 Propiedades Hidráulicas

Son tres los tipos de propiedades más importantes que se introducen, estas son:

- **Conductividad-** La conductividad hidráulica es un elemento básico en el avance del conocimiento de un medio geológico, tanto en los procesos de flujo y transporte de contaminantes como en proyectos de protección, gestión y manejo del medio ambiente, así como en el desarrollo de políticas públicas para la protección de ecosistemas, entre otros.
- **Almacenamiento-** El almacenamiento específico es el volumen de agua añadido o extraído por unidad de volumen del acuífero y por unidad de variación de la carga hidráulica.
- **Niveles Iniciales-** Son aquellos puntos en los cuales se conoce el valor del potencial piezométrico se tiene una condición de borde conocida.

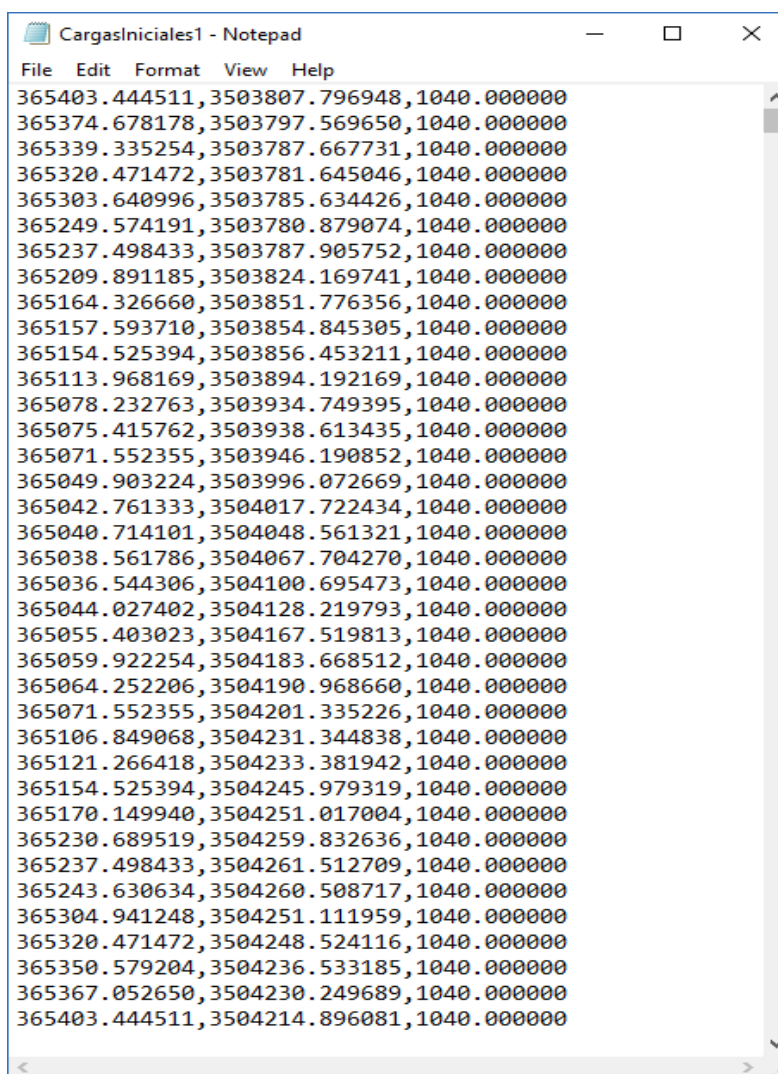
2.15 Condiciones iniciales

Son los valores iniciales de los parámetros para una simulación en estado estacionario. Las condiciones iniciales determinan un sesgo inicial que influye en el tiempo que lleva alcanzar la estabilidad, en los resultados y en las estimaciones calculadas. Este sesgo se puede anular realizando simulaciones durante un período de tiempo muy largo.

Estas cargas iniciales se generaron a partir de los datos piezométricos en el tiempo cero y utilizando el método de kriging para su interpolación a los centros de las celdas activas de la malla. Para este efecto, se utilizaron únicamente los datos de pozos representativos del acuífero principal, los cuales fueron identificados a partir del universo original de pozos de observación mediante el análisis de Presentatividad piezométrica, que es parte esencial del proceso de auditoría de los modelos.

Para obtener las curvas de elevación de toda el área de estudio se elaboró una tabla de Excel con el nombre del pozo ubicación geográfica para poder ubicarla dentro del modelo y las cotas de elevación del nivel estático, se procedió a cambiarle el formato a texto como se mira en la tabla 26.

Tabla 26 Base de datos con la de curvas de igual elevación de nivel estático



```
File Edit Format View Help
365403.444511,3503807.796948,1040.000000
365374.678178,3503797.569650,1040.000000
365339.335254,3503787.667731,1040.000000
365320.471472,3503781.645046,1040.000000
365303.640996,3503785.634426,1040.000000
365249.574191,3503780.879074,1040.000000
365237.498433,3503787.905752,1040.000000
365209.891185,3503824.169741,1040.000000
365164.326660,3503851.776356,1040.000000
365157.593710,3503854.845305,1040.000000
365154.525394,3503856.453211,1040.000000
365113.968169,3503894.192169,1040.000000
365078.232763,3503934.749395,1040.000000
365075.415762,3503938.613435,1040.000000
365071.552355,3503946.190852,1040.000000
365049.903224,3503996.072669,1040.000000
365042.761333,3504017.722434,1040.000000
365040.714101,3504048.561321,1040.000000
365038.561786,3504067.704270,1040.000000
365036.544306,3504100.695473,1040.000000
365044.027402,3504128.219793,1040.000000
365055.403023,3504167.519813,1040.000000
365059.922254,3504183.668512,1040.000000
365064.252206,3504190.968660,1040.000000
365071.552355,3504201.335226,1040.000000
365106.849068,3504231.344838,1040.000000
365121.266418,3504233.381942,1040.000000
365154.525394,3504245.979319,1040.000000
365170.149940,3504251.017004,1040.000000
365230.689519,3504259.832636,1040.000000
365237.498433,3504261.512709,1040.000000
365243.630634,3504260.508717,1040.000000
365304.941248,3504251.111959,1040.000000
365320.471472,3504248.524116,1040.000000
365350.579204,3504236.533185,1040.000000
365367.052650,3504230.249689,1040.000000
365403.444511,3504214.896081,1040.000000
```

2.16 Condiciones de Borde

Una modelación numérica de flujo necesita datos iniciales del sistema y datos de funcionamiento de este. La simulación del estado estacionario del sistema acuífero, si es posible, reviste mucha importancia. Los pasos que permiten, reproducir el funcionamiento transitorio son indispensables para encarar modelos de gestión exitosos. Se debe contar con una serie prolongada y confiable de mediciones de los cabezales hidráulicos.

Se definió una red de monitoreo de niveles piezométricos previamente con este propósito. Los pozos seleccionados reproducen fielmente el comportamiento real del sistema, que se pretende simular.

Una serie completa de medidas se efectuó en un breve lapso para que responda a una “fotografía” representativa de la situación. El mapa inicial de superficies piezométricas (sistema inalterado) de cada capa es la base que reproducir en la simulación en estado estacionario, a continuación, vemos la base de datos de niveles piezométricos que actuaron como condiciones de borde iniciales del modelo en la tabla 27.

Tabla 27 Niveles piezométricos del área de estudio

No. de Pozo	Este X	Norte Y	Z (msnm)	Tiempo (días)	Elevación (msnm)
5	361817	3512064	1025.87	(1) - (2085)	1077.64
5-R	360341	3513563	1025.37	(1) - (2085)	1075.43
6	359740.4	3511645	1008.13	(1) - (2085)	1065.68
9-R	358652	3513071	1015.08	(1) - (2085)	1064.92
12	359850	3509936	1017.03	(1) - (2085)	1066.68
14	359616	3511498	1012.33	(1) - (2085)	1070.9
14-R	359616	3511498	1025.65	(1) - (2085)	1075.08
15-R	360121	3511631	1013.33	(1) - (2085)	1065.11
16-R	358797	3512198	1017.15	(1) - (2085)	1081.37
17-R	363148	3514330	1023.17	(1) - (2085)	1066.53
19-R	365742	3507954	1024.45	(1) - (2085)	1117.65
28	362430	3510373	1023.06	(1) - (2085)	1073.49
33	362193	3512992	1023.44	(1) - (2085)	1074.41
37	363499	3512340	1023.14	(1) - (2085)	1074.28
38	364090	3511062	1022.82	(1) - (2085)	1073.52
39	364090	3511062	1024.34	(1) - (2085)	1076.68
42-R	364616	3509804	1022.78	(1) - (2085)	1067.7
43	363472	3510405	1023.89	(1) - (2085)	1073.74
45	362499	3509306	1007.53	(1) - (2085)	1062.23
50-R	363691	3506543	1027.76	(1) - (2085)	1081.4
55-R	359406	3512969	1015.92	(1) - (2085)	1062.54
58 Y 58-R	362889	3513596	1023.61	(1) - (2085)	1074.67
61 Y 61-R	363361	3508802	1011.19	(1) - (2085)	1063.46
64	361310	3510027	1003.74	(1) - (2085)	1059.07
66	362210	3508143	1005.83	(1) - (2085)	1058.35
68-R	365800	3509266	1023.19	(1) - (2085)	1075.65
70-R	362708	3505091	1011.35	(1) - (2085)	1064.9
73 Y 73-R	365256	3504139	1012.42	(1) - (2085)	1063.75
73-RR	365254	3504131	1057.94	(1) - (2085)	1044.25
74	363896	3508587	1021.26	(1) - (2085)	1065.7
75 Y 75-R	366892	3502285	1010.81	(1) - (2085)	1056.07
78 Y 78-R	365601	3501040	1028.18	(1) - (2085)	1076.22
80-B	365834	3504499	1014.61	(1) - (2085)	1065.6
88	363493	3505086	1006.95	(1) - (2085)	1068.41

No. de Pozo	Este X	Norte Y	Z (msnm)	Tiempo (días)	Elevación (msnm)
91	360217	3505656	1010.62	(1) - (2085)	1061.22
97 Y97-R	362003.4	3501818	1011.53	(1) - (2085)	1073.451
99-R	363151	3503174	1008.29	(1) - (2085)	1062.79
116	368511	3504839	1034.65	(1) - (2085)	1088.51
131	366589	3507167	1026.51	(1) - (2085)	1079.44
139	367674	3504128	1015.18	(1) - (2085)	1063.61
142	360762.5	3503334	1017.16	(1) - (2085)	1061.89
144	367541	3501702	1022.07	(1) - (2085)	1070.17
146	364384	3506304	1007.68	(1) - (2085)	1057.59
168	363916	3499281	1018.59	(1) - (2085)	1073.45
196	365648.9	3497007	1023.57	(1) - (2085)	1079.429
200	365839.9	3498472	1018.59	(1) - (2085)	1073.785
220	370088.9	3503750	1041.38	(1) - (2085)	1093.99
221	361223.9	3498774	1025.9	(1) - (2085)	1081.112
238	371090.9	3494760	1034.58	(1) - (2085)	1088.084
PGI-39	376048	3498872	957.93	(1) - (2085)	1012.11
4-R	360870	3512553	1069.5	(1) - (2085)	1083.9
7-R	362754	3511729	1025.45	(1) - (2085)	1082.51
10-R	361405	3513175	1034.4	(1) - (2085)	1082.03
11-R	364157	3514032	1024.22	(1) - (2085)	1077.08
49-R	361386	3508730	1005.03	(1) - (2085)	1054.86
67-R	366206	3512085	1033.38	(1) - (2085)	1081.46
79-R	369764	3507578	1042.66	(1) - (2085)	1094.637
104-R	365062	3502468	994.28	(1) - (2085)	1062.21
161	362028	3498273	1020.03	(1) - (2085)	1076.92
180	372764.8	3498766	1043.99	(1) - (2085)	1090.791
203	368934.5	3498750	1020.57	(1) - (2085)	1086.507
213	370720.8	3495637	1034.85	(1) - (2085)	1090.25
218	365313	3495343	1033.32	(1) - (2085)	1087.703
223	373632	3498785	1042.35	(1) - (2085)	1093.29
224	375450	3499935	1044.18	(1) - (2085)	1096.65
3-Z	372976	3503755	1057.04	(1) - (2085)	1105.01
4-Z	371350.3	3501862	1035.7	(1) - (2085)	1088.06
13-RR	358880	3510324	1014.85	(1) - (2085)	1062.06
42	364363	3510149	1021.23	(1) - (2085)	1073.65
44	360924	3509436	1038	(1) - (2085)	1089.71
126 Y 126-R	364463	3512751	1028.98	(1) - (2085)	1081.1

Posteriormente esta tabla de Excel se convirtió a formato de texto para importarla al modelo de Visual Modflow.

2.17 Condiciones de Frontera

- **Frontera de no-flujo:** Esta representado por la divisoria topográfica del río Bravo al oriente y la Sierra de Juárez al poniente de la zona de estudio.
- **Frontera Carga constante:** se consideró carga constante, por no contar con lagos o lagunas considerables

- **Frontera Drenes:** La condición de drenes no ha sido asignada a todos los tributarios por encontrarse sin agua y/o encausados en concreto.
- **Frontera de río:** Se asignó como frontera por su condición de río por mantener agua durante todo el año en su cuota más mínima la conductancia es la resistencia que tiene el agua para fluir entre el lecho del río y el nivel del agua subterránea.

La expresión matemática para el cálculo de la conductancia es,

$$C = KLW/M \quad (22)$$

Donde:

C – conductancia del lecho del río (m²/día)

K – conductividad del material del lecho del río (m/d)

L – longitud de la celda del río con las mismas características (m)

W – ancho de la celda del río con las mismas características (m)

M – Espesor del lecho del río (m)

2.18 Modelo Conceptual

El modelo conceptual describe el funcionamiento y características del sistema hidrogeológico, es la caracterización completa del acuífero. La conceptualización del sistema de flujo permite explicar en términos generales el comportamiento del acuífero el cual está sujeto a una serie de acciones naturales y artificiales. Para esto se identifican los principales componentes del sistema como son la geología, hidrología, hidrogeología, recargas y descargas, además establece las relaciones existentes entre ellos, para posteriormente cuantificarlos e ingresarlos al modelo numérico.

2.19 Calibración y Verificación

En este paso del modelaje matemático se reprodujeron las condiciones naturales de flujo y carga hidráulica. Se efectuó mediante la asignación de valores de parámetros hidráulicos dentro de un rango permisible, que satisfagan las condiciones observadas en el campo. Esto es posible también usando parámetros automatizados. En el presente estudio se trabajó mediante prueba y error, con los rangos de datos obtenidos durante el procesamiento de la información, con datos existentes, y en algunos casos con datos teóricos. La calibración del modelo está influenciada por la incertidumbre propia de la inexactitud de los parámetros. Aquí se utilizan los valores, máximos y mínimos de los valores hidráulicos, con el objetivo de determinar la afectación en la solución del modelo, trabajando con valores extremos; lo que puede realizarse con uno o la combinación de los parámetros.

2.19.1 Calibración del modelo matemático en régimen estacionario

En los estudios de agua subterránea, los modelos matemáticos para estimar direcciones y redes de flujos tienen que ser calibrados comparando las salidas y entradas de los niveles piezométricos calculados por el modelo con las condiciones de carga hidráulica observadas en campo (Foster *et al.*, 2002). Para lograr esta comparación entre niveles, en este estudio se varió gradualmente en orden de menor y mayor magnitud la conductividad hidráulica (K) y del coeficiente de almacenamiento (S), hasta el punto en que la configuración de salida generada por el modelo matemático se sobrepusiera ante la configuración de nivel estático medida en campo.

La condición obligada para validar el modelo de simulación de flujos en tres dimensiones (X, Y, Z) es mediante análisis estadístico, el cual establece la aprobación o rechazo del modelo matemático. En este sentido, no basta solo con la aproximación a cero “flujo” que se logre en el balance hidrogeológico, sino que se integra la interpretación que el especialista

haga al comparar las líneas equipotenciales observadas contra las calculadas por el modelo. Por ejemplo, Schwartz & Zhang (2003), consideran que el uso de la estadística es la forma más común de evaluar cuantitativamente la calibración de un modelo conceptual del medio físico interpretado matemáticamente.

La aprobación/comprobación de la calibración se puede lograr mediante la evaluación estadística de los siguientes métodos: el Error Residual de Calibración (ME o RM), el Error Medio Absoluto (MAE o ARM) y el Error de la Raíz Media Cuadrática (RMSE o RMS); sin embargo, éste último (RMSE) es el que mejor mide el error, (Rejani et al., 2007).

El error RMS (*Root Mean Squared*) es uno de los mejores estimadores del error en la modelación y se expresa como la raíz cuadrada de la media de las diferencias (entre los valores calculados y los valores observados) al cuadrado (Anderson & Woessner, 1992; King et al., 2003) y se define mediante la ecuación (20):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs_i})^2} \quad m \quad (23)$$

Donde:

X obs son los valores de carga hidráulica medidos en campo en metros

X calc son los valores de carga hidráulica simulados por el modelo en metros

n es el número total de datos observados (en la comparación).

No obstante, para otros autores (Waterloo Hydrogeologic, 1999; Fernández, 2004), y en particular para estudios de aguas subterráneas, el valor del RMS no tiene el mismo

significado si el cambio de nivel estático en el dominio del modelo es 10 o 100 m. Por lo que se emplea como complemento el RMS normalizado que es igual al valor del RMS dividido por la máxima diferencia de los niveles o valores observados en campo y se define mediante la ecuación (21):

$$\textit{Normalised RMS} = \frac{RMS}{(X_{calc})_{max} - (X_{obs})_{min}} \quad \% \quad (24)$$

Una manera útil de presentar los resultados de la calibración transitoria es mediante una regresión lineal, (Anderson & Woessner, 1992).

Woessner & Anderson (1990) mencionan que el criterio para tener un valor aceptable en la calibración es obteniendo un RMS bajo (Ruvalcaba, 2009). Mientras la Texas Water Development Board - Groundwater Availability Modeling (TWDB-GAM) un organismo estatal de los Estados Unidos de Norteamérica, estiman que un error (RMS) asociado con las cargas hidráulicas razonablemente bueno es del orden de 1 a 4 metros (TWDB-GAM, 2004).

2.20 Análisis de Sensibilidad

Como ya se mencionó, aun cuando el conjunto de parámetros del modelo produzca un buen ajuste de calibración y haya superado alguna prueba de desempeño, el modelo puede no reflejar con precisión el comportamiento del sistema para las predicciones de interés cuando se incorporan nuevos esfuerzos hidrológicos.

En consecuencia, es necesario interpretar conjuntamente la sensibilidad en calibración y la sensibilidad en predicción, así como la correlación (no unicidad) entre los parámetros, para discernir el efecto de la incertidumbre de los parámetros del modelo en las predicciones o en

las conclusiones que se deriven del mismo. Para esto se definen cuatro tipos de sensibilidad (ASTM, 2002)

Tipo I. Cuando la variación de un parámetro produce cambios insignificantes tanto en los residuales de calibración como en las predicciones del modelo. Este tipo de sensibilidad no es de preocupar porque independientemente del valor del parámetro las conclusiones son las mismas.

Tipo II. Cuando la variación en un parámetro ocasiona cambios significativos en los residuales de calibración, pero cambios insignificantes en las predicciones. Este tipo de sensibilidad tampoco es de preocupar porque las conclusiones son las mismas.

Tipo III. Cuando la variación de un parámetro causa cambios significativos tanto en los residuales de calibración como en las predicciones del modelo. Tampoco este tipo de sensibilidad es de preocupar, porque aun cuando las predicciones cambian como resultado de la variación del parámetro, al variar éste el modelo se descalibra.

Tipo IV. Cuando al variar el valor del parámetro cambian las predicciones del modelo, pero los cambios en los residuales de calibración son insignificantes. Este tipo de sensibilidad puede invalidar los resultados del modelo, porque dentro del ámbito de valores en que el parámetro puede variar sin descalibrar al modelo, las predicciones de interés cambian.

En el diagrama adjunto se clasifica la necesidad de mejorar la estimación de un parámetro y la representación de sus características asociadas del sistema desde la perspectiva de las predicciones (Hill, 1998). Esta clasificación se basa en estadísticos que indican la importancia de los parámetros del modelo para las predicciones de interés y (A) la precisión de estimación de los parámetros, o (B) la unicidad con la cual los parámetros se estiman en

la regresión. Conviene anotar que los códigos inversores PEST y UCODE utilizan la regresión no lineal como criterio de estimación. (Chávez et al, 2006)

2.21 Predicción

Una vez que el modelo ha sido calibrado se puede utilizar entonces para la predicción. El paradigma actual en la modelación aplicada enfatiza la importancia de cuantificar la incertidumbre de predicción. Wagener et al., (2001) propusieron un marco de referencia que orienta en la búsqueda del punto de equilibrio entre el nivel de complejidad sustentable por los datos de campo y el desempeño del modelo en una aplicación específica, este procedimiento permite alcanzar el nivel apropiado de complejidad del modelo en función de los datos disponibles, de las características del sistema hidrológico y del propósito del modelo.

En cuanto a la Instrumentación práctica de los nuevos enfoques de modelación, destaca el código PEST (Doherty,1994), que originalmente sólo trabajaba como código inversor (calibración automatizada), pero que en sus nuevas versiones incluye el análisis no-lineal de incertidumbre en predicción mediante el método de punto crítico, la instrumentación de técnicas de regularización que mejoran la estabilidad numérica de la solución inversa, el acomodamiento de la heterogeneidad geológica mediante métodos avanzados de parametrización espacial (puntos piloto) y, además, en combinación con la generación de campos aleatorios, este código permite explorar la incertidumbre de los parámetros del modelo en sistemas heterogéneos (Chávez et al., 2006).

Los métodos de cuantificación de la incertidumbre en predicción que manejan PEST y UCODE, son aplicables a un modelo conceptual reflejado en un modelo numérico. Pero según Neuman (2003), los análisis de incertidumbre basados en un solo concepto

hidrogeológico son proclives al sesgo estadístico (error que se comete al confiar en un modelo inapropiado) y a la subestimación de la incertidumbre (consistente en rechazar un modelo apropiado en razón de un déficit en el muestreo del espacio relevante); y agregó que el sesgo y la incertidumbre que se derivan de depositar nuestra confianza en un modelo conceptual-matemático erróneo, son de ordinario mayores que los ocasionados por una elección inadecuada de los valores de los parámetros del modelo.

La simulación de predicción se realiza para la previa evaluación del error y análisis de sensibilidad del modelo calibrado, para poder predecir la futura reacción del acuífero ante ciertas condiciones impuestas al mismo, basado en los anterior no se utilizó el código PEST.

2.21.1 Escenarios de explotación

Los impactos generados por una real o hipotética gestión integrada del agua en el caso de estudio pueden ocasionarse debido al intento de alcanzar un equilibrio entre los intereses sociodemográficos, socioeconómicos, ambientales y/o hidrológicos. Estos efectos son evaluados y comparados con el año hidrológico de referencia 2008/2014, que es utilizado como escenario actual.

El modelo de simulación de escenarios que se expone en este proyecto representa el comportamiento subterráneo del sistema acuífero Valle de Juárez. El modelo opera en estado transitorio abarcando un periodo de simulación de 6 años comprendido de 2008 a 2014, La propuesta de escenarios a simular está en función del bombeo de extracción proyectándose hasta el año de 2030, tomando en consideración el aumento proyectado de población por CONAPO, además de considerar algunas situaciones adversas para el recurso subterráneo,

así como beneficios que trae consigo el generar una condición de estabilidad. Tres son los escenarios de simulación obedeciendo a diversas situaciones:

2.21.2 Escenario 1 (Estabilidad)

Este escenario plantea continuar con el actual ritmo de extracción del recurso subterráneo (hasta el 2030). Para ello, no se deberá de ejercer ninguna modificación sobre los componentes hidrológicos, manteniendo el bombeo del año 2014 en forma constante hasta el 2030, lo anterior implica que no existe la posibilidad de perforación e incorporación de nuevos pozos de extracción al modelo calibrado, la recarga se mantiene constante y es la misma que se utilizó durante la calibración del modelo. Esto con el fin de estimar y observar el comportamiento de los niveles piezométricos y la dirección del flujo del agua subterránea en nuestra área de estudio. Este escenario simula una condición de estabilidad y es favorable para la región.

2.21.3 Escenario 2 (Variación de bombeo)

En este escenario se proyectó el volumen de extracción hasta el año de 2030, para ello se estimó el aumento de población de los años 2014-2018 donde hay una variación de población de 49,161 habitantes con un aumento en el extracción de agua potable de 13273.47 (m³/d), del periodo 2018-2022 hay una variación de población de 50,251 habitantes con un aumento en el extracción de agua potable 13,567.77 (m³/d), del periodo 2022-2026 hay una variación de población de 49,700 habitantes con un aumento en el extracción de agua potable 13,419.00 (m³/d) y por ultimo del periodo 2026-2030 hay una variación de población de 45,723 habitantes con un aumento en el extracción de agua potable 12,345.00 (m³/d), estos incremento se darán en los 53 pozos que se encuentran dentro de la área de influencia de la zona de crecimiento futuro de la ciudad, proyectada por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) en la tabla 28 se observa los pozos que se le aumentaran

sus bombos para abastecer y dar servicio y cubrir la demanda por el incremento de población suponiendo una dotación de 270 l/hab/día determinado por la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento de Ciudad Juárez en la actualización del plan maestro para el mejoramiento de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en Juárez chihuahua 2013. De nueva cuenta ningún esfuerzo hidrogeológico será modificado a excepción del incremento en el bombeo. Este escenario simula un ambiente desfavorable en la región.

Tabla 28 Incremento de bombeo 2014-2030

No de pozo	Elevación del Brocal (msnm)	Este X	Norte Y	Q (m³/d) 2008	Q (m³/d) 2014	Q (m³/d) 2018	Q (m³/d) 2022	Q (m³/d) 2026	Q (m³/d) 2030
1-RR	1126.71	365019	3513831	5011.2	3888	4138.44	4394.44	4647.63	4880.56
4-R	1136	360870	3512553	3888	3253.82	3504.26	3760.26	4013.45	4246.38
5	1128.67	361817	3512064	5184	4752	5002.44	5258.44	5511.63	5744.56
6	1160.93	359740.4	3511645	4607.71	2678.4	2928.84	3184.84	3438.03	3670.96
9-R	1132.95	358652	3513071	2592	4032.29	4282.73	4538.73	4791.92	5024.85
11-R	1126.88	364157	3514032	3888	3748.03	3998.47	4254.47	4507.66	4740.59
12	1148.18	359850	3509936	3888	2400.19	2650.63	2906.63	3159.82	3392.75
13-RR	1166.5	358880	3510324	3888	3888	4138.44	4394.44	4647.63	4880.56
14-R	1144	359616	3511498	3888	3888	4138.44	4394.44	4647.63	4880.56
15-R	1129.31	360121	3511631	3311.71	2937.6	3504.26	3444.04	3697.23	3930.16
16-R	1141.95	358797	3512198	3024	3801.6	4052.04	4308.04	4561.23	4794.16
19-R	1123	365742	3507954	5327.42	3185.57	3436.01	3692.01	3945.2	4178.13
28	1128.48	362430	3510373	2879.71	2297.38	2547.82	2803.82	3057.01	3289.94
37	1126.64	363499	3512340	4607.71	4320	4570.44	4826.44	5079.63	5312.56
42-R	1125.59	364616	3509804	3715.2	3531.17	3781.61	4037.61	4290.8	4523.73
45	1127.48	362499	3509306	3311.71	2725.06	2975.5	3231.5	3484.69	3717.62
46-R	1177.76	364037	3503426	3888	4064.26	4314.7	4570.7	4823.89	5056.82
48	1122.16	367280	3508712	5184	1542.24	1792.68	2048.68	2301.87	2534.8
53 Y 53-R	1140.75	358273	3512524	4607.71	4406.4	4656.84	4912.84	5166.03	5398.96
64	1129.1	361310	3510027	2879.71	3988.22	4238.66	4494.66	4747.85	4980.78
66	1140.98	362210	3508143	1296	2160	2410.44	2666.44	2919.63	3152.56
70-R	1170.5	362708	3505091	3024	3024	3274.44	3530.44	3783.63	4016.56
71 Y 71-R	1127.11	364934	3511509	4895.42	4271.62	4522.06	4778.06	5031.25	5264.18
77	1136	363257	3507683	4752	2246.4	2496.84	2752.84	3006.03	3238.96
87	1170.3	362690	3505849	5039.71	5079.46	5329.9	5585.9	5839.09	6072.02
95	1177.64	362530	3503483	3311.71	4318.27	4568.71	4824.71	5077.9	5310.83
96	1177.39	362297	3502335	4147.2	3600.29	3850.73	4106.73	4359.92	4592.85
97 Y97-R	1190.44	362003.38	3501817.9	2303.42	3561.41	3811.85	4067.85	4321.04	4553.97
99-R	1179.14	363151	3503174	3456	2608.42	2858.86	3114.86	3368.05	3600.98
0 0 vH	1160.29	364489	3504224	4895.42	3944.16	4194.6	4450.6	4703.79	4936.72
113	1126.8	366247	3505551	3599.42	3697.92	3948.36	4204.36	4457.55	4690.48
114	1122.12	366972	3505500	4175.71	4732.99	4983.43	5239.43	5492.62	5725.55
9 1 vH	1126.15	363987	3509138	3888	4505.76	4756.2	5012.2	5265.39	5498.32
120	1122.69	367236	3507510	5039.71	4339.01	4589.45	4845.45	5098.64	5331.57
122	1123.72	366073	3508321	3599.42	3572.64	3823.08	4079.08	4332.27	4565.2
123-R	1124.75	365281	3508773	3888	4431.46	4681.9	4937.9	5191.09	5424.02
124	1122.22	367055	3508188	4895.42	4345.92	4596.36	4852.36	5105.55	5338.48
128	1123.86	365299	3506319	3743.71	2592	2842.44	3098.44	3351.63	3584.56
129	1121.35	368526	3506797	4428.86	3705.7	3956.14	4212.14	4465.33	4698.26
132	1122.02	366662	3506178	4607.71	4743.36	4993.8	5249.8	5502.99	5735.92
139	1133.82	367674	3504128	4031.42	2947.97	3198.41	3454.41	3707.6	3940.53
143	1143.73	368137	3503651	3888	4281.12	4531.56	4787.56	5040.75	5273.68
147	1173.86	364860	3503288	4175.71	2160	2410.44	2666.44	2919.63	3152.56
149	1157.59	368030	3502320	3311.71	4366.66	4617.1	4873.1	5126.29	5359.22
152	1179.1	367859	3500931	2879.71	3160.51	3410.95	3666.95	3920.14	4153.07
6 5 vH	1161.24	368548.45	3501503.62	5184	3888	4138.44	4394.44	4647.63	4880.56
164	1121.95	367158	3506615	3888	5425.92	5676.36	5932.36	6185.55	6418.48

No de pozo	Elevación del Brocal (msnm)	Este X	Norte Y	Q (m ³ /d) 2008	Q (m ³ /d) 2014	Q (m ³ /d) 2018	Q (m ³ /d) 2022	Q (m ³ /d) 2026	Q (m ³ /d) 2030
165	1122.07	366944	3504967	3888	4334.69	4585.13	4841.13	5094.32	5327.25
6 6 vH	1187.43	363238	3502599	3888	3888	4138.44	4394.44	4647.63	4880.56
188	1184.81	367785.75	3499743.97	3888	4617.22	4867.66	5123.66	5376.85	5609.78
212	1130	364557	3506932	3888	3824.93	4075.37	4331.37	4584.56	4817.49
221	1207.48	361223.89	3498774.49	3888	3888	4138.44	4394.44	4647.63	4880.56

2.21.4 Escenario 3 (Batería de pozos)

Este escenario contempla el de proponer una batería de 20 pozos fuera de la mancha urbana con un caudal de extracción de 1 (m³/s) esta batería de pozos empezara operaciones hipotéticamente el 15 de Julio del 2018 similar a la de Conejos Médanos en el nor-poniente de la ciudad, para cubrir la demanda de agua potable de la población futura del 2018/2030, con un incremento de población de 145,674 habitantes, con un consumo estimado de 39331.77 (m³/d) el resto del agua bombeada servirá para disminuir progresivamente el bombeo de los pozos con problemas de abatimientos. En el modelo se mantienen los pozos activos que se usaron durante la calibración, esto el fin de generar y comparar la dirección del flujo del agua subterránea con el escenario actual de explotación y el de los escenarios 1 y 2 observando con mayor interés lo que suceda en la distribución futura tanto de población como del crecimiento urbano. De nueva cuenta ningún esfuerzo hidrogeológico será modificado a excepción de la función WEL. Este escenario simula un ambiente favorable en la región. A continuación, se muestra en la tabla 29 las características, así como el bombeo propuesto de la batería de pozos, en la figura 55 se muestra el plano de ubicación de los pozos de nueva creación para este escenario.

Tabla 29 Ubicación y características de la nueva batería de pozos

No de Pozo	Elevación del brocal (msnm)	Este X	Norte Y	Tramo Ranurado		Tiempo (días)	Q (m ³ /d)
				top (msnm)	Base (msnm)		
500	1198	372152.214	3487406.2	1118	798	4383	4320
501	1200	373249.411	3487909.43	1120	800	4383	4320
502	1197	374134.776	3488325.46	1117	797	4383	4320
503	1192	374975.202	3488764.55	1112	792	4383	4320
504	1196	375505.261	3487792.34	1116	796	4383	4320
505	1200	374641.4	3487286.06	1120	800	4383	4320
506	1200	373777.998	3486824.74	1120	800	4383	4320
507	1200	372688.241	3486321.31	1120	800	4383	4320
508	1202	373040.092	3485553.14	1122	802	4383	4320
509	1200	374061.646	3486012.54	1120	800	4383	4320
510	1201	374993.357	3486518.03	1121	801	4383	4320
511	1200	375926.045	3487113.42	1120	800	4383	4320
512	1191	376812.689	3487642.01	1111	791	4383	4320
513	1188	376324.967	3488389.04	1108	788	4383	4320
514	1187	375612.458	3489206.11	1107	787	4383	4320
515	1191	374490.97	3489543.11	1111	791	4383	4320
516	1193	373759.366	3489137.92	1113	793	4383	4320
517	1195	372803.515	3488730.18	1115	795	4383	4320
518	1195	371785.45	3488174.46	1115	795	4383	4320
519	1184	375362.444	3489953.01	1104	784	4383	4320

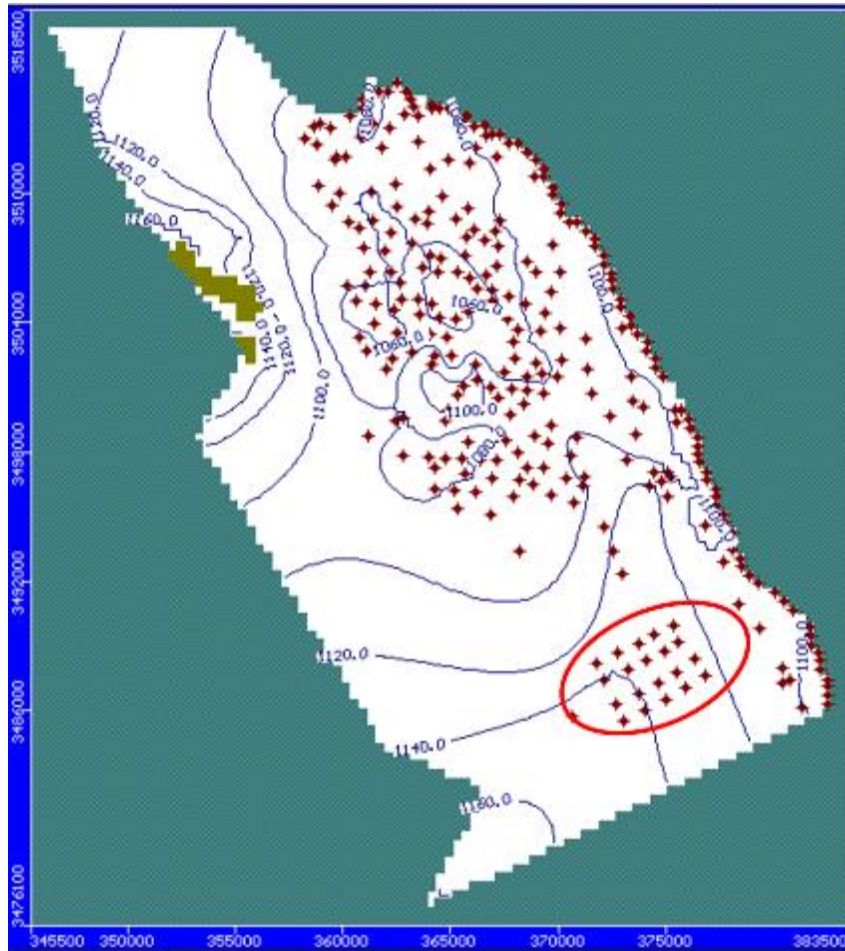


Figura 55 Ubicación de la batería pozos de extracción que se incluyen al modelo matemático del acuífero para simular el escenario de explotación 3

2.22 Modelación del Acuífero Con Visual Modflow

La figura 56 ilustra el proceso de ruta de modelación con Visual ModFlow. Un modelo numérico es el reflejo del modelo conceptual, y su parecido a la realidad está acotado por la medida en que el modelo conceptual esté más o menos cercano a la misma.

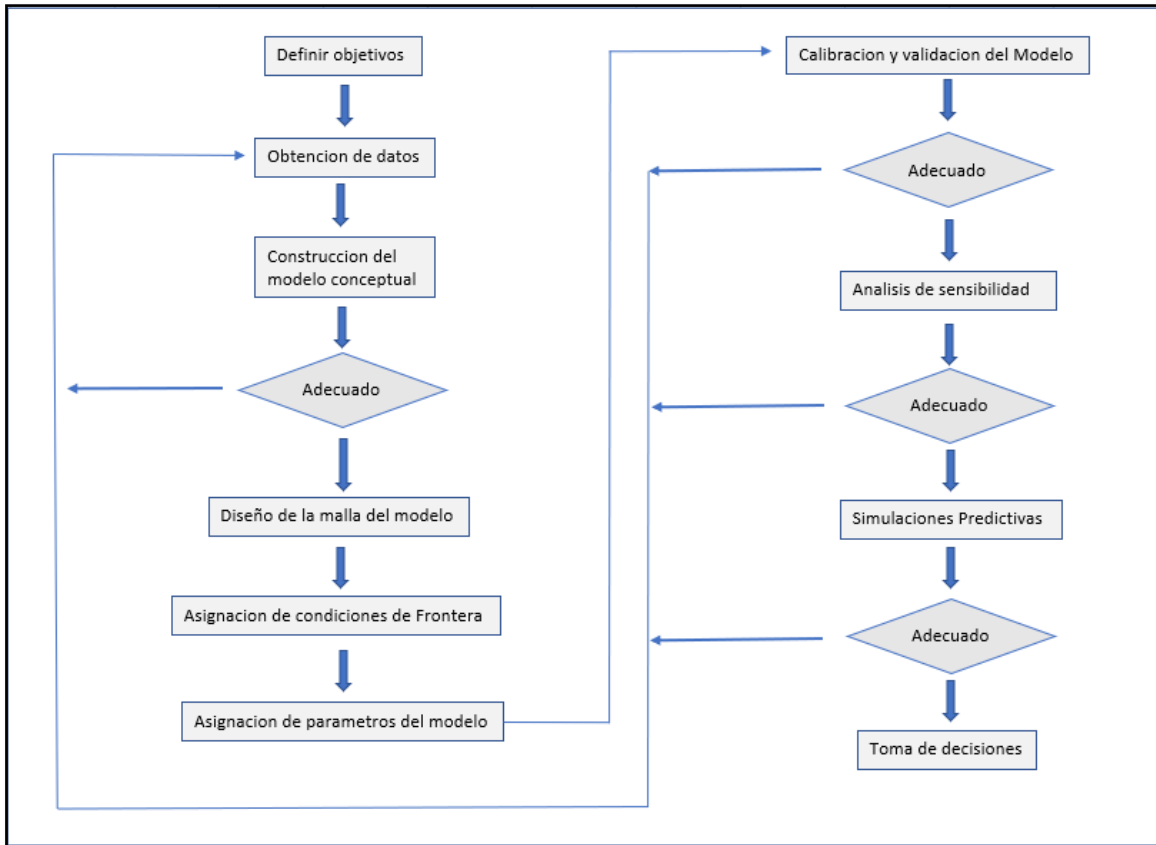


Figura 56 Diagrama del proceso de modelación

Los modelos tienen principalmente dos objetivos: representar la realidad y basado en esa representación, simular situaciones futuras. El diagrama mostrado en la figura 30 se explica a continuación:

Información. Registro sistemático de niveles estáticos, bombeos, volúmenes, horas de funcionamiento, etc.

Modelación. El modelo contempla conocer la geometría del acuífero (Geología, Geofísica), condiciones de frontera, y especialmente las recargas.

Calibración. En este proceso se determinan los parámetros del acuífero que reproducen los niveles de estáticos registrados.

Validación. Con los parámetros determinados en el proceso anterior, se simula el comportamiento de los niveles estáticos, confrontándola con los niveles reservados durante la calibración; en caso de reproducirse satisfactoriamente los niveles, se acepta el modelo, de no ser así, se vuelve a la etapa de calibración y se repite el proceso.

Simulación. En esta etapa, y con escenarios futuros posibles, se simula el comportamiento del acuífero, para disponer de antecedentes para gestionar de manera eficiente los recursos subterráneos.

3 RESULTADOS

3.1 Dirección de Flujo 1980-2014

A continuación, se presentan una serie de Mapas de líneas de flujo que se generaron para los años 1980, 1990 y 2014 para la elaboración de estos mapas se utilizaron las interpolaciones con dos métodos diferentes, el método de Kriging y el Idw. Con el programa Arc Gis 10.2

Siguiendo la metodología se interpola con el método IDW y generamos el siguiente mapa para el año 1980 con 73 pozos utilizados, obteniendo el mapa de la figura 57.

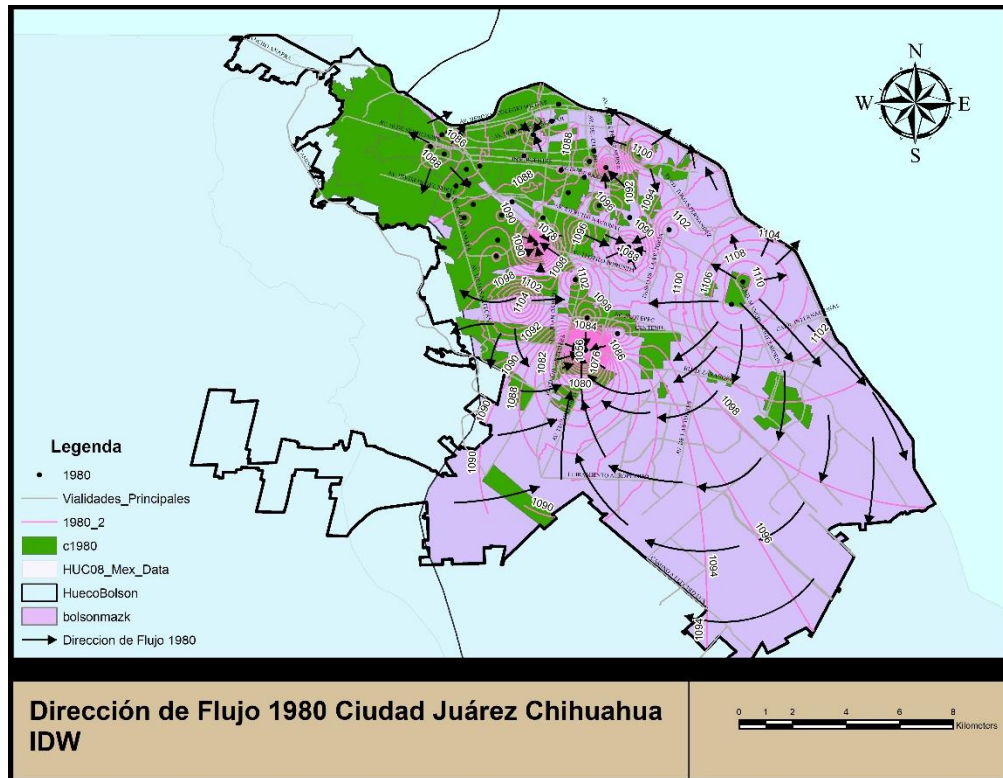


Figura 57 Dirección de flujo 1980 IDW Ciudad Juárez Chihuahua

En el mapa de la figura 57 se aprecian grandes zonas de depresión del nivel estático, cercanas al aeropuerto este abatimiento se centra nuevamente sobre el pozo 46 pero ahora con una profundidad de 72.2 m su abatimiento fue de 2 metro en 5 años, el promedio de nivel estático que es de 27.38m, pero a diferencia de años anteriores se aprecian más pozos cercanos con conos de abatimientos pronunciados por lo cual el movimiento del flujo de agua sigue esa dirección,

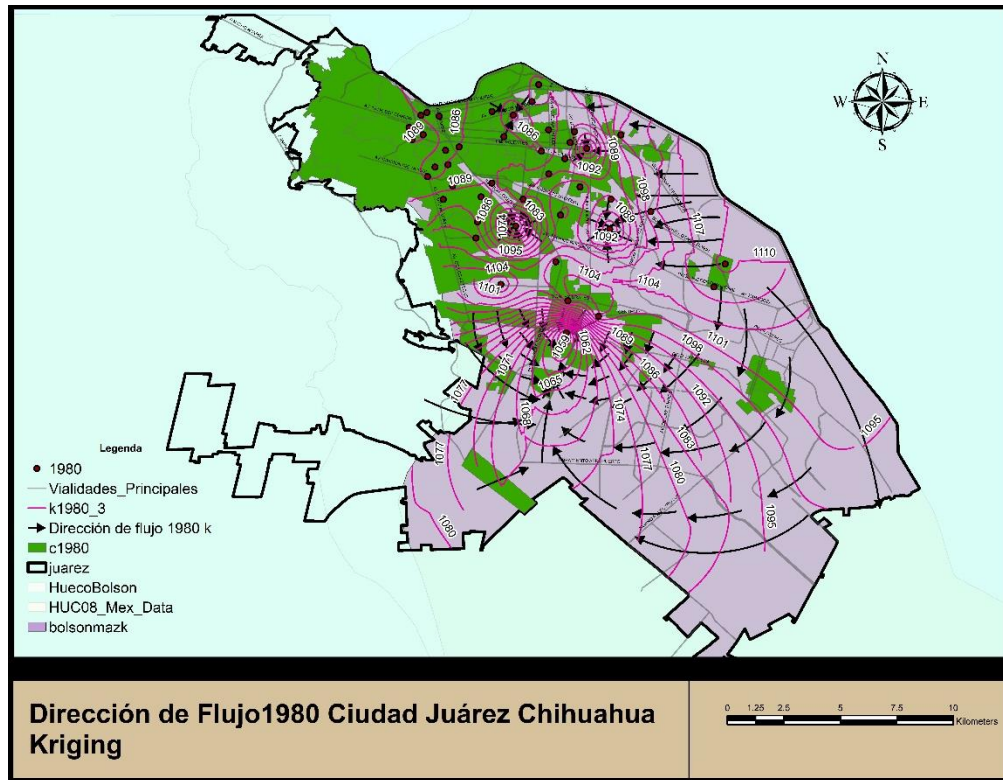


Figura 58 Dirección de Flujo 1980 Kriging Ciudad Juárez Chihuahua

Con el método de interpolación de Kriging las curvas se suavizan un poco por la diferencia de interpolación, pero las direcciones de flujo son prácticamente iguales que los del método IDW por lo que no influye el método de interpolación que se empleó. Como lo vemos en la figura 58.

Siguiendo la misma metodología se interpola con el método IDW y se genera el siguiente mapa para el año 1990 con 65 pozos utilizados, como lo vemos en mapa de la figura 59.

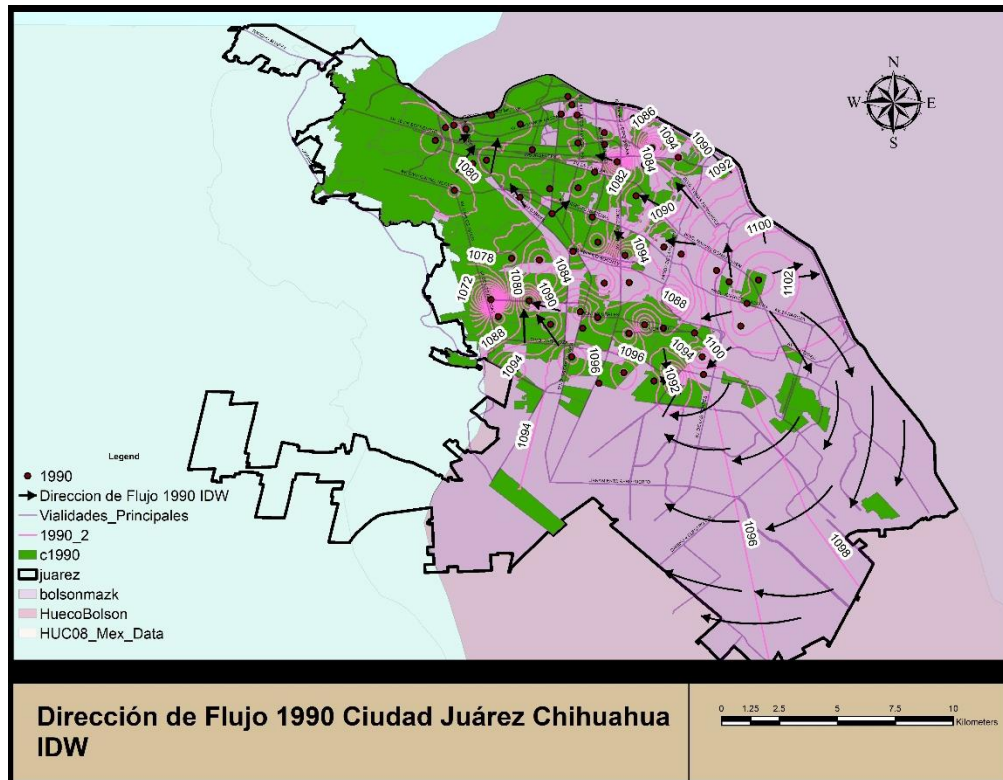


Figura 59 Dirección de Flujo 1990 IDW Ciudad Juárez Chihuahua.

En el mapa se aprecian grandes zonas de abatimiento como en los años anteriores pero con la diferencia de que esas zonas están más en el área central y los grandes abatimientos que se observaban se acentúan en este año de 1990 los pozos circundantes donde estaba el pozo 46 tienen grandes abatimientos debido a la gran extracción que se presenta en ese año los niveles estáticos presentan una profundidad de hasta 122m por lo que la dirección de flujo nuevamente vuelve a dirigirse hacia esa zona del aeropuerto aunado a que se perforaron nuevos pozos de remplazo y otros nuevos para dar abasto a la población que cada año van en aumento.

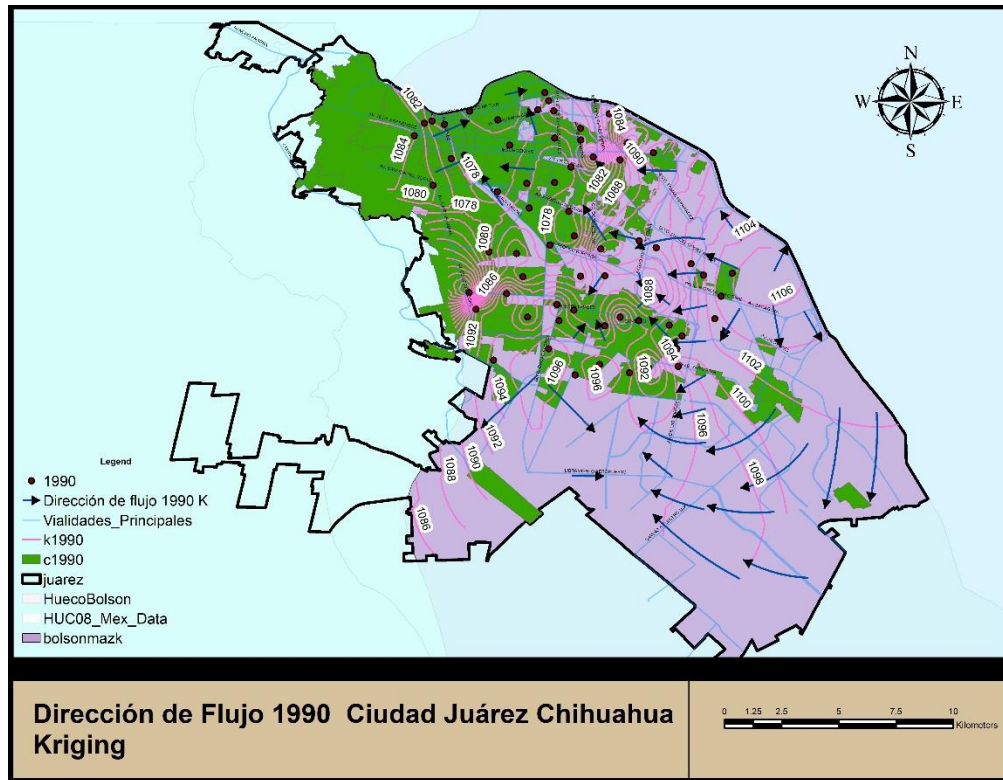


Figura 60 Dirección de Flujo 1990 Kriging Ciudad Juárez Chihuahua.

Con el método de interpolación de Kriging no ha gran diferencia en las curvas son un poco más suaves, las direcciones de flujo son prácticamente iguales que los del método IDW por lo que no influye el método de interpolación que se empleó, como lo vemos en la figura 60.

Siguiendo la misma metodología se interpola con el método IDW y se genera el siguiente mapa para el año 2014 con 176 pozos utilizados, como lo vemos el mapa de la figura 61.

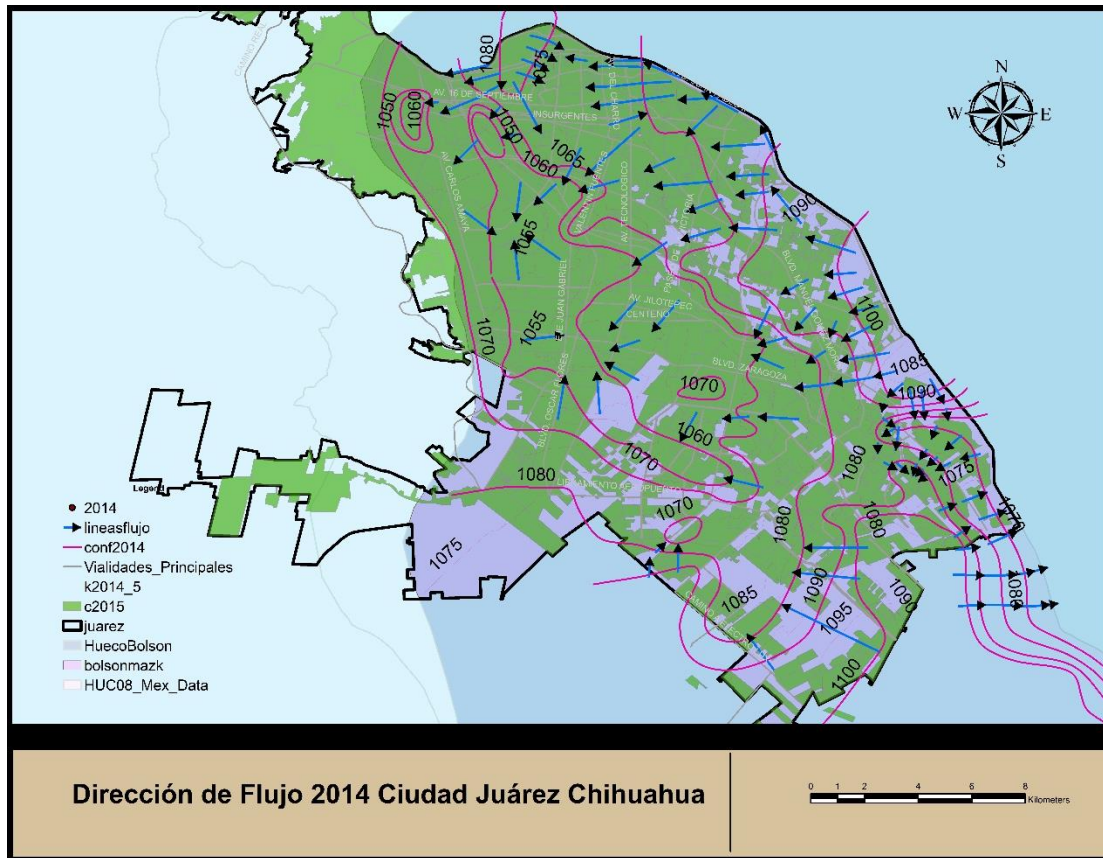


Figura 61 Dirección de Flujo 2014 Kriging Ciudad Juárez Chihuahua.

En la Figura 61, con datos más recientes de niveles estáticos, se aprecian grandes zonas de descensos de niveles del agua subterránea generalizados en casi toda

la ciudad. A diferencia de los años anteriores, en donde los abatimientos se apreciaban en el área cercana del aeropuerto, en este año en particular se aprecia que los pozos circundantes donde se localizaba el pozo 43 (Figura 58), se tienen todavía un gran abatimiento debido a la gran extracción que se presenta todavía en este año. Los 23 pozos de remplazo que había en 1990 pasaron a ser 55 en el 2014, por lo que los descensos continuaron presentándose en los mismos lugares ya señalados. Para este año se presentan abatimientos de hasta 149 m, y es por esta razón que la dirección de flujos de agua subterránea continúa generándose hacia la

mancha urbana de la ciudad, los que nos indica que el desarrollo urbano de la ciudad afecta sustancial- mente el movimiento del flujo de agua subterránea.

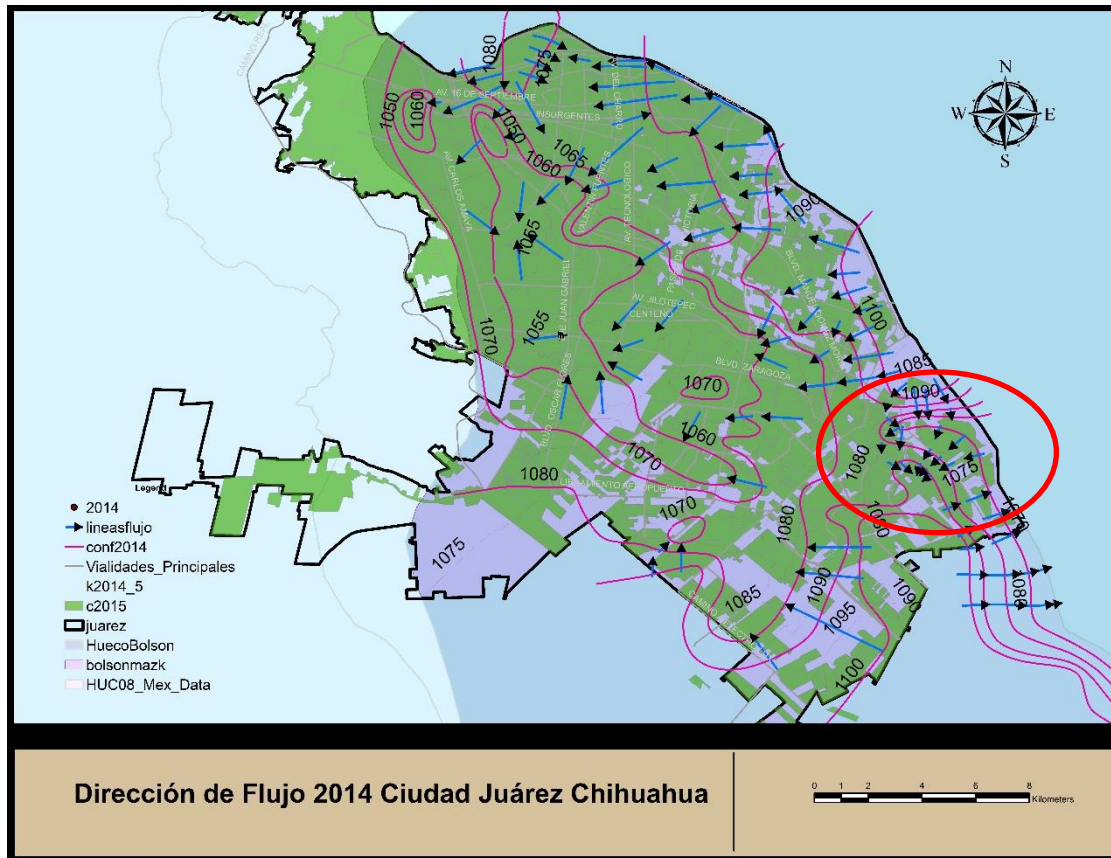


Figura 62 Cambio de dirección del flujo en zona de transición Ciudad Juárez Chihuahua.

Hay que resaltar que hay un cambio de dirección del flujo en una zona de transición, entre los flujos que entran y los que salen de la ciudad hacia la vecina ciudad de El Paso, Texas como lo vemos en la Figura 62 en el círculo rojo. En esta zona los flujos cambian de dirección, posiblemente esto se deba a que es una zona periurbana donde el exceso de riego y la poca demanda por parte de los agricultores mantienen los niveles estáticos estables, por lo que el agua fluye de manera natural a lo largo del río Bravo como una zona de recarga natural. Los flujos que entran a la ciudad es por el gran abatimiento que se tiene en el centro

de la ciudad que direccionan o ejercen influencia para direccionar los flujos hacia esa zona. En contraparte, los que salen se deben a que en el nivel estático está muy cerca de la superficie y los flujos tienden a ir a la parte topográficamente más baja, que es hacia la zona del río Bravo. Una probable solución al problema generalizado de abatimientos y cambios de dirección de flujos que presenta el acuífero sería el de construir una batería de pozos similar a la que se tiene en Conejos- Médanos, colocada al suroriente de la ciudad para liberar la presión que se tiene sobre todo en la zona central de la ciudad.

Esta actividad tuvo como propósito el de tener el mejor control de información acerca de las condiciones actuales de explotación del agua subterránea para ser incorporadas a la ecuación de balance. La estimación de volúmenes de extracción se aplicó a todo tipo de aprovechamiento activo.

A continuación, viene la etapa del procesamiento de datos e interpretación de la información antecedente y de campo, en esta etapa se elabora el modelo conceptual, en el que identifican las unidades hidroestratigráficas y las condiciones de fronteras. Los datos de campo son ensamblados, incluyendo información acerca del balance hídrico y los datos necesarios para asignar valores a los parámetros del acuífero y las acciones a que está siendo sometido.

3.2 Diseño del Modelo

Se consideró la primera opción, que es importar un plano del sector a modelar preexistente, por lo que utilizo celdas con una dimensión promedio de 400 x 400 [m], es decir con un área de 160000m². La Figura 59 representa la malla de modelación utilizada. Notar que el método de diferencias finitas no permite refinar las zonas más importantes del modelo, debiendo realizarse sobre toda la columna o fila de la malla. Lo anterior explica la construcción de una malla con una densidad alta de celdas en función de conseguir mejores resultados. La malla se definió en el programa AUTOCAD 2014 donde se dibujó una malla rectangular de 42400m x 38000m con cuadros de 400 x 400 [m], dando un total de 106 filas y 95 columnas con una coordenada Xmin=345500, Xmax=383500 y una Ymin=3476100, Ymax=3518500 importándose al modelo Visual Modflow. El espesor de la celda corresponde al espesor calculado de las capas del acuífero. La figura 63 muestra la distribución de la malla y dominio del modelo en superficie.

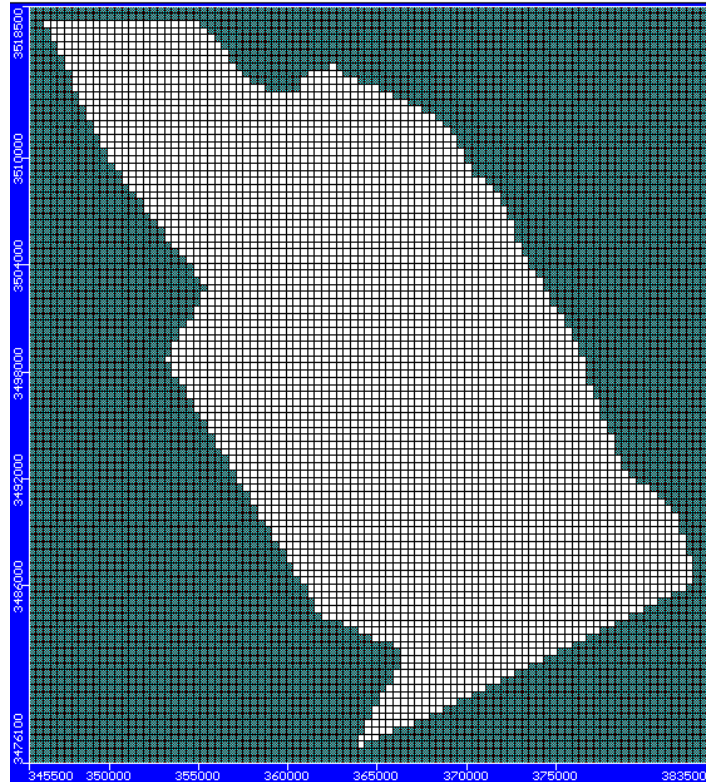


Figura 63 Definición de la malla para el modelo.

3.3 Propiedades Hidráulicas

Son tres los tipos de propiedades más importantes que se introducen, estas son:

- **Conductividad-**
- **Almacenamiento-**
- **Niveles Iniciales-**

3.3.1 Conductividad Hidráulica

De la interpretación por diversos métodos de las prueba de bombeo realizadas en el presente estudio y la información de pruebas realizadas con anterioridad, fue posible obtener una distribución de los parámetros hidráulicos que condicionan el comportamiento del sistema hidráulico subterráneo, la permeabilidad hidráulica obtenida con los valores de permeabilidad y espesor saturado del acuífero, tiene en la zona urbana valores medios de 7.4

m/día; en el resto del valle los valores fluctúan entre 0.12 y 9.64 m/día con un valor promedio de 3.17 m/día. En el valle de Bandejas, se tiene para la permeabilidad un valor medio de 9 m/día.

Se consideró el acuífero como anisótropo ($K_x \neq K_y \neq K_z$). La conductividad hidráulica se generó y se ingresó al modelo como un archivo de texto importado desde ModFlow. Durante este proceso se encontró que los datos se ajustaban mejor a una distribución normal, cuando se trabajó con veintiocho (28) zonas homogéneas de permeabilidad. Estas zonas, que constituyen la entrada de esta variable, se pueden ver en su distribución espacial en la Figura 64.

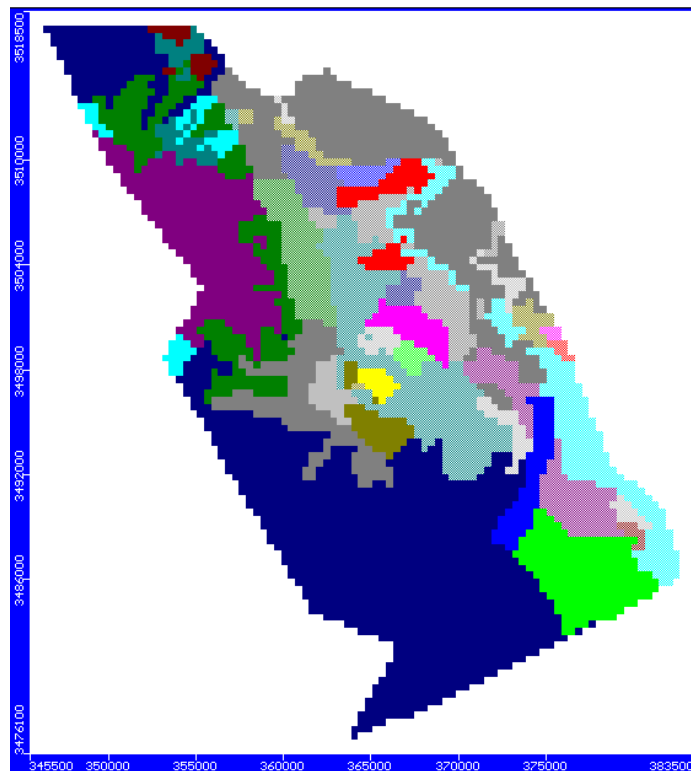


Figura 64 Distribución espacial de las 28 zonas que definen la conductividad hidráulica de entrada al modelo

y en la Tabla 30 se pueden observar los valores y rango de colores para cada una de las 28 zonas de distribución de conductividad dentro del área de estudio, los cuales se obtuvieron a partir de las pruebas de bombeo de estudios previos realizados por Conagua en el año 2008.

Tabla 30 Valores y rangos de colores de las 28 zonas de resistividad

Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Active	Distribution Array
1	8.64	8.64	0.864	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	0.02	2	0.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	0.001	3	0.0001	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	0.001	0.1	0.0001	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	1.98495	0.01	0.198495	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	0.001	0.1	0.0001	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	5.548773	2	0.5563992	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	2.477178	2	0.1846218	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	9.36233	2	2.662324	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	26.98031	2	0.009242657	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	27	2	0.08609363	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	0.001	2	0.0001	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	27.43474	0.1	0.8068878	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	12.53799	0.1	0.0186501	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	12.90416	0.1	0.3284426	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	0.2002272	0.1	0.0960615	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	9.168484	2	0.00283587	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	0.7453598	2	0.3407977	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	0.1044863	2	0.09209368	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	0.4682079	0.2	0.009508263	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	0.06995108	0.2	0.04794283	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	0.1026972	0.2	0.03234831	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	3.218004	2	0.06867603	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	3.328122	2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	0.0650417	0.2	0.07812306	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	0.06144961	2	0.02146471	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	5.436941	2	1.391959	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	27	2	0.1620278	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Hydraulic conductivity in X-direction Value = 8.64

3.3.2 Almacenamiento específico

Por lo que respecta al coeficiente de almacenamiento S y rendimiento específico S_y , se tienen para la zona urbana valores medios de $4.43E-04$ de coeficiente y para el resto del valle el valor promedio del coeficiente de almacenamiento es de $6.28E-04$ y para el rendimiento específico es de 0.15 . por lo que respecta a los valores promedios de coeficiente de almacenamiento en el valle de Bandejas, se tienen cifras de $1.0E-06$ en promedio. Estas variables son importantes porque indican la cantidad de agua que el acuífero confinado puede ceder por compresión vertical de la matriz del suelo, la compresión del agua y el gradiente hidráulico; así como la que cede el acuífero libre por gravedad. El procedimiento seguido para su entrada al modelo fue similar al usado para la conductividad hidráulica, la distribución fue normal para veintiocho (28) zonas (Figura 64). Los valores obtenidos para

Se muestran en la Tabla 27 y se obtuvieron a partir de las pruebas de bombeo que realizó Conagua en el año 2008. La distribución espacial del almacenamiento específico puede verse en la Figura 65.

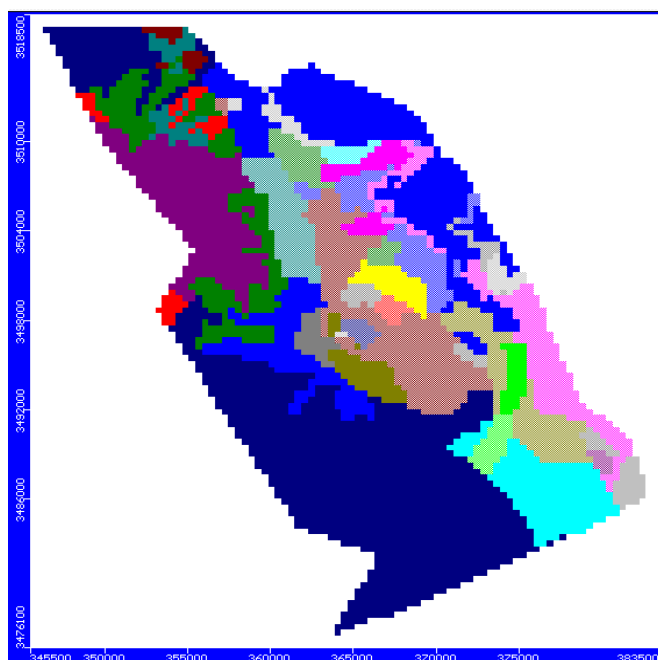


Figura 65 distribución espacial del almacenamiento específico

La capacidad específica (S_y) Se trata de conceptos equivalentes, pero no necesariamente de igual valor; habitualmente nos referimos a ambos en español como “porosidad eficaz”. (*Specific yield*) y se refiere al volumen de agua obtenido por gravedad de un volumen de acuífero. “porosidad efectiva (*Effective Porosity*) se refiere a la parte de una sección por la que puede circular el agua.

Por su parte los valores de capacidad específica (S_y), porosidad efectiva y total, los valores del coeficiente de almacenamiento obtenidos en la mayoría de las pruebas de bombeo interpretadas, muestran que se está en un acuífero con tendencia al semiconfinamiento, ya

que la mayoría de los valores fluctúan de 1×10^{-8} a 1.5×10^{-3} , aunque existen valores típicos de acuífero libre.

Tabla 31 Valores y rangos de colores coeficiente de almacenamiento específico y capacidad o rendimiento específico

Zone	Ss [1/m]	Sy []	Eff. Por. []	Tot. Por. []	Active	Distribution Array
1	1E-5	0.09	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1E-6	0.05	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	1E-6	0.05	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	1E-6	0.05	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2.228157E-5	0.1231963	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	1E-6	0.05	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	1.998618E-5	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	4.081649E-5	0.02339804	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	1.752536E-5	0.1067206	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	0.006413509	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	2.14161E-5	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	6.230425E-5	0.2470856	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	1E-6	0.05	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	1.663023E-5	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	1.310721E-5	0.2149691	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	1.525752E-5	0.04209387	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	1.458756E-5	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	1.289207E-5	0.1055051	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	1.346512E-5	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	1.987279E-5	0.2556505	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	2.224129E-5	0.1956925	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	1.354718E-5	0.009210557	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	2.210841E-5	0.02593219	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	1.154165E-5	0.1361529	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	2.966738E-5	0.27	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	1.597432E-5	0.2158428	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	1.470544E-5	0.01919373	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	0.005241092	0.2076905	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Specific storage Value = 1E-5

3.3.3 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales se calculan con el nivel piezométrico con las curvas de igual elevación del nivel estático, para ello se desarrolló una interpolación de los niveles estáticos para obtener las curvas de elevación de toda el área de estudio, una vez importadas al programa de Visual Modflow se observan las interpolaciones que se hizo anteriormente viendo la configuración de las curvas de igual elevación del nivel estático como lo vemos en la figura 66.

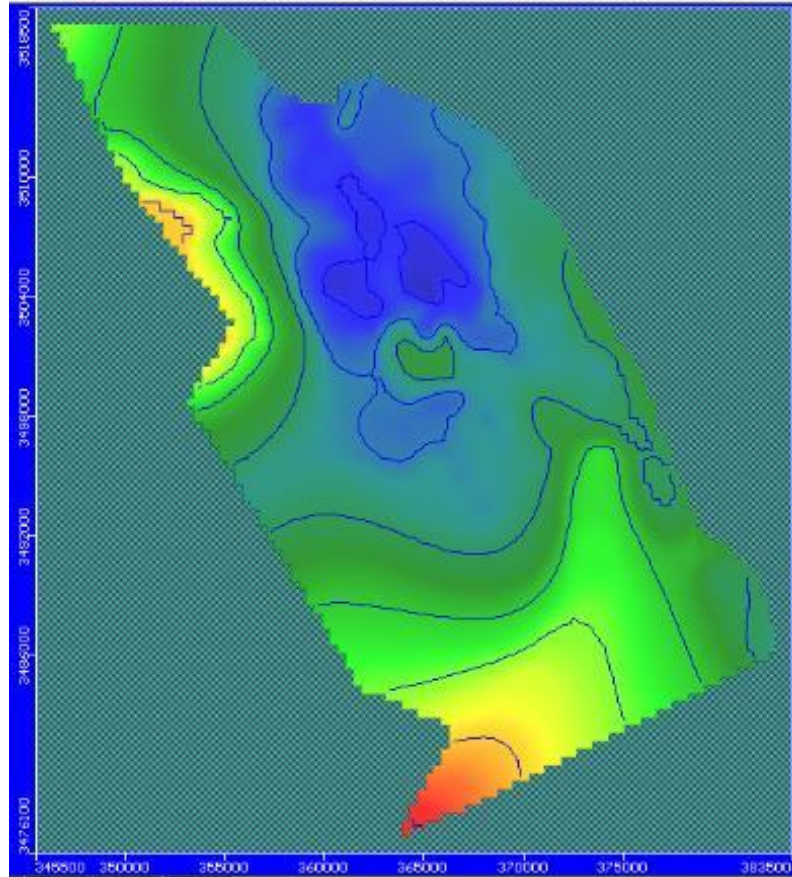


Figura 66 Imagen interpolada de las curvas de igual elevación estática 2008

3.3.4 Recarga

Pese a que el modelo tiene buenos valores de calibración la recarga siempre ha sido tema de discusión en estudios anteriores por lo que en nuestro modelo se utilizaron los usos de suelo para estimar la recarga según su tipo, en la zona urbana se utilizó las entradas por pérdidas en sistemas de agua potable y alcantarillado, así como entradas por flujo horizontal para la zona agrícola se utilizaron las entradas de retorno por riego.

Para la zona sur oriente la disponibilidad de agua subterránea es muy poca, por la pobre recarga, aunque el valor de precipitación de 265.3 mm anuales, no se pueden aplicar métodos empíricos para estimar la evapotranspiración real, que permita a su vez el cálculo de la

infiltración a través de un balance hidrometeorológico, en este tipo de condiciones climáticas la recarga difusa por infiltración y percolación de las escasas lluvias en la superficie del valle tiende a ser poca. A continuación, se muestra en la figura 67 la distribución de la recarga en el modelo.

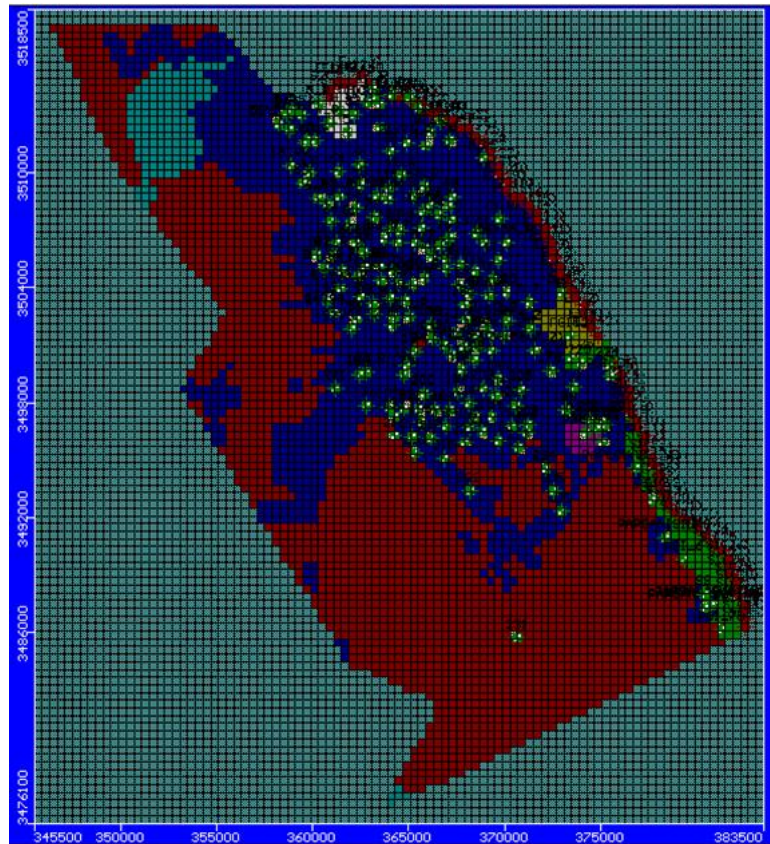


Figura 67 Distribución de la recarga en el modelo

3.4 Modelo Conceptual

El modelo conceptual describe el funcionamiento y características del sistema hidrogeológico, es la caracterización completa del acuífero. Para esto se identifican los principales componentes del sistema como son la geología, hidrología, hidrogeología, recargas y descargas, además establece las relaciones existentes entre ellos, para posteriormente cuantificarlos e ingresarlos al modelo numérico.

En la figura 67 se muestra el esquema del modelo conceptual del sistema y la ubicación geográfica de la batería de pozos utilizada en el modelaje.

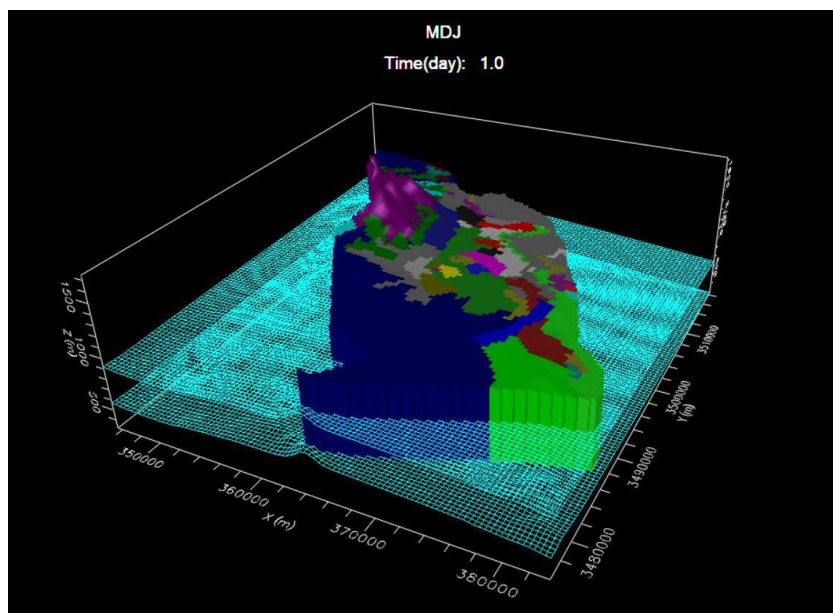


Figura 68 Conceptual del Acuífero Valle de Juárez (Parte Norte)

3.5 Calibración y Verificación.

En este paso del modelaje matemático se reprodujeron las condiciones naturales de flujo y carga hidráulica. Se efectuó mediante la asignación de valores de parámetros hidráulicos dentro de un rango permisible, que satisfagan las condiciones observadas en el campo. Esto es posible también usando parámetros automatizados.

La figura 68 y la tabla 32 ilustran la distribución de cargas hidráulicas medidas en campo vs las calculadas por el modelo en el año 2007 para el presente estudio, en donde se observa que los puntos en rojo están coincidentes sobre la línea azul (referida al origen y con inclinación de 45°). Esto implica que cada punto medido en campo coincide o es semejante a cada punto calculado por el modelo matemático para el área de estudio. Se cuantifica con base en el cálculo del RMS de cuanto es el error de disparidad entre niveles comparados.

Tabla 32 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados 2008.

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
1 RR	365019	3513831	1077.9	1078.035	0.1352783
10_R	361405	3513175	1082	1082.564	0.564209
100	364489	3504224	1056.5	1056.638	0.1378174
104_R	365062	3502468	1065.2	1069.268	4.0677
106	363301	3513968	1075.3	1075.263	-0.03693848
11_R	364157	3514032	1076.3	1076.409	0.1090576
110Y110_R	363483	3513536	1076	1075.436	-0.5639648
111	365559	3513370	1080.9	1080.09	-0.8099121
112	365879	3506028	1058.1	1057.162	-0.9376465
113	366247	3505551	1056.2	1056.593	0.3933838
114	366972	3505500	1061.9	1061.946	0.04616699
115	367740	3505197	1071	1071.635	0.635498
116	368511	3504839	1088.5	1084.972	-3.527588
117	369373	3504393	1088.5	1088.235	-0.2653809
119	363987	3509138	1067.4	1066.928	-0.4723877
12	359850	3509936	1066.7	1065.476	-1.223804
120	367236	3507510	1077.5	1077.003	-0.4967041
121	366599	3507819	1074	1073.097	-0.902832
122	366073	3508321	1073.7	1073.101	-0.5991699
123_R	365281	3508773	1071	1070.795	-0.2049561
124	367055	3508188	1077	1077.113	0.112793
128	365299	3506319	1051.1	1052.013	0.9134277
129	368526	3506797	1087.2	1085.884	-1.315723
13 RR	358880	3510324	1062.1	1062.926	0.8263916
130	368986	3506297	1089.5	1088.453	-1.046997
132	366662	3506178	1062	1063.098	1.098145
133	364071	3507079	1056.7	1057.38	0.6803711
134	368901	3510725	1086.4	1086.227	-0.1730713
135_R	366636	3512670	1081.1	1081.005	-0.09536133
136_R	364245	3502453	1091.1	1087.235	-3.864648
138	366161	3502072	1097.8	1094.716	-3.084058
139	367674	3504128	1063.6	1064.556	0.9562744
14_R	359616	3511498	1062.1	1062.765	0.6652588
140(5_Z)	368991	3502096	1072.8	1074.979	2.179004
141	364131	3502013	1096.1	1096.217	0.1167969
142	360763	3503334	1061.9	1061.871	-0.02878418
143	368137	3503651	1078.3	1076.714	-1.586255
144	367541	3501702	1070.2	1075.378	5.177563
145	365920	3511350	1079.3	1078.63	-0.6696289
146	364384	3506304	1057.6	1057.588	-0.01162109
147	364860	3503288	1073.5	1071.672	-1.827759
148	366247	3501349	1107.4	1102.545	-4.8552
149	368030	3502320	1075.2	1075.137	-0.06279297
15_R	360121	3511631	1063	1062.654	-0.3464355
150	367948	3503097	1079.7	1076.634	-3.065723
151(6_Z)	369972	3501464	1082.7	1082.323	-0.3773682
152	367859	3500931	1087.2	1085.857	-1.342822
156	368548	3501504	1075.6	1075.838	0.2376465
157	369286	3501609	1075.8	1076.88	1.080493
158(7_Z)	371610	3500734	1086.6	1086.904	0.3038086
16_R	358797	3512198	1068.7	1067.038	-1.662036

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
160	368551	3500818	1087.7	1085.594	-2.106494
163	365672	3507079	1060.9	1060.803	-0.0965332
164	367158	3506615	1072	1071.333	-0.6671143
165	366944	3504967	1054.8	1056.871	2.070972
166	363238	3502599	1080.2	1078.839	-1.361011
167_R	362814	3499584	1079.6	1079.858	0.2579102
169	362422	3499459	1080.5	1080.13	-0.369873
17_R	363148	3514330	1075	1075.58	0.5800781
170	364738	3499449	1087.1	1087.999	0.8989014
171	366851	3501012	1088.1	1089.781	1.681128
172	367196	3500484	1087.9	1088.608	0.7079102
174	369349	3500693	1081.2	1082.143	0.9425781
176	362818	3497813	1077.6	1077.891	0.2913574
177	363989	3497754	1077.3	1077.614	0.3137695
178	372432	3499677	1093.9	1093.441	-0.4592041
182	364782	3497710	1077.8	1077.368	-0.4324463
183	364900	3499932	1104.9	1103.256	-1.644019
185	365554	3497678	1077.1	1077.424	0.3243164
186	366360	3497635	1081.1	1080.857	-0.2434326
187	367555	3498561	1084.6	1083.336	-1.263574
188	367786	3499744	1089.2	1088.041	-1.15874
189	365554	3497678	1077.1	1077.424	0.3243164
19_R	365742	3507954	1068.8	1068.291	-0.5087402
190	367176	3497598	1085.9	1084.676	-1.224097
191	368554	3497258	1083.7	1084.249	0.5490234
192	364299	3497233	1077.2	1076.938	-0.2615234
193	369675	3499207	1094	1092.849	-1.151123
194	369321	3497235	1088.8	1088.138	-0.6620605
195	368452	3500222	1085.2	1085.906	0.7060059
196	365649	3497007	1079.4	1079.23	-0.1702637
197	368195	3496678	1087.7	1086.527	-1.1729
198	373165	3497641	1100.9	1101.821	0.9214111
199	366948	3496748	1083.9	1083.744	-0.1562256
2_Z	370164	3502264	1088.2	1086.087	-2.113208
200	365840	3498472	1073.8	1074.586	0.7861816
201	370589	3497850	1100.9	1100.797	-0.1030029
202	370352	3496745	1096.3	1095.926	-0.3743408
203	368935	3498750	1086.5	1086.962	0.4620361
204	369571	3498385	1092.2	1092.203	0.00288086
205	370904	3498696	1102	1101.509	-0.4907227
206	369659	3495992	1091.9	1091.146	-0.7535156
207	371136	3496431	1099.4	1099.245	-0.1546387
208	368133	3497958	1081.1	1081.987	0.8870605
209	371253	3496874	1105.7	1103.69	-2.009692
211	368832	3496488	1084.1	1084.821	0.7208008
212	364557	3506932	1056.8	1057.03	0.2297852
213	370721	3495637	1090.3	1092.824	2.52373
215	366859	3495082	1082	1082.481	0.4813232
216	364266	3496248	1079.6	1079.418	-0.1821533
217	366141	3496157	1081.8	1081.922	0.1215088
218	365313	3495343	1087.7	1086.223	-1.476611
219	365164	3496203	1082.1	1081.414	-0.6858154
220	370089	3503750	1094	1091.568	-2.431641
221	361224	3498774	1081.1	1081.242	0.1421875
222	367935	3495898	1089.2	1087.324	-1.875903
223	373632	3498785	1093.3	1093.94	0.6404297
224	375450	3499935	1103.7	1103.619	-0.08122559
225	373932	3500058	1086	1087.427	1.426636
230	375114	3495950	1114.5	1113.05	-1.450317
231	370661	3485722	1146.8	1146.272	-0.5280273
232	368197	3493396	1082.7	1083.851	1.150708
233	372995	3492326	1129.2	1127.766	-1.434009
234	372136	3494539	1114.7	1112.868	-1.831958
235	372591	3493383	1122	1122.002	0.00219727
242	375240	3496839	1098.5	1100.011	1.511353
28	362430	3510373	1073.5	1072.13	-1.369629
3_Z/	372976	3503755	1105	1104.257	-0.743042
33	362193	3512992	1074.4	1074.578	0.1783691
37	363499	3512340	1073.6	1073.881	0.2807373
38	364090	3511062	1073.7	1073.325	-0.3751709
39	364090	3511062	1073.9	1073.325	-0.5751709
4_R	360870	3512553	1083.9	1081.875	-2.024634
4_Z	371350	3501862	1088.1	1087.773	-0.3272949
42_R	364616	3509804	1067.7	1068.37	0.6703613

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
45	362499	3509306	1062.7	1062.559	-0.1406738
46_R	364037	3503426	1071.5	1071.351	-0.1489258
47_R	369650	3505376	1095.9	1094.235	-1.664526
48	367280	3508712	1080.6	1080.372	-0.2282959
49_R	361386	3508730	1059.5	1059.606	0.1057129
43	361817	3512064	1073.1	1073.119	0.01901855
5_R	360341	3513563	1071.7	1072.276	0.576001
50_R	363691	3506543	1066.7	1063.677	-3.023364
53Y53_R	358273	3512524	1065.3	1066.08	0.7802002
54Y54_R	364131	3504830	1053.6	1054.333	0.7326416
55_R/55_R	359406	3512969	1062.5	1063.667	1.166992
56Y56_R	370070	3506344	1095.4	1095.247	-0.1528076
58Y58_R	362889	3513596	1074.7	1074.759	0.05878906
59	360776	3508333	1061.6	1063.289	1.689185
62	359740	3511645	1062.3	1062.873	0.5730469
6_R	360304	3508648	1069.7	1067.008	-2.69231
60	359507	3509430	1061.1	1064.076	2.975806
61Y61_R	363361	3508802	1063.5	1063.592	0.09191895
62_R	358970	3513165	1063	1063.623	0.6225586
63_R	361257	3506318	1064.1	1063.369	-0.7313477
64	361310	3510027	1059.1	1059.73	0.6304688
66	362210	3508143	1058.4	1058.607	0.2074219
67_R	366206	3512085	1081.5	1080.398	-1.101685
68_R	365800	3509266	1075.7	1075.114	-0.5864746
70_R	362708	3505091	1064.9	1064.076	-0.8239502
71Y71_R	364934	3511509	1076.9	1076.579	-0.3208984
73_RR	365254	3504131	1044.3	1047.827	3.52666
74	363896	3508587	1065.7	1065.439	-0.2606689
76	367166	3511673	1081.5	1081.226	-0.2739258
77	363257	3507683	1060.9	1060.762	-0.1381592
79_R	369764	3507578	1094.6	1093.977	-0.6234375
8_Z	371295	3503204	1085.6	1087.203	1.602637
80_B	365834	3504499	1065.6	1059.402	-6.197778
80A_R	369218	3503611	1080.4	1081.926	1.52627
81	361992	3507321	1055.3	1057.556	2.256152
82_R	361050	3505692	1060.9	1059.776	-1.124365
84	360983	3507414	1072.2	1070.301	-1.899463
86	362248	3506329	1056.6	1059.549	2.949072
86_R	362231	3506324	1059.3	1059.547	0.2465088
87	362690	3505849	1060.4	1060.677	0.2772461
88	363493	3505086	1068.4	1065.337	-3.063086
89_R	361571	3504826	1058.8	1058.194	-0.6063965
9_R	358652	3513071	1064.9	1064.491	-0.4093994
90_RR	360662	3505003	1052.3	1054.922	2.621753
91	360217	3505656	1061.2	1061.391	0.1905029
92	362391	3504562	1061	1061.176	0.1760254
93Y93_R	361458	3503941	1059.1	1058.696	-0.4040771
94Y94_R	361106	3502697	1062.7	1063.262	0.5624512
95	362530	3503483	1055.1	1056.292	1.192358
96/	362297	3502335	1063.3	1065.564	2.263599
97Y97_R	362003	3501818	1073.5	1072.378	-1.121826
98_R	363562	3504386	1069.5	1066.536	-2.963989
99_R	363151	3503174	1062.8	1063.831	1.031299
PAPLOMABLANCA	376867	3494577	1098.7	1099.037	0.3374756
PAPSANAGUSTIN1	380742	3487452	1103.7	1102.389	-1.310962
PAPSANAGUSTIN2	380414	3487314	1101	1103.488	2.487671
PAPSANISIDRO	378367	3490949	1116.6	1115.182	-1.417505
PGL_25	373503	3500321	1084.4	1085.991	1.590723
PGL_3	377679	3492912	1101.7	1102.336	0.6360596
PGL_31	375509	3499364	1107.5	1103.571	-3.929321
PGL_6	379353	3489855	1101.8	1102.196	0.3964111
PGL_78	381309	3486183	1100	1101.202	1.202148
PGL_86	374444	3497028	1105.7	1105.979	0.2788818
PGL_87	375061	3497066	1099.7	1099.946	0.2462891
PGL_89	374811	3496636	1107.2	1107.767	0.5668457
PGL_90	374251	3496429	1124.1	1120.099	-4.000879
PGL52	373396	3501458	1097.7	1096.034	-1.665698
SS	380417	3488027	1103.9	1103.248	-0.6520752

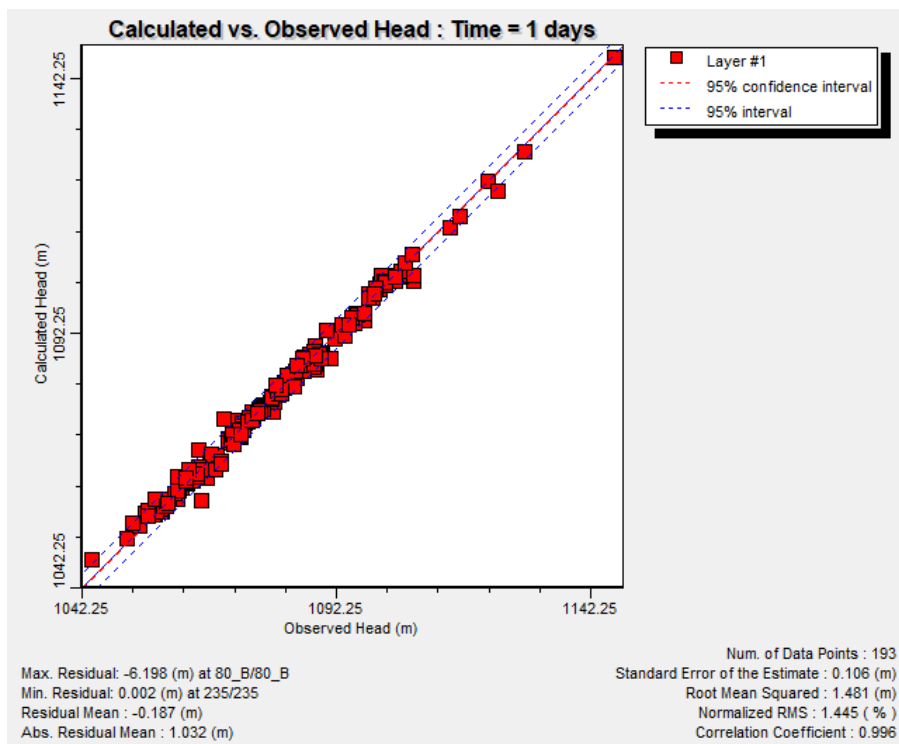


Figura 69 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2008

Para el presente estudio, el periodo de simulación consta de 6 años y comprende los años de 2008 a 2014. De igual manera se compararon las cargas hidráulicas observadas y calculadas para el último año de simulación (2014) mediante un gráfico de dispersión de puntos (Figura 2). Es de observar que los puntos (rojos) se ajustan tendencialmente sobre una línea (azul), haciendo referencia a la ecuación de identidad donde a cada punto medido en “x” le corresponde uno igual calculado en “y”. Lo que significa, que el modelo se ajusta de manera aceptable a las condiciones naturales del acuífero y la cuantificación del error dentro de límites permisibles definirá su aceptación o el rechazo

Tabla 33 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2014.

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
10_R/10_R	361405	3513175	1084.4	1075.399	-9.000586
100/100	364489	3504224	1070	1062.658	-7.341553
104_R/104_R	365062	3502468	1067	1062.969	-4.030762
106/106	363301	3513968	1073.6	1075.172	1.572241
11_R/11_R	364157	3514032	1074.2	1075.578	1.377759
110Y110_R/110Y110_R	363483	3513536	1072.1	1075.118	3.017798
111/111	365559	3513370	1080.3	1076.776	-3.524487

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
112/112	365879	3506028	1063.4	1062.226	-1.174292
113/113	366247	3505551	1063.2	1063.123	-0.07670898
114/114	366972	3505500	1057.9	1065.564	7.664453
115/115	367740	3505197	1086.9	1081.25	-5.650244
116/116	368511	3504839	1084.7	1084.919	0.2187012
117/117	369373	3504393	1088.4	1087.134	-1.266211
119/119	363987	3509138	1069.3	1069.612	0.3123047
12	359850	3509936	1067	1064.661	-2.339233
120/120	367236	3507510	1074.1	1077.341	3.240698
121/121	366599	3507819	1076.7	1071.091	-5.609424
122/122	366073	3508321	1076.2	1071.702	-4.498218
123_R/123_R	365281	3508773	1072.2	1070.662	-1.537769
124/124	367055	3508188	1078.4	1073.332	-5.067969
128/128	365299	3506319	1060.8	1062.034	1.234302
129/129	368526	3506797	1083.4	1086.181	2.781152
13_RR/13_RR	358880	3510324	1064.9	1064.921	0.02138672
130/130	368986	3506297	1095	1086.94	-8.060181
132/132	366662	3506178	1082.5	1076.398	-6.102417
133/133	364071	3507079	1060.6	1064.68	4.08042
134/134	368901	3510725	1088.3	1082.222	-6.077832
135_R/135_R	366636	3512670	1085	1078.49	-6.509521
136_R/136_R	364245	3502453	1066.1	1060.5	-5.599878
138/138	366161	3502072	1066.3	1061.83	-4.47041
139/139	367674	3504128	1065.2	1064.474	-0.726123
14_R/14_R	359616	3511498	1062.6	1064.673	2.073462
140(5_Z)/140(5_Z)	368991	3502096	1073.1	1070.951	-2.148584
141/141	364131	3502013	1059.6	1060.515	0.9153809
142/142	360763	3503334	1067.2	1060.892	-6.308398
143/143	368137	3503651	1069.7	1065.093	-4.606616
144/144	367541	3501702	1072.1	1068.321	-3.779199
145/145	365920	3511350	1080.3	1076.171	-4.129346
146/146	364384	3506304	1057.7	1062.362	4.661816
147/147	364860	3503288	1060.4	1061.969	1.568994
148/148	366247	3501349	1069.1	1067.273	-1.827295
149/149	368030	3502320	1067.2	1066.553	-0.6472656
15_R/15_R	360121	3511631	1048.2	1049.783	1.583203
150/150	367948	3503097	1066.1	1066.206	0.1060547
152/152	367859	3500931	1066.2	1068.866	2.665723
156/156	368548	3501504	1066.1	1068.495	2.394751
157/157	369286	3501609	1074.7	1072.427	-2.27312
158(7_Z)/158(7_Z)	371610	3500734	1083.2	1085.774	2.573804
16_R/16_R	358797	3512198	1067.2	1067.191	-0.00883789
160/160	368551	3500818	1072.6	1070.217	-2.383081
164/164	367158	3506615	1082.4	1079.826	-2.573828
165/165	366944	3504967	1060.6	1066.422	5.822485
167_R/167_R	362814	3499584	1074.3	1076.815	2.51543
17_R/17_R	363148	3514330	1073.2	1075.925	2.724561
170/170	364738	3499449	1064	1063.655	-0.3449707
171/171	366851	3501012	1066	1067.961	1.960938
172/172	367196	3500484	1065.4	1068.514	3.113672
174/174	369349	3500693	1073.3	1072.805	-0.4953125
176/176	362818	3497813	1083.1	1079.058	-4.042261
178/178	372432	3499677	1081.9	1088.995	7.095239
182/182	364782	3497710	1074.5	1073.334	-1.165527
183/183	364900	3499932	1056.5	1056.906	0.4055176
184/184	365349	3500644	1064.8	1067.575	2.775317
185/185	365554	3497678	1074.1	1072.29	-1.809839
186/186	366360	3497635	1070.8	1071.21	0.4097168
187/187	367555	3498561	1047.8	1048.417	0.6169922
188/188	367786	3499744	1070.9	1069.862	-1.037695
19_R/19_R	365742	3507954	1074.5	1069.687	-4.813354
190/190	367176	3497598	1070.2	1069.119	-1.080737
191/191	368554	3497258	1071.2	1072.019	0.819165
192/192	364299	3497233	1063.9	1066.959	3.059351
193/193	369675	3499207	1079.9	1075.588	-4.312109
194/194	369321	3497235	1075.9	1075.995	0.09499512
195/195	368452	3500222	1066.2	1070.763	4.563062
196/196	365649	3497007	1073.6	1072.555	-1.044946
197/197	368195	3496678	1072.9	1071.844	-1.056372
198/198	373165	3497641	1088.7	1096.137	7.437207
199/199	366948	3496748	1069.1	1070.928	1.827979
2_Z/2_Z	370164	3502264	1075.2	1079.418	4.217603
200/200	365840	3498472	1068.6	1071.672	3.071997
201/201	370589	3497850	1082.5	1081.145	-1.355103

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
202/202	370352	3496745	1080.9	1084.951	4.051294
203/203	368935	3498750	1070.6	1073.247	2.647314
204/204	369571	3498385	1072.4	1073.941	1.540796
205/205	370904	3498696	1079	1083.276	4.276489
206/206	369659	3495992	1078.8	1081.939	3.138599
207/207	371136	3496431	1081	1080.787	-0.2126465
208/208	368133	3497958	1068.9	1067.266	-1.633521
209/209	371253	3496874	1096.7	1095.887	-0.812915
211/211	368832	3496488	1075.3	1075.642	0.3422119
213/213	370721	3495637	1084.9	1087.674	2.77395
215/215	366859	3495082	1090	1083.641	-6.359131
216/216	364266	3496248	1078.4	1080.285	1.884546
217/217	366141	3496157	1066.4	1073.856	7.456079
218/218	365313	3495343	1083.3	1083.587	0.2870361
219/219	365164	3496203	1078	1076.005	-1.995483
220/220	370089	3503750	1091.4	1088.186	-3.214453
221/221	361224	3498774	1075.9	1080.559	4.659448
222/222	367935	3495898	1073.9	1076.261	2.360864
223/223	373632	3498785	1092.4	1094.642	2.242334
224/224	375450	3499935	1069.4	1070.743	1.343042
225/225	373932	3500058	1073.1	1065.605	-7.494897
230/230	375114	3495950	1111.2	1114.285	3.085278
231/231	370661	3485722	1106.3	1106.627	0.3269531
232/232	368197	3493396	1075.5	1084.403	8.902954
233/233	372995	3492326	1100.5	1100.881	0.3809814
234/234	372136	3494539	1104.8	1096.253	-8.547437
28/28	362430	3510373	1073.1	1073.583	0.483252
3_Z/3_Z	372976	3503755	1107	1101.704	-5.296143
33/33	362193	3512992	1073.4	1075.11	1.710352
37/37	363499	3512340	1073.1	1074.844	1.744116
38/38	364090	3511062	1072.8	1073.467	0.6666748
39/39	364090	3511062	1074.3	1073.467	-0.8333252
4_Z/4_Z	371350	3501862	1085.7	1085.764	0.06403809
42_R/42_R	364616	3509804	1072.8	1073.017	0.2167236
45/45	362499	3509306	1057.5	1055.681	-1.819092
46_R/46_R	364037	3503426	1060.2	1057.201	-2.999316
47_R/47_R	369650	3505376	1092.6	1088.343	-4.256738
48/48	367280	3508712	1078.1	1074.111	-3.989282
5	361817	3512064	1075.9	1074.707	-1.193335
5_R/5_R	360341	3513563	1075.4	1074.662	-0.7376465
50_R/50_R	363691	3506543	1056.2	1060.682	4.482129
53Y53_R/53Y53_R	358273	3512524	1046.9	1052.34	5.440454
54Y54_R/54Y54_R	364131	3504830	1060.3	1058.758	-1.542065
55_R/55_R	359406	3512969	1065.9	1068.382	2.481714
56Y56_R/56Y56_R	370070	3506344	1094.7	1090.538	-4.162036
58Y58_R/58Y58_R	362889	3513596	1073.6	1075.303	1.703345
59/59	360776	3508333	1056.7	1054.673	-2.027026
60/60	359507	3509430	1061.1	1063.977	2.876563
61Y61_R/61Y61_R	363361	3508802	1058.9	1063.489	4.58938
62_R/62_R	358970	3513165	1066	1068.625	2.624878
63_R/63_R	361257	3506318	1051.9	1056.852	4.951929
64/64	361310	3510027	1053.7	1047.538	-6.162158
66/66	362210	3508143	1055.8	1054.323	-1.477246
67_R/67_R	366206	3512085	1083.4	1077.263	-6.136572
68_R/68_R	365800	3509266	1073.2	1072.781	-0.4185059
71Y71_R/71Y71_R	364934	3511509	1077.9	1074.911	-2.989355
73_RR/73_RR	365254	3504131	1062.4	1063.748	1.348291
74/74	363896	3508587	1071.3	1068.906	-2.39436
76/76	367166	3511673	1081.3	1078.719	-2.580884
77/77	363257	3507683	1072.2	1068.191	-4.008838
79_R/79_R	369764	3507578	1092.7	1090.952	-1.747729
8_Z/8_Z	371295	3503204	1083.5	1087.758	4.257935
80_B/80_B	365834	3504499	1064.6	1064.137	-0.4626709
80A_R/80A_R	369218	3503611	1070.4	1072.773	2.373315
81/81	361992	3507321	1054	1049.671	-4.328979
82_R/82_R	361050	3505692	1057.2	1056.932	-0.2682373
84/84	360983	3507414	1057.5	1058.181	0.6807861
86_R/86_R	362231	3506324	1053.8	1054.367	0.5665771
87/87	362690	3505849	1057	1055.65	-1.349731
88/88	363493	3505086	1057	1057.703	0.7026367
89_R/89_R	361571	3504826	1056.5	1057.521	1.021118
9_R/9_R	358652	3513071	1065.1	1068.874	3.774023
90_RR/90_RR	360662	3505003	1061.6	1057.192	-4.407617
91/91	360217	3505656	1060.6	1057.224	-3.375757

No de pozo	Este X	Norte Y	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
92/92	362391	3504562	1057.2	1058.24	1.03999
93Y93_R/93Y93_R	361458	3503941	1057.1	1059.208	2.108374
94Y94_R/94Y94_R	361106	3502697	1056.4	1062.854	6.453638
95/95	362530	3503483	1054.3	1060.49	6.189746
96/96	362297	3502335	1064.1	1064.865	0.7648682
97Y97_R/97Y97_R	362003	3501818	1061.5	1067.334	5.834351
98_R/98_R	363562	3504386	1062.6	1057.484	-5.116235
99_R/99_R	363151	3503174	1058.3	1059.953	1.653369
PAPLOMABLANCA	376867	3494577	1076	1071.324	-4.676147
PAPSANAGUSTIN1	380742	3487452	1056.7	1061.306	4.605908
PAPSANAGUSTIN2	380414	3487314	1087.2	1092.239	5.039014
PAPSANISIDRO	378367	3490949	1115.5	1110.956	-4.543701
PGL_25/PGL_25	373503	3500321	1066.2	1072.239	6.038647
PGL_3/PGL_3	377679	3492912	1068.1	1068.167	0.06662598
PGL_31/PGL_31	375509	3499364	1073.9	1072.918	-0.9817871
PGL_6/PGL_6	379353	3489855	1096.3	1097.797	1.497485
PGL_78/PGL_78	381309	3486183	1099.8	1098.168	-1.632031
PGL_86/PGL_86	374444	3497028	1097.8	1098.126	0.3256104
PGL_87/PGL_87	375061	3497066	1082	1081.15	-0.8504639
PGL_89/PGL_89	374811	3496636	1093.9	1089.64	-4.259741
PGL52/PGL52	373396	3501458	1104.8	1103.697	-1.102856
SS/SS	380417	3488027	1104.1	1096.604	-7.49624

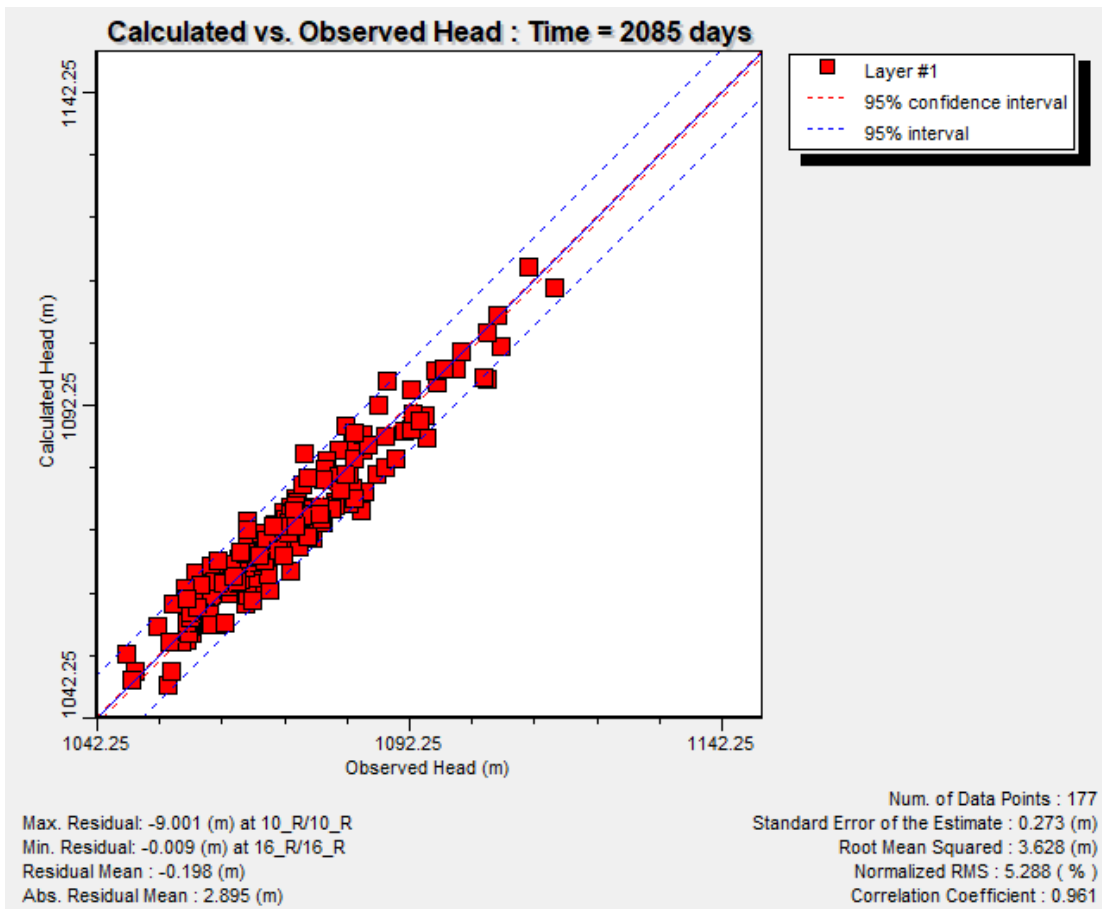


Figura 70 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2014.

Otro resultado relevante es el error medio cuadrático normalizado (NRMS). Este error normalizado debe mantenerse por debajo del 10%, indicando con ello una calibración aceptable (King et al., 2003; Barnett & Muller, 2008). Pero si durante el periodo de calibración (este error) no sobrepasa el criterio recomendado del 5% asegurará que el error en la estimación de los niveles se mantendrá bajo a lo largo de toda la calibración (Tabla 34) (Waterloo Hidrogeologic, 1999).

Tabla 34 Comparativo entre los años de ajuste y aceptación del modelo de simulación.

Año de Ajuste	Error residual medio Cuadrático (RSM) m	Error residual medio Cuadrático Normalizado (RSM) %	Coefficiente de Correlación (R^2) %
2007	1.48	1.45	0.996
2014	3.63	5.29	0.961

Spitz & Moreno (1996) sugieren que el coeficiente de correlación entre los niveles de agua observados y calculados, calibrado adecuadamente para modelos de flujo subterráneo deben de estar entre 0.7 y 1.0. Con esto se interpreta que los valores observados y calculados son semejantes entre sí, con tendencia lineal.

En la Tabla 28 se muestran los comparativos entre los dos periodos de ajuste, indicando para ambos un error residual medio cuadrático entre los valores calculados y los valores observados (RMS) del orden de los 1.5 a 3.5 metros para este estudio, el cual está comprendido dentro del límite permisible de 0 a 12 metros, sugerido por la Groundwater Availability Modeling US. Sin embargo, el valor del error normalizado (cociente que divide al RMS y la máxima diferencia de los niveles observados en campo), es el que nos refiere a decidir si el modelo matemático propuesto en este estudio es aceptado o rechazado para representar el flujo subterráneo en la región. Si, por el contrario, el error normalizado fuera mayor al del intervalo propuesto se regresaría nuevamente al planteamiento del modelo

conceptual. El error normalizado para este modelo de simulación fue de 5.29%, cifra ligeramente por debajo de lo que recomienda el Waterloo Hydrogeologic Inc. por lo que el modelo matemático en este estudio es aceptable.

3.6 Planteamiento de Escenarios de explotación

Una vez calibrado el modelo hidrogeológico matemático del acuífero se procede a plantear escenarios de explotación para observar lo que sucedería con la sostenibilidad del acuífero, en un futuro inmediato. Por lo cual se plantean tres escenarios de explotación posibles, los cuales son acordes con la situación actual y a las tendencias proyectadas del desarrollo urbano futuro de Ciudad Juárez Chihuahua en el acuífero Valle de Juárez, para determinar el impacto sobre las condiciones actuales de éste.

3.7 Simulación de Escenarios de Explotación

El comportamiento del acuífero para cada uno de los escenarios propuestos fue determinado a través de un proceso de simulación, cuyo período máximo de tiempo se estableció en dieciséis años, que equivalen en el modelo a 5840 días. Dicho comportamiento se observará en períodos de tiempo de 4 años, es decir, cada 1460 días, respectivamente. Se tomaron como parámetros hidrogeológicos los usados durante la calibración del acuífero. Es importante aclarar que los datos observados seguirán siendo los del 2014 para calcular los del 2018, 2022, 2026 y 2030.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, una vez efectuadas las corridas del modelo hidrogeológico matemático, para cada uno de los escenarios de explotación propuestos, con las variantes que los mismos suponen.

3.7.1. Escenario 1

Este escenario plantea continuar con el actual ritmo de extracción del recurso subterráneo (hasta el 2030). Sin ejercer ninguna modificación sobre los componentes hidrológicos, manteniendo el bombeo del año 2014, en forma constante hasta el 2030, que equivale a simular del día 2084 al 7932, lo anterior implica que no existe la posibilidad de perforación e incorporación de nuevos pozos de extracción al modelo calibrado, la recarga se mantiene constante y es la misma que se utilizó durante la calibración del modelo.

Este escenario revela un hecho interesante de destacar, como lo es que para el período de simulación (T = 7932 días), los pozos que actualmente bombean activamente en acuífero Valle de Juárez se abaten en promedio 5.25m es decir que, en 16 años en las condiciones actuales, el nivel estático desciende en promedio poco más de 5 m. cómo puede verse en la gráfica de la figura 70 y tabla 35 en donde prácticamente todos los pozos sufren una disminución de su nivel estático.

Tabla 35 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 1)

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
10_R	361405	3513175	1075.399	1074.148	-1.251417
100	364489	3504224	1062.658	1058.974	-3.683513
104_R	365062	3502468	1062.969	1055.14	-7.828985
106	363301	3513968	1075.172	1073.899	-1.273196
11_R	364157	3514032	1075.578	1074.23	-1.347775
110Y110_R	363483	3513536	1075.118	1073.841	-1.277058
111	365559	3513370	1076.776	1075.168	-1.607787
112	365879	3506028	1062.226	1060.095	-2.131396
113	366247	3505551	1063.123	1060.864	-2.258742
114	366972	3505500	1065.564	1063.715	-1.849034
115	367740	3505197	1081.25	1080.338	-0.9121094
116	368511	3504839	1084.919	1083.449	-1.47027
117	369373	3504393	1087.134	1084.888	-2.245938
119	363987	3509138	1069.612	1067.857	-1.755066
12	359850	3509936	1064.661	1061.037	-3.624135
120	367236	3507510	1077.341	1078.474	1.132633
121	366599	3507819	1071.091	1069.241	-1.850033
122	366073	3508321	1071.702	1069.69	-2.011937
123_R	365281	3508773	1070.662	1068.724	-1.938245
124	367055	3508188	1073.332	1071.458	-1.873504
128	365299	3506319	1062.034	1059.722	-2.312076
129	368526	3506797	1086.181	1085.361	-0.8202822
13_RR	358880	3510324	1064.921	1061.285	-3.636088
130	368986	3506297	1086.94	1085.749	-1.19061
132	366662	3506178	1076.398	1077.533	1.134837
133	364071	3507079	1064.68	1062.551	-2.129341
134	368901	3510725	1082.222	1079.339	-2.883499
135_R	366636	3512670	1078.49	1076.482	-2.007822

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
136_R	364245	3502453	1060.5	1053.149	-7.35144
138	366161	3502072	1061.83	1051.342	-10.48845
139	367674	3504128	1064.474	1060.179	-4.295167
14_R	359616	3511498	1064.673	1060.972	-3.700588
140(5_Z)	368991	3502096	1070.951	1062.469	-8.481884
141	364131	3502013	1060.515	1052.593	-7.922471
142	360763	3503334	1060.892	1055.869	-5.022859
143	368137	3503651	1065.093	1059.387	-5.706281
144	367541	3501702	1068.321	1058.211	-10.10982
145	365920	3511350	1076.171	1074.335	-1.835673
146	364384	3506304	1062.362	1059.943	-2.419251
147	364860	3503288	1061.969	1056.739	-5.22962
148	366247	3501349	1067.273	1056.741	-10.53203
149	368030	3502320	1066.553	1057.717	-8.835593
15_R	360121	3511631	1049.783	1046.461	-3.322429
150	367948	3503097	1066.206	1059.363	-6.843329
152	367859	3500931	1068.866	1058.525	-10.34098
156	368548	3501504	1068.495	1058.932	-9.563359
157	369286	3501609	1072.427	1063.646	-8.780516
158(7_Z)	371610	3500734	1085.774	1077.423	-8.351148
16_R	358797	3512198	1067.191	1063.096	-4.095419
160	368551	3500818	1070.217	1060.089	-10.12838
164	367158	3506615	1079.826	1080.727	0.9011729
165	366944	3504967	1066.422	1064.214	-2.208133
167_R	362814	3499584	1076.815	1071.287	-5.527769
17_R	363148	3514330	1075.925	1074.652	-1.273145
170	364738	3499449	1063.655	1056.361	-7.293916
171	366851	3501012	1067.961	1057.428	-10.5329
172	367196	3500484	1068.514	1057.987	-10.52706
174	369349	3500693	1072.805	1063.081	-9.724434
176	362818	3497813	1079.058	1074.12	-4.937517
178	372432	3499677	1088.995	1080.339	-8.656499
182	364782	3497710	1073.334	1067.472	-5.861588
183	364900	3499932	1056.906	1048.521	-8.384516
184	365349	3500644	1067.575	1057.3	-10.27544
185	365554	3497678	1072.29	1066.303	-5.986655
186	366360	3497635	1071.21	1064.91	-6.299966
187	367555	3498561	1048.417	1038.506	-9.911385
188	367786	3499744	1069.862	1059.387	-10.47479
19_R	365742	3507954	1069.687	1067.701	-1.986438
190	367176	3497598	1069.119	1061.524	-7.595196
191	368554	3497258	1072.019	1062.057	-9.961627
192	364299	3497233	1066.959	1061.181	-5.777726
193	369675	3499207	1075.588	1065.429	-10.1588
194	369321	3497235	1075.995	1065.312	-10.68287
195	368452	3500222	1070.763	1060.456	-10.30743
196	365649	3497007	1072.555	1066.561	-5.994209
197	368195	3496678	1071.844	1062.845	-8.999151
198	373165	3497641	1096.137	1086.906	-9.23075
199	366948	3496748	1070.928	1063.956	-6.971701
2_Z	370164	3502264	1079.418	1072.155	-7.262604
200	365840	3498472	1071.672	1065.298	-6.373782
201	370589	3497850	1081.145	1069.302	-11.84263
202	370352	3496745	1084.951	1073.379	-11.57161
203	368935	3498750	1073.247	1062.856	-10.39068
204	369571	3498385	1073.941	1063.453	-10.48788
205	370904	3498696	1083.276	1073.319	-9.957396
206	369659	3495992	1081.939	1072.026	-9.912999
207	371136	3496431	1080.787	1067.843	-12.94374
208	368133	3497958	1067.266	1057.025	-10.24098
209	371253	3496874	1095.887	1082.844	-13.04337
211	368832	3496488	1075.642	1066.066	-9.576082
213	370721	3495637	1087.674	1077.145	-10.52886
215	366859	3495082	1083.641	1077.76	-5.88099
216	364266	3496248	1080.285	1075.237	-5.047817
217	366141	3496157	1073.856	1067.772	-6.084027
218	365313	3495343	1083.587	1078.129	-5.458338
219	365164	3496203	1076.005	1070.276	-5.728877
220	370089	3503750	1088.186	1084.68	-3.506435
221	361224	3498774	1080.559	1075.501	-5.058023
222	367935	3495898	1076.261	1068.514	-7.746718
223	373632	3498785	1094.642	1086.74	-7.902498
225	373932	3500058	1065.605	1055.626	-9.979268
230	375114	3495950	1114.285	1104.536	-9.749478

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
231	370661	3485722	1106.627	1117.819	11.1916
232	368197	3493396	1084.403	1085.611	1.20845
233	372995	3492326	1100.881	1098.22	-2.661151
234	372136	3494539	1096.253	1085.186	-11.06721
28	362430	3510373	1073.583	1072.467	-1.115959
3_Z	372976	3503755	1101.704	1100.112	-1.591695
33	362193	3512992	1075.11	1073.902	-1.207656
37	363499	3512340	1074.844	1073.62	-1.223517
38	364090	3511062	1073.467	1072.17	-1.296712
39	364090	3511062	1073.467	1072.17	-1.296712
4_Z	371350	3501862	1085.764	1079.608	-6.155846
42_R	364616	3509804	1073.017	1071.455	-1.561556
45	362499	3509306	1055.681	1053.467	-2.213959
46_R	364037	3503426	1057.201	1051.793	-5.408031
47_R	369650	3505376	1088.343	1086.433	-1.909528
48	367280	3508712	1074.111	1072.016	-2.094887
5	361817	3512064	1074.707	1073.562	-1.145477
5_R	360341	3513563	1074.662	1073.286	-1.375867
50_R	363691	3506543	1060.682	1057.929	-2.752801
53Y53_R	358273	3512524	1052.34	1047.519	-4.821079
54Y54_R	364131	3504830	1058.758	1055.247	-3.511052
55_R	359406	3512969	1068.382	1064.023	-4.358929
56Y56_R	370070	3506344	1090.538	1088.717	-1.821081
58Y58_R	362889	3513596	1075.303	1074.055	-1.248435
59	360776	3508333	1054.673	1050.728	-3.945095
60	359507	3509430	1063.977	1060.29	-3.687327
61Y61_R	363361	3508802	1063.489	1061.635	-1.853868
62_R	358970	3513165	1068.625	1064.017	-4.608032
63_R	361257	3506318	1056.852	1052.594	-4.258372
64	361310	3510027	1047.538	1043.617	-3.92069
66	362210	3508143	1054.323	1050.883	-3.440188
67_R	366206	3512085	1077.263	1075.351	-1.911926
68_R	365800	3509266	1072.781	1070.839	-1.941889
71Y71_R	364934	3511509	1074.911	1073.394	-1.516591
73_RR	365254	3504131	1063.748	1060.188	-3.560256
74	363896	3508587	1068.906	1066.989	-1.91662
76	367166	3511673	1078.719	1076.457	-2.262457
77	363257	3507683	1068.191	1066.163	-2.027914
79_R	369764	3507578	1090.952	1089.325	-1.626683
8_Z	371295	3503204	1087.758	1082.922	-4.836125
80_B	365834	3504499	1064.137	1060.665	-3.472449
80A_R	369218	3503611	1072.773	1066.387	-6.386403
81	361992	3507321	1049.671	1045.564	-4.106913
82_R	361050	3505692	1056.932	1052.537	-4.394646
84	360983	3507414	1058.181	1054.129	-4.05246
86_R	362231	3506324	1054.367	1050.21	-4.156917
87	362690	3505849	1055.65	1051.633	-4.016821
88	363493	3505086	1057.703	1053.937	-3.766232
89_R	361571	3504826	1057.521	1052.838	-4.682621
9_R	358652	3513071	1068.874	1064.111	-4.76255
90_RR	360662	3505003	1057.192	1052.64	-4.552474
91	360217	3505656	1057.224	1052.876	-4.347779
92	362391	3504562	1058.24	1053.428	-4.811655
93Y93_R	361458	3503941	1059.208	1054.267	-4.940666
94Y94_R	361106	3502697	1062.854	1057.644	-5.209591
95	362530	3503483	1060.49	1055.335	-5.154551
96	362297	3502335	1064.865	1059.454	-5.410898
97Y97_R	362003	3501818	1067.334	1061.873	-5.460953
98_R	363562	3504386	1057.484	1053.174	-4.309806
99_R	363151	3503174	1059.953	1054.396	-5.55676
PAP Loma blanca	376867	3494577	1071.324	1068.647	-2.677271
PAP San Agustin1	380742	3487452	1061.306	1054.01	-7.29599
PAP San agustin 2	380414	3487314	1092.239	1084.161	-8.078111
PAP San Isidro	378367	3490949	1110.956	1105.072	-5.884101
PGL_25	373503	3500321	1072.239	1071.024	-1.215318
PGL_3	377679	3492912	1068.167	1068.077	-0.09033984
PGL_6	379353	3489855	1097.797	1091.799	-5.998172
PGL_78	381309	3486183	1098.168	1092.288	-5.880402
PGL_86	374444	3497028	1098.126	1089.455	-8.670922
PGL_87	375061	3497066	1081.15	1072.375	-8.775244
PGL_89	374811	3496636	1089.64	1079.327	-10.3131
SS	380417	3488027	1096.604	1088.146	-8.457882

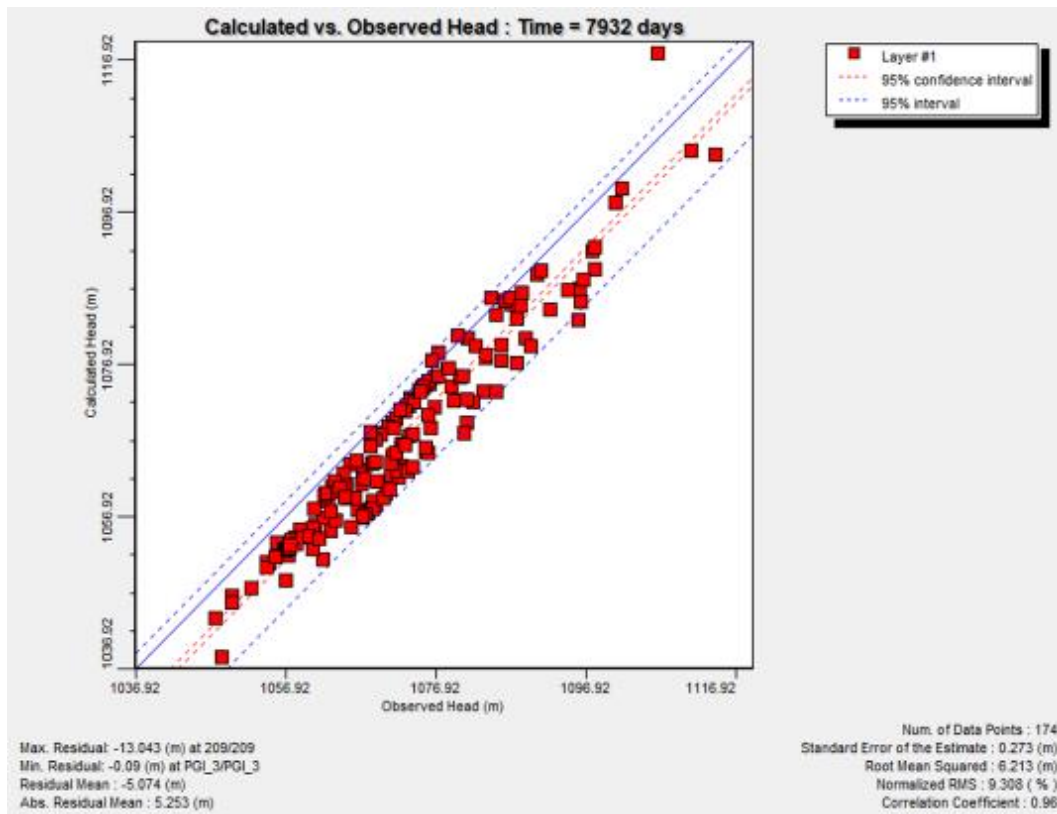


Figura 71 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 1)

También se puede observar en la figura 71 la depresión que sufren las líneas equipotenciales de la elevación del nivel estático y la dirección del flujo que cambian de dirección hacia las zonas de mayor abatimiento hacia la parte centro-sur de la ciudad, zona del acuífero donde se registran las mayores extracciones.

Así mismo se muestran los cortes de las Figuras 72 del año 2014 y 73 de la simulación al 2030, en la fila 38 del modelo matemático del acuífero. Donde se muestra la dirección del flujo hacia los conos de abatimiento Este hecho es consecuencia del efecto de la alta extracción que se da en ese sector del acuífero, se cree que el mismo es localizado en esa zona, producto de los años de extracción de pozos que allí se ubican.

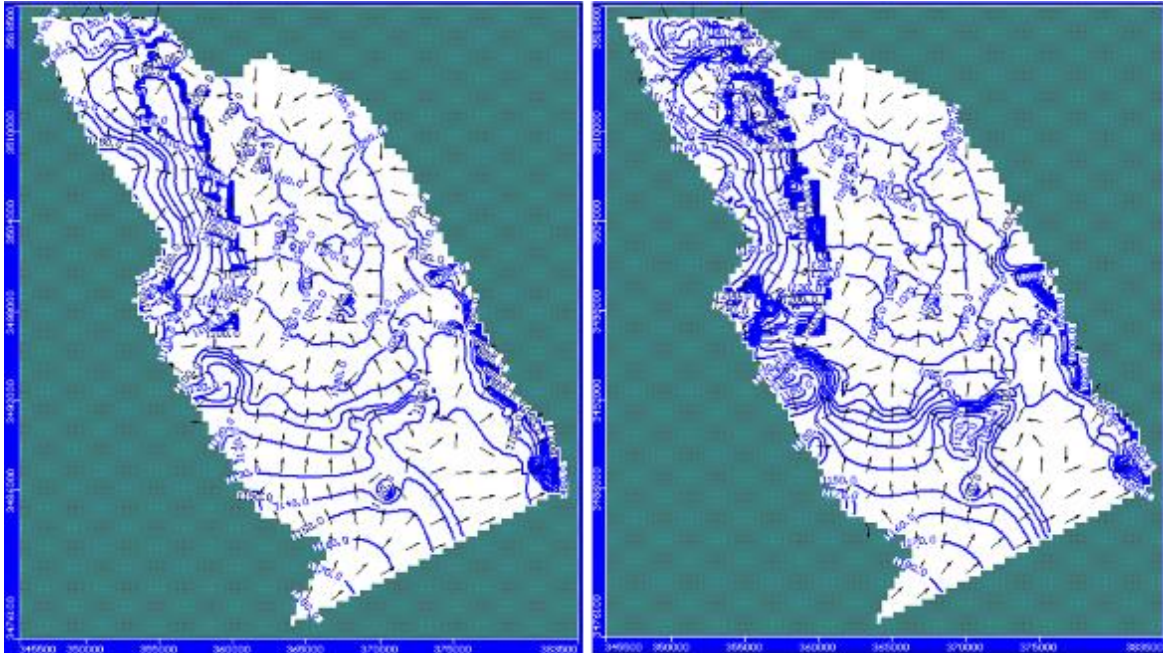


Figura 72 Depresión de las líneas equipotenciales de elevación del nivel estático

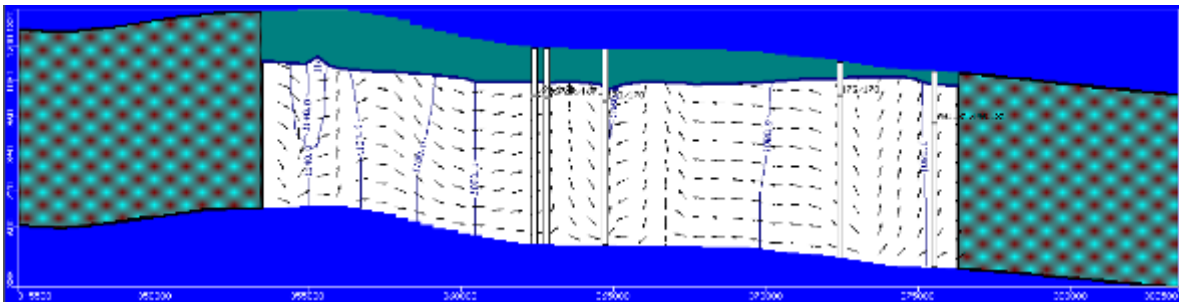


Figura 73 Dirección del flujo hacia las zonas de Abatimiento del año 2014

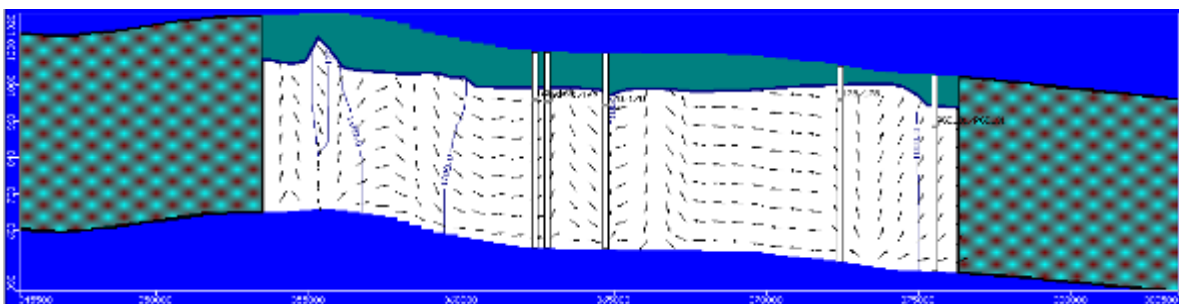


Figura 74 Dirección del flujo hacia las zonas de Abatimiento del año 2030

Este hecho es muy importante para la sostenibilidad futura del acuífero, más aún si se considera el hecho de que en el resto del acuífero (la Parte Sur) existe una cantidad mayor de pozos de bombeo activos a la considerada en el presente estudio, según los inventarios realizados por la Comisión Nacional del Agua (2008). Esto es un indicativo de sobreexplotación, es decir que se están afectando las reservas del acuífero, lo que puede inducir, a una acelerada caída de los niveles estáticos. Por otro lado, se observa la tendencia de que el acuífero tiene buenas condiciones hidrogeológicas y el abatimiento de los niveles estáticos está en un rango aceptado hay que resaltar que en la simulación a 16 años no se seca ningún pozo, un buen indicativo de una buena condición del acuífero a pesar de estar considerado como sobreexplotado.

3.7.2 Escenario 2

En este escenario se proyectó el volumen de extracción hasta el año de 2030, variando la extracción cada 4 años a partir del año de calibración del modelo (2014), para ello se estimó el aumento de población de los años 2014-2030 proyectada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) donde hay una variación de población de 194,835 habitantes con un aumento en la extracción de agua potable de 52605.24 (m³/d), suponiendo una dotación de 270 l/hab/día determinado por la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento de Ciudad Juárez en la actualización del plan maestro para el mejoramiento de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en Juárez chihuahua 2013, para abastecer y dar servicio así como cubrir la demanda por el incremento de población. Son 53 pozos que actualmente bombean activamente en acuífero Valle de Juárez a los que se les aplicó el aumento de bombeo, por encontrarse dentro del área de influencia de la zona de crecimiento futuro de la ciudad, proyectada por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). En la

tabla 36 se observa el incremento de población para cada uno de los periodos de simulación tanto de población como de bombeo para cubrir la demanda de esta población proyectada.

Tabla 36 Incremento de población y bombeo para el escenario 2 (2014-2030)

Periodo	Variación de población (Hab.)	Aumento de extracción (M ³ /d)
2014-2018	49161	13273.47
2018-2022	50251	13567.77
2022-2026	49700	13419
2026-2030	45723	12345

El resultado de la simulación para el período (T = 3546 días), equivalente para el año 2018 y comparándola con el 2014 que es el año de calibración prácticamente no hay cambios solo hay algunas modificaciones leves en las curvas de igual elevación estática, sobre el área sur del modelo, como lo vemos en la figura 74. En la figura 75 se muestra un corte transversal sobre el renglón 48 comparando los cortes 2014-2018 donde vemos como se mueve las direcciones de flujo hacia las zonas de bombeo principalmente hacia los pozos 170 y PGI-31 formando un cono de abatimiento considerable

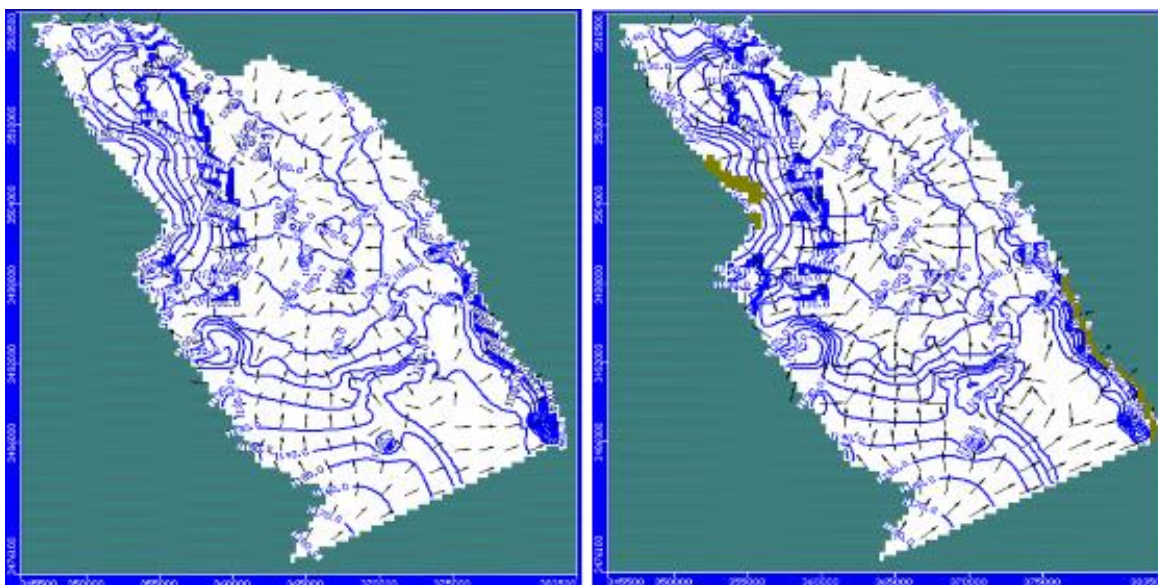


Figura 75 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2018

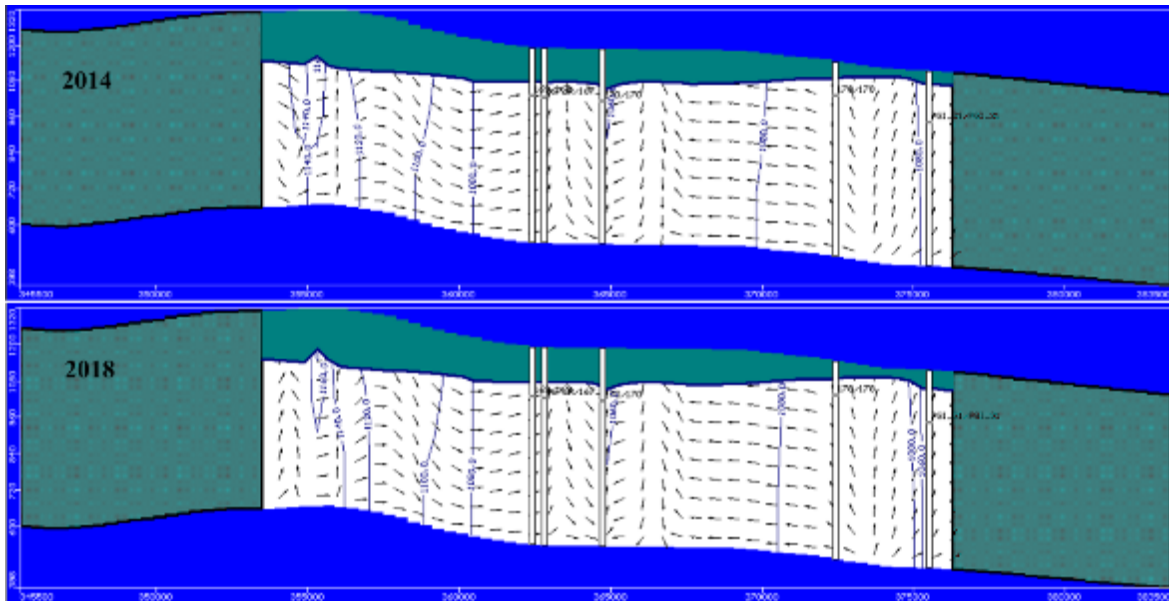


Figura 76 Cortes transversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2018

El resultado de la simulación para el período (T = 5007 días), equivalente para el año 2022 y comparándola con el 2014 que es el año de calibración, en este periodo de simulación se aprecia un descenso moderado en los niveles estático de los pozos del área, principalmente los que se encuentra en la parte central del modelo, hay cambios leves en las curvas de igual elevación estática, sobre el área sur del modelo, la parte central se mantienen las curvas prácticamente como lo vemos en la figura 76.

En la figura 77 se comparan los cortes 2014-2022 donde se muestran 2 secciones transversales sobre el renglón 48 donde apreciamos un leve cambio en la dirección de flujo principalmente sobre las zonas de bombeo, moviéndose principalmente hacia el pozo 170 acentuándose el abatimiento sobre el pozo PGI-31 formando un cono de abatimiento más pronunciado.

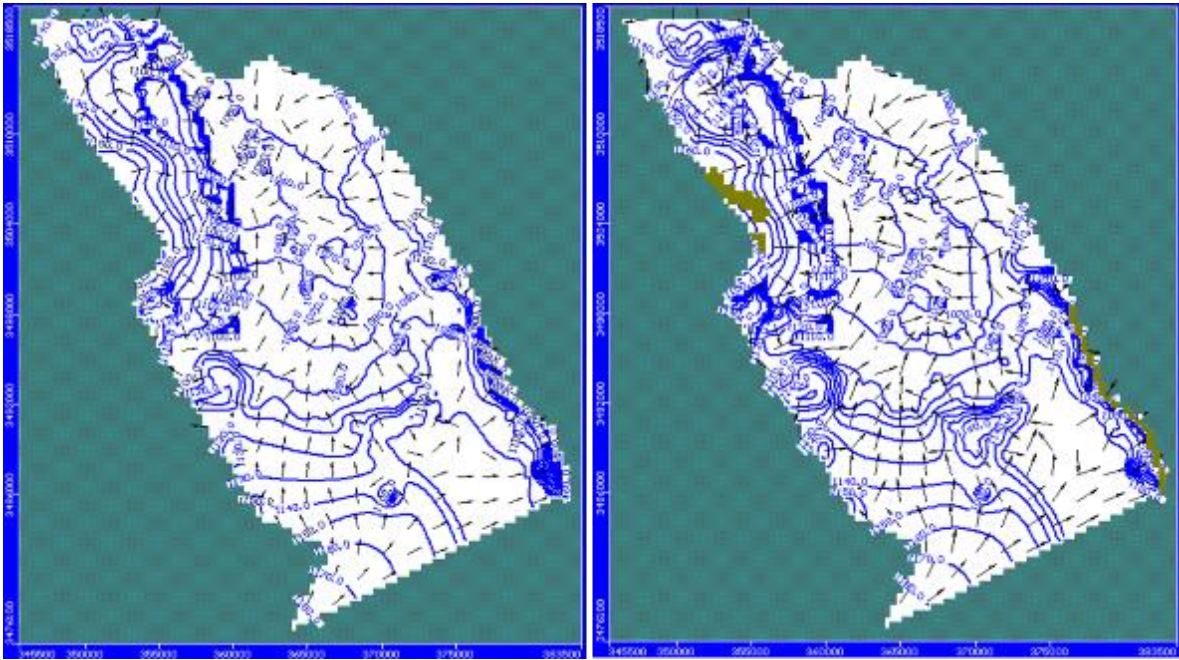


Figura 77 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2022

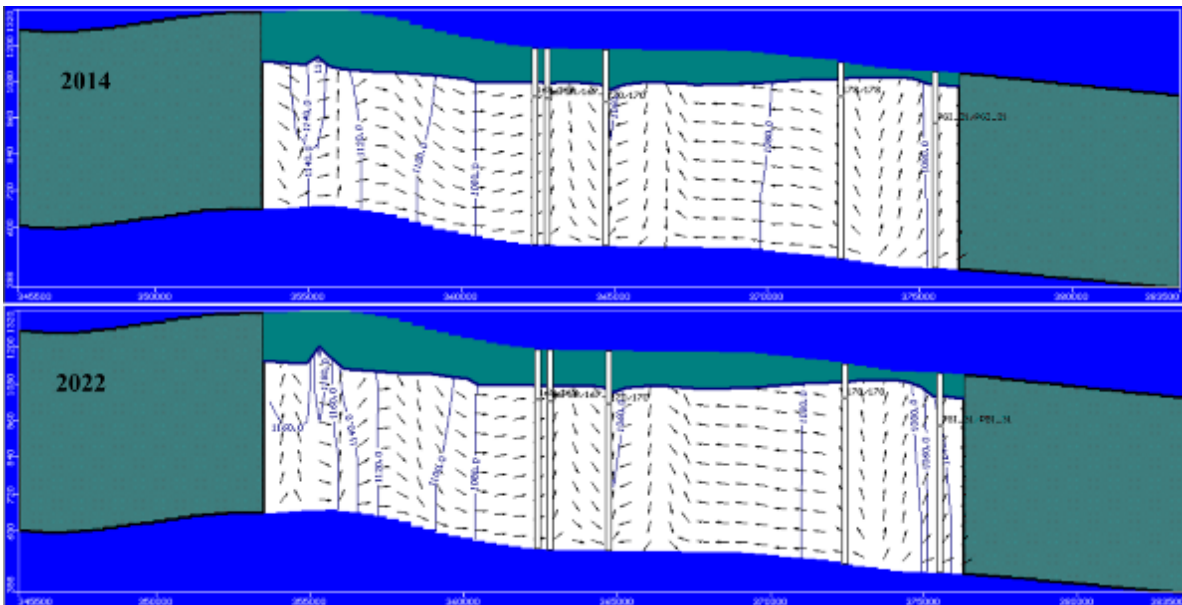


Figura 78 Cortes transversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2022

El siguiente resultado es de la simulación para el período ($T = 6471$ días), equivalente para el año 2026 y comparándola con el 2014 que es el año de calibración, en este periodo de

simulación se aprecia que el descenso en los niveles estático de los pozos del área se acentúan principalmente los que se encuentra en la parte central del modelo, hay cambios moderados en las curvas de igual elevación estática, sobre el área sur del modelo, en la parte central se mantienen las curvas de igual elevación prácticamente sin cambios únicamente la elevación del nivel estático desciende respecto al periodo anterior, como lo vemos en la figura 78.

Se comparan los cortes 2014-2026 donde se muestran 2 secciones transversales sobre el renglón 48, se usa el mismo corte para poder comparar con el paso del tiempo la evolución que ha tenido y así tener un panorama más claro de su desarrollo, seguimos teniendo poco movimiento en la dirección de flujo se mueven principalmente sobre las zonas de bombeo, el cono de abatimiento sobre el pozos 170 se mantiene sin cambio pero se acentuó el abatimiento sobre el pozo PGI-31 formando un cono de abatimiento más pronunciado que en el periodo pasado como se aprecia en la figura 79

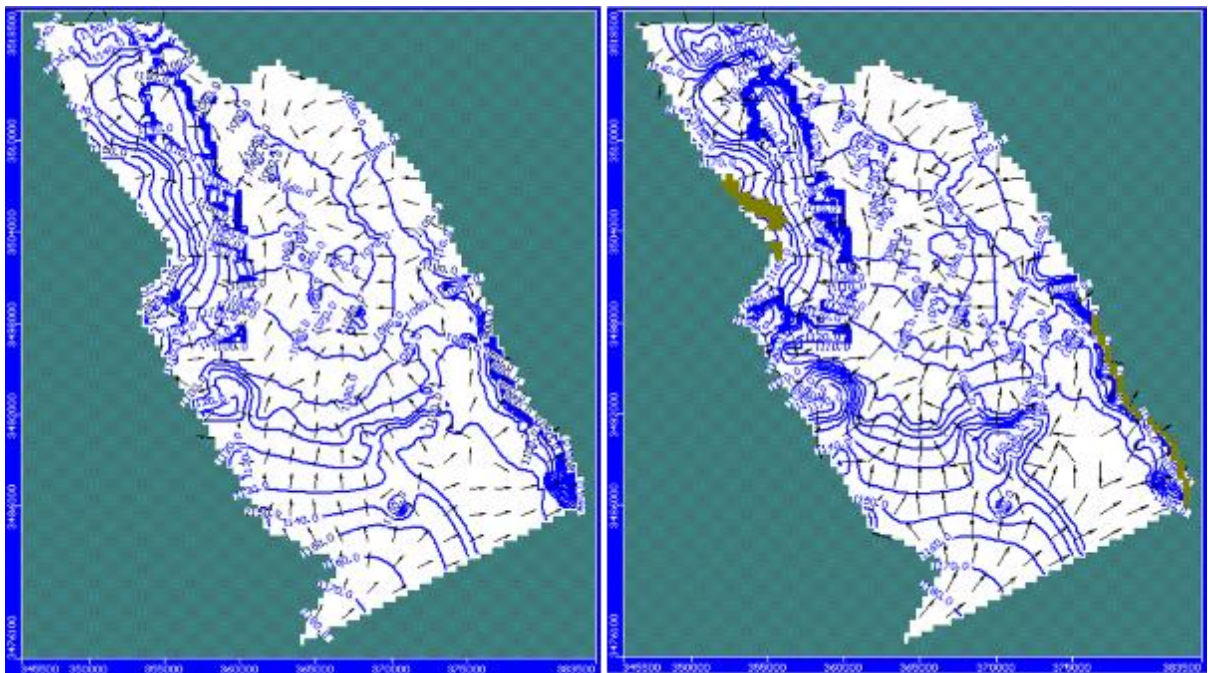


Figura 79 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2026

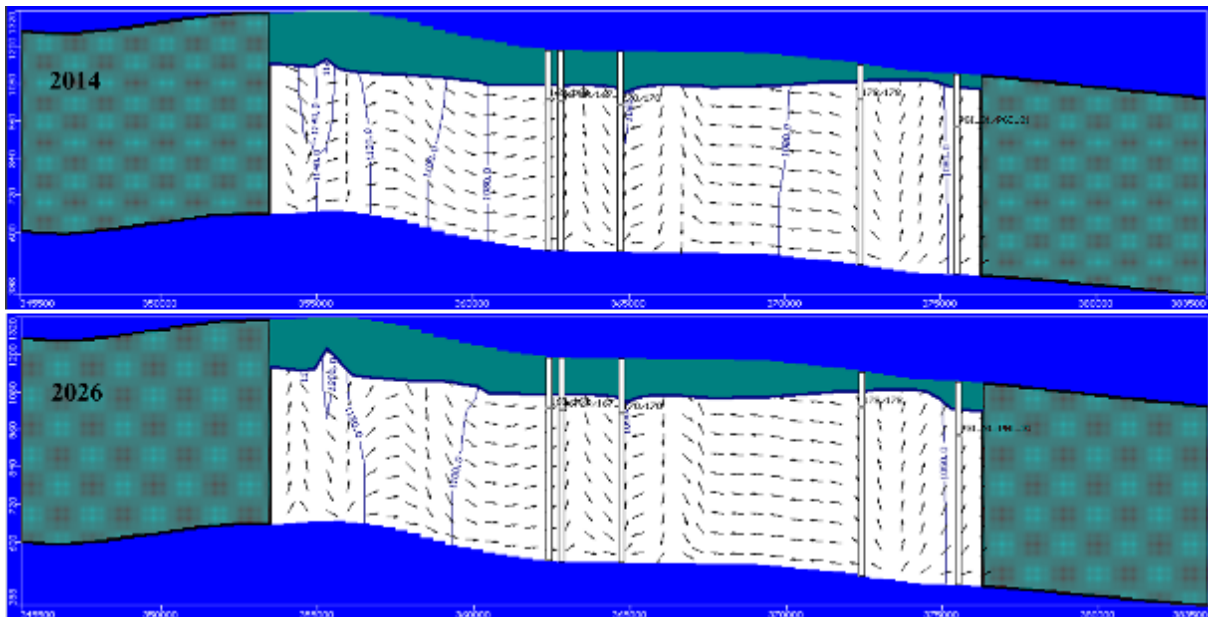


Figura 80 Cortes transversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2026

El siguiente resultado es de la simulación para el período ($T = 7932$ días), equivalente para el año 2030 y comparándola con el 2014 que es el año de calibración, en este periodo de simulación el descenso en los niveles estático de los pozos del área se acentúan en las mismas áreas de abatimiento, las que se encuentra en la parte central del modelo, hay cambios leves en las curvas de igual elevación estática, sobre el área sur del modelo, únicamente la elevación del nivel estático desciende respecto al periodo anterior, como lo vemos en la figura 80. Se comparan los cortes 2014-2030 donde se muestran 2 secciones transversales sobre el renglón 48, seguimos teniendo poco movimiento en la dirección de flujo se mueven principalmente sobre las zonas de bombeo, el cono de abatimiento sobre el pozo 170 se incrementa de forma considerable acentuándose el abatimiento sobre el pozo PGI-31 formando un cono de abatimiento más pronunciado que en el periodo pasado como se aprecia en la figura 81.

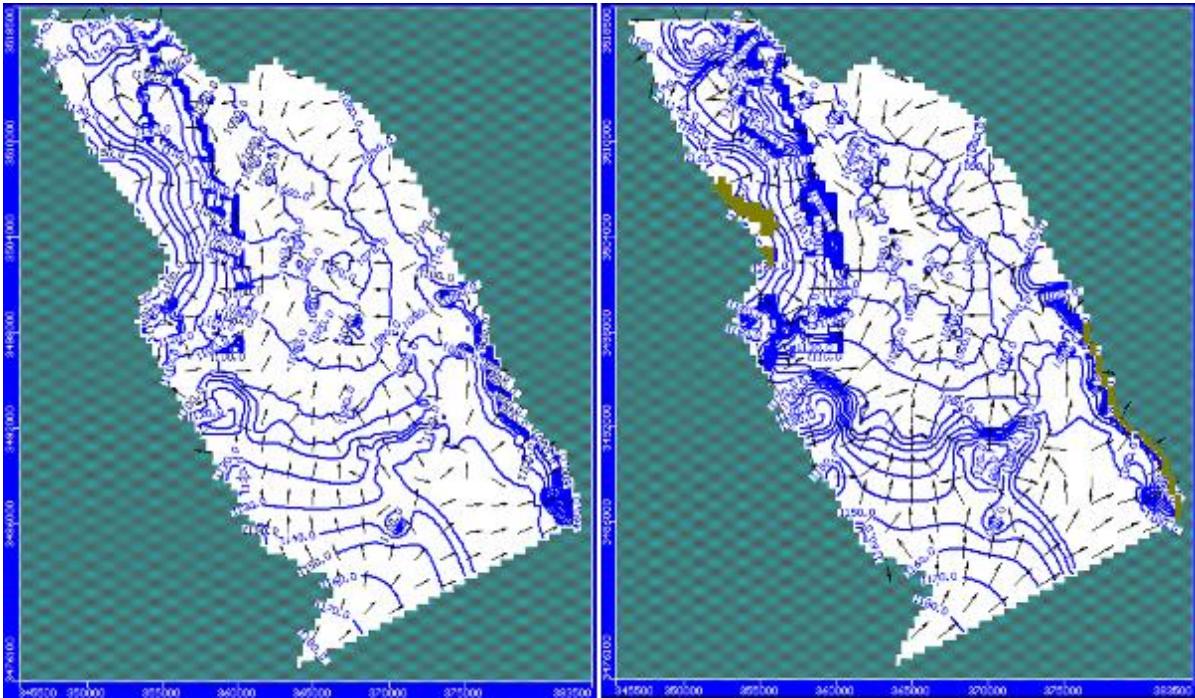


Figura 81 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2030

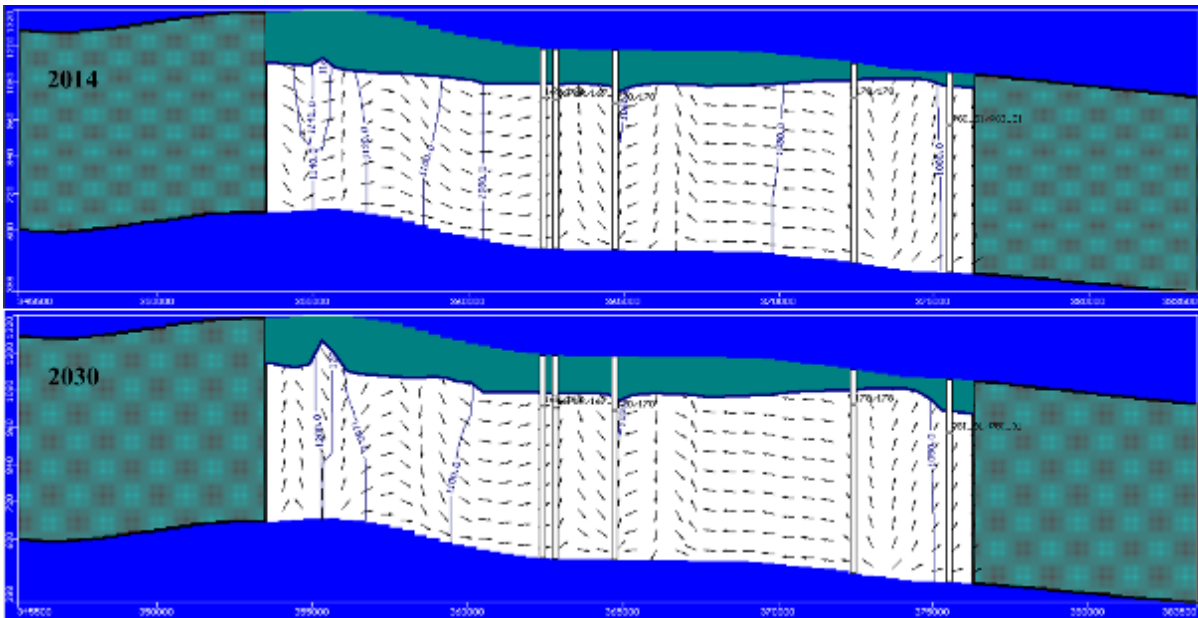


Figura 82 Cortes transversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2030

Hay que resaltar que en la simulación que se realizó para este escenario nos dio resultados de abatimientos generalizados principalmente en las zonas donde se realiza un intenso

bombeo, pero también hay zonas del acuífero en que recupera como lo vemos en las figuras 75,77,79, y 81 donde el nivel estático tiene una recuperación muy importante.

Este escenario revela un hecho interesante de destacar, como lo es que para el período de simulación (T = 7932 días), es decir de 2014 al 2030, los pozos que actualmente bombean activamente en acuífero Valle de Juárez se abaten en promedio 6.72m es decir que en 16 años con un aumento de población de 194,835 habitantes y un incremento de bombeo de 52,602.24 (m³/día) en 53 pozos en el área de predicción de crecimiento se abate poco más de 6 m, sin secarse ningún pozo de bombeo, como puede verse en la gráfica de la Figura 82 y tabla 37 en donde prácticamente se tiene una disminución de 0.42m por año de su nivel estático.

Tabla 37 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 2)

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
10_R	361405	3513175	1075.399	1073.545	-1.853712
100	364489	3504224	1062.658	1055.729	-6.928874
104_R	365062	3502468	1062.969	1052.468	-10.50098
106	363301	3513968	1075.172	1073.286	-1.886355
11_R	364157	3514032	1075.578	1073.375	-2.203
110Y110_R	363483	3513536	1075.118	1073.188	-1.929768
111	365559	3513370	1076.776	1074.472	-2.304076
112	365879	3506028	1062.226	1057.083	-5.142504
113	366247	3505551	1063.123	1057.648	-5.474929
114	366972	3505500	1065.564	1060.437	-5.127232
115	367740	3505197	1081.25	1079.455	-1.795288
116	368511	3504839	1084.919	1082.921	-1.998468
117	369373	3504393	1087.134	1084.493	-2.640592
119	363987	3509138	1069.612	1065.909	-3.703309
12	359850	3509936	1064.661	1059.51	-5.150624
120	367236	3507510	1077.341	1077.134	-0.2066006
121	366599	3507819	1071.091	1067.486	-3.605038
122	366073	3508321	1071.702	1067.89	-3.812107
123_R	365281	3508773	1070.662	1066.823	-3.838758
124	367055	3508188	1073.332	1069.845	-3.487396
128	365299	3506319	1062.034	1056.469	-5.564518
129	368526	3506797	1086.181	1084.749	-1.431854
13_RR	358880	3510324	1064.921	1059.884	-5.037089
130	368986	3506297	1086.94	1085.278	-1.661924
132	366662	3506178	1076.398	1076.146	-0.252248
133	364071	3507079	1064.68	1060.145	-4.535469
134	368901	3510725	1082.222	1078.644	-3.577957
135_R	366636	3512670	1078.49	1075.798	-2.691782
136_R	364245	3502453	1060.5	1050.34	-10.15967
138	366161	3502072	1061.83	1049.269	-12.56132
139	367674	3504128	1064.474	1056.766	-7.708375
14_R	359616	3511498	1064.673	1059.224	-5.449123
140(5_Z)	368991	3502096	1070.951	1060.337	-10.61421
141	364131	3502013	1060.515	1050.252	-10.26317
142	360763	3503334	1060.892	1053.463	-7.428865
143	368137	3503651	1065.093	1056.058	-9.035383
144	367541	3501702	1068.321	1055.797	-12.52376
145	365920	3511350	1076.171	1073.506	-2.664774
146	364384	3506304	1062.362	1057.267	-5.09491
147	364860	3503288	1061.969	1052.664	-9.30506

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
148	366247	3501349	1067.273	1054.561	-12.71233
149	368030	3502320	1066.553	1054.681	-11.87246
15_R	360121	3511631	1049.783	1036.933	-12.85038
150	367948	3503097	1066.206	1056.472	-9.733588
152	367859	3500931	1068.866	1056.153	-12.71341
156	368548	3501504	1068.495	1056.234	-12.26099
157	369286	3501609	1072.427	1061.826	-10.60119
158(7_Z)	371610	3500734	1085.774	1076.811	-8.963331
16_R	358797	3512198	1067.191	1061.884	-5.306601
160	368551	3500818	1070.217	1057.965	-12.25179
164	367158	3506615	1079.826	1079.667	-0.1590078
165	366944	3504967	1066.422	1061.265	-5.157229
167_R	362814	3499584	1076.815	1070.447	-6.367734
17_R	363148	3514330	1075.925	1074.078	-1.847485
170	364738	3499449	1063.655	1055.503	-8.152314
171	366851	3501012	1067.961	1055.167	-12.79401
172	367196	3500484	1068.514	1055.711	-12.80343
174	369349	3500693	1072.805	1061.379	-11.42622
176	362818	3497813	1079.058	1073.69	-5.36757
178	372432	3499677	1088.995	1079.897	-9.098271
182	364782	3497710	1073.334	1067.146	-6.188126
183	364900	3499932	1056.906	1047.258	-9.647943
184	365349	3500644	1067.575	1055.303	-12.27178
185	365554	3497678	1072.29	1065.982	-6.307578
186	366360	3497635	1071.21	1064.582	-6.627847
187	367555	3498561	1048.417	1037.396	-11.02052
188	367786	3499744	1069.862	1057.156	-12.70636
19_R	365742	3507954	1069.687	1065.564	-4.122669
190	367176	3497598	1069.119	1061.121	-7.997906
191	368554	3497258	1072.019	1061.454	-10.56465
192	364299	3497233	1066.959	1060.831	-6.127579
193	369675	3499207	1075.588	1064.034	-11.55443
194	369321	3497235	1075.995	1064.655	-11.34034
195	368452	3500222	1070.763	1058.434	-12.32892
196	365649	3497007	1072.555	1066.254	-6.301216
197	368195	3496678	1071.844	1062.422	-9.422003
198	373165	3497641	1096.137	1086.751	-9.385901
199	366948	3496748	1070.928	1063.642	-7.285788
2_Z	370164	3502264	1079.418	1071.037	-8.381379
200	365840	3498472	1071.672	1064.913	-6.759036
201	370589	3497850	1081.145	1068.614	-12.53111
202	370352	3496745	1084.951	1072.941	-12.00996
203	368935	3498750	1073.247	1061.309	-11.93755
204	369571	3498385	1073.941	1062.18	-11.76107
205	370904	3498696	1083.276	1072.498	-10.77759
206	369659	3495992	1081.939	1071.682	-10.25748
207	371136	3496431	1080.787	1067.382	-13.40455
208	368133	3497958	1067.266	1056.237	-11.02918
209	371253	3496874	1095.887	1082.506	-13.38053
211	368832	3496488	1075.642	1065.639	-10.00296
213	370721	3495637	1087.674	1076.871	-10.80291
215	366859	3495082	1083.641	1077.636	-6.005258
216	364266	3496248	1080.285	1075.068	-5.216763
217	366141	3496157	1073.856	1067.518	-6.338422
218	365313	3495343	1083.587	1078.005	-5.581995
219	365164	3496203	1076.005	1070.033	-5.971675
220	370089	3503750	1088.186	1084.309	-3.877162
221	361224	3498774	1080.559	1074.805	-5.754435
222	367935	3495898	1076.261	1068.24	-8.021498
223	373632	3498785	1094.642	1086.599	-8.042635
225	373932	3500058	1065.605	1055.46	-10.14455
230	375114	3495950	1114.285	1104.467	-9.817593
231	370661	3485722	1106.627	1117.844	11.21712
232	368197	3493396	1084.403	1085.696	1.293045
233	372995	3492326	1100.881	1098.194	-2.686786
234	372136	3494539	1096.253	1085.012	-11.24079
28	362430	3510373	1073.583	1071.323	-2.260246
3_Z	372976	3503755	1101.704	1099.986	-1.717916
33	362193	3512992	1075.11	1073.29	-1.820205
37	363499	3512340	1074.844	1072.846	-1.998419
38	364090	3511062	1073.467	1071.307	-2.159505
39	364090	3511062	1073.467	1071.307	-2.159505
4_Z	371350	3501862	1085.764	1079.037	-6.727379
42_R	364616	3509804	1073.017	1070.152	-2.8649

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
45	362499	3509306	1055.681	1046.641	-9.040375
46_R	364037	3503426	1057.201	1047.099	-10.10176
47_R	369650	3505376	1088.343	1086.063	-2.279646
48	367280	3508712	1074.111	1070.489	-3.62223
5	361817	3512064	1074.707	1072.803	-1.904144
5_R	360341	3513563	1074.662	1072.698	-1.963758
50_R	363691	3506543	1060.682	1055.573	-5.10888
53Y53_R	358273	3512524	1052.34	1040.947	-11.39347
54Y54_R	364131	3504830	1058.758	1052.419	-6.339421
55_R	359406	3512969	1068.382	1063.012	-5.370159
56Y56_R	370070	3506344	1090.538	1088.408	-2.129553
58Y58_R	362889	3513596	1075.303	1073.462	-1.841452
59	360776	3508333	1054.673	1048.955	-5.718044
60	359507	3509430	1063.977	1058.89	-5.087229
61Y61_R	363361	3508802	1063.489	1059.593	-3.896104
62_R	358970	3513165	1068.625	1063.008	-5.616699
63_R	361257	3506318	1056.852	1050.424	-6.427684
64	361310	3510027	1047.538	1036.093	-11.44547
66	362210	3508143	1054.323	1045.16	-9.163332
67_R	366206	3512085	1077.263	1074.622	-2.641174
68_R	365800	3509266	1072.781	1069.362	-3.419062
71Y71_R	364934	3511509	1074.911	1072.468	-2.443471
73_RR	365254	3504131	1063.748	1057.143	-6.604934
74	363896	3508587	1068.906	1064.991	-3.914911
76	367166	3511673	1078.719	1075.702	-3.016974
77	363257	3507683	1068.191	1063.984	-4.206747
79_R	369764	3507578	1090.952	1089.037	-1.915135
8_Z	371295	3503204	1087.758	1082.497	-5.260563
80_B	365834	3504499	1064.137	1057.653	-6.484046
80A_R	369218	3503611	1072.773	1064.433	-8.340261
81	361992	3507321	1049.671	1043.233	-6.437968
82_R	361050	3505692	1056.932	1050.292	-6.640374
84	360983	3507414	1058.181	1052.257	-5.923798
86_R	362231	3506324	1054.367	1047.77	-6.596858
87	362690	3505849	1055.65	1048.478	-7.171851
88	363493	3505086	1057.703	1051.049	-6.654416
89_R	361571	3504826	1057.521	1050.414	-7.106815
9_R	358652	3513071	1068.874	1063.045	-5.828834
90_RR	360662	3505003	1057.192	1050.337	-6.855208
91	360217	3505656	1057.224	1050.705	-6.518556
92	362391	3504562	1058.24	1050.829	-7.411387
93Y93_R	361458	3503941	1059.208	1051.757	-7.451042
94Y94_R	361106	3502697	1062.854	1055.266	-7.588375
95	362530	3503483	1060.49	1052.384	-8.105967
96	362297	3502335	1064.865	1056.861	-8.003916
97Y97_R	362003	3501818	1067.334	1059.584	-7.750016
98_R	363562	3504386	1057.484	1050.298	-7.186026
99_R	363151	3503174	1059.953	1050.198	-9.755246
PAPLOMABLANCA	376867	3494577	1071.324	1069.556	-1.768092
PAPSANAGUSTINI1	380742	3487452	1061.306	1053.983	-7.32309
PAPSANAGUSTINI2	380414	3487314	1092.239	1084.146	-8.09337
PAPSANISIDRO	378367	3490949	1110.956	1105.596	-5.360419
PGL_25	373503	3500321	1072.239	1071.02	-1.219347
PGL_3	377679	3492912	1068.167	1069.231	1.064201
PGL_6	379353	3489855	1097.797	1092.2	-5.596927
PGL_78	381309	3486183	1098.168	1092.208	-5.959626
PGL_86	374444	3497028	1098.126	1089.367	-8.759301
PGL_87	375061	3497066	1081.15	1072.417	-8.733008
PGL_89	374811	3496636	1089.64	1079.192	-10.44823
SS	380417	3488027	1096.604	1088.182	-8.422359

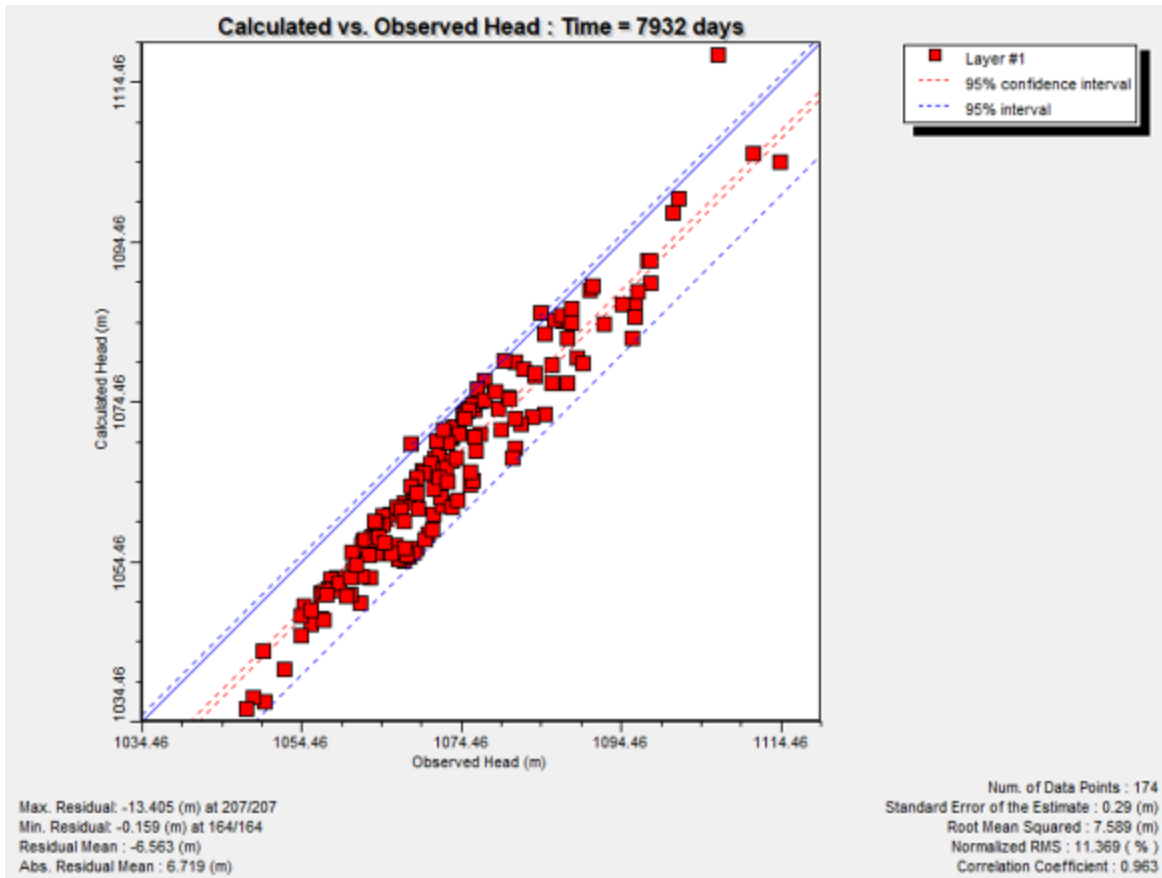


Figura 83 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 2)

La simulación matemática realizada para este escenario nos da un resultado alentador para el desarrollo urbano que se pretende realizar por el Instituto de Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) ya que por las condiciones hidrogeológicas con que cuenta el acuífero en la zona urbana puede mantener a una población presente y futura aun cuando el acuífero Valle de Juárez este catalogado como Sobreexplotado. Para la simulación de este escenario la recarga se mantiene constante y es la misma que se utilizó durante la calibración del modelo.

3.7.2 Escenario 3

Este escenario contempla el de proponer una batería de 20 pozos fuera de la mancha urbana con un caudal de extracción de 1 (m³/s) esta batería de pozos empezara operaciones hipotéticamente el 15 de Julio del 2018 para cubrir la demanda de agua potable de la población futura del 2018/2030 con un incremento de población de 145,674 habitantes con un consumo estimado de 39331.77 (m³/d), este escenario pretende evaluar el comportamiento de los niveles del acuífero ante un hecho hipotético de crecimiento de población dentro de la ciudad y conducir el agua para satisfacer las necesidades de 145,647 habitantes que tendría Ciudad Juárez al año 2030 según estimación de (CONAPO).

Este escenario plantea continuar con el actual ritmo de extracción del recurso subterráneo (hasta el 2030), sin ejercer ninguna modificación sobre los componentes hidrológicos, manteniendo el bombeo del año 2014, en forma constante hasta el 2030, agregando una batería de pozos al sur de la ciudad a partir del 15 de Julio del 2018, la recarga se mantiene constante y es la misma que se utilizó durante la calibración del modelo.

Este escenario revela un hecho interesante de destacar, como lo es que para el período de simulación (T = 7932 días), los pozos que actualmente bombean activamente en acuífero Valle de Juárez y los agregados en el 2018 se abaten en promedio 5.64m es decir que, en 16 años en las condiciones actuales y ficticias el nivel estático desciende en promedio poco más de 5 m. cómo puede verse en la gráfica de la Figura 83 y tabla 38 en donde prácticamente se tiene una disminución de 0.35m por año de su nivel estático.

Tabla 38 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 3)

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
10_R	361405	3513175	1075.399	1074.163	-1.23628
100	364489	3504224	1062.658	1058.953	-3.704753
104_R	365062	3502468	1062.969	1055.065	-7.904303
106	363301	3513968	1075.172	1073.912	-1.260135
11_R	364157	3514032	1075.578	1074.241	-1.337155
110Y110_R	363483	3513536	1075.118	1073.853	-1.264851
111	365559	3513370	1076.776	1075.174	-1.60205
112	365879	3506028	1062.226	1060.09	-2.135546
113	366247	3505551	1063.123	1060.86	-2.262648
114	366972	3505500	1065.564	1063.718	-1.845982
115	367740	3505197	1081.25	1080.355	-0.8951416
116	368511	3504839	1084.919	1083.457	-1.461603
117	369373	3504393	1087.134	1084.885	-2.248868
119	363987	3509138	1069.612	1067.858	-1.754334
12	359850	3509936	1064.661	1061.043	-3.617787
120	367236	3507510	1077.341	1078.517	1.176212
121	366599	3507819	1071.091	1069.241	-1.850155
122	366073	3508321	1071.702	1069.688	-2.014012
123_R	365281	3508773	1070.662	1068.722	-1.939588
124	367055	3508188	1073.332	1071.459	-1.87326
128	365299	3506319	1062.034	1059.715	-2.319278
129	368526	3506797	1086.181	1085.379	-0.8017275
13_RR	358880	3510324	1064.921	1061.291	-3.629618
130	368986	3506297	1086.94	1085.763	-1.177061
132	366662	3506178	1076.398	1077.577	1.179393
133	364071	3507079	1064.68	1062.546	-2.133857
134	368901	3510725	1082.222	1079.328	-2.894119
135_R	366636	3512670	1078.49	1076.482	-2.0077
136_R	364245	3502453	1060.5	1053.086	-7.413574
138	366161	3502072	1061.83	1051.208	-10.62224
139	367674	3504128	1064.474	1060.145	-4.329347
14_R	359616	3511498	1064.673	1060.975	-3.698269
140(5_Z)	368991	3502096	1070.951	1062.362	-8.588939
141	364131	3502013	1060.515	1052.522	-7.993271
142	360763	3503334	1060.892	1055.844	-5.04764
143	368137	3503651	1065.093	1059.326	-5.766584
144	367541	3501702	1068.321	1058.083	-10.23787
145	365920	3511350	1076.171	1074.336	-1.834696
146	364384	3506304	1062.362	1059.935	-2.426575
147	364860	3503288	1061.969	1056.7	-5.269171
148	366247	3501349	1067.273	1056.61	-10.66289
149	368030	3502320	1066.553	1057.603	-8.949729
15_R	360121	3511631	1049.783	1046.444	-3.338664
150	367948	3503097	1066.206	1059.284	-6.921942
152	367859	3500931	1068.866	1058.39	-10.47611
156	368548	3501504	1068.495	1058.804	-9.690679
157	369286	3501609	1072.427	1063.532	-8.894529
158(7_Z)	371610	3500734	1085.774	1077.3	-8.474073
16_R	358797	3512198	1067.191	1063.092	-4.098837
160	368551	3500818	1070.217	1059.954	-10.2629
164	367158	3506615	1079.826	1080.768	0.9419443
165	366944	3504967	1066.422	1064.212	-2.209842
167_R	362814	3499584	1076.815	1071.267	-5.548154
17_R	363148	3514330	1075.925	1074.666	-1.259351
170	364738	3499449	1063.655	1056.29	-7.365205
171	366851	3501012	1067.961	1057.294	-10.66657
172	367196	3500484	1068.514	1057.851	-10.66305
174	369349	3500693	1072.805	1062.95	-9.855293
176	362818	3497813	1079.058	1074.105	-4.952653
178	372432	3499677	1088.995	1080.162	-8.833257
182	364782	3497710	1073.334	1067.436	-5.898453
183	364900	3499932	1056.906	1048.428	-8.477899
184	365349	3500644	1067.575	1057.178	-10.39666
185	365554	3497678	1072.29	1066.262	-6.027793
186	366360	3497635	1071.21	1064.861	-6.348794
187	367555	3498561	1048.417	1038.328	-10.08863
188	367786	3499744	1069.862	1059.248	-10.61383
19_R	365742	3507954	1069.687	1067.698	-1.988636
190	367176	3497598	1069.119	1061.442	-7.677105
191	368554	3497258	1072.019	1061.901	-10.11788
192	364299	3497233	1066.959	1061.129	-5.830216

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
193	369675	3499207	1075.588	1065.286	-10.30223
194	369321	3497235	1075.995	1065.105	-10.8899
195	368452	3500222	1070.763	1060.318	-10.44488
196	365649	3497007	1072.555	1066.519	-6.035591
197	368195	3496678	1071.844	1062.709	-9.134649
198	373165	3497641	1096.137	1086.193	-9.943519
199	366948	3496748	1070.928	1063.887	-7.040793
2_Z	370164	3502264	1079.418	1072.067	-7.350861
200	365840	3498472	1071.672	1065.251	-6.421023
201	370589	3497850	1081.145	1068.989	-12.15562
202	370352	3496745	1084.951	1073.008	-11.94343
203	368935	3498750	1073.247	1062.71	-10.53679
204	369571	3498385	1073.941	1063.291	-10.64974
205	370904	3498696	1083.276	1073.16	-10.11572
206	369659	3495992	1081.939	1071.775	-10.16434
207	371136	3496431	1080.787	1067.181	-13.6056
208	368133	3497958	1067.266	1056.874	-10.39198
209	371253	3496874	1095.887	1082.143	-13.74418
211	368832	3496488	1075.642	1065.892	-9.750154
213	370721	3495637	1087.674	1076.738	-10.93608
215	366859	3495082	1083.641	1077.724	-5.917489
216	364266	3496248	1080.285	1075.218	-5.06686
217	366141	3496157	1073.856	1067.727	-6.128949
218	365313	3495343	1083.587	1078.105	-5.481531
219	365164	3496203	1076.005	1070.243	-5.762202
220	370089	3503750	1088.186	1084.656	-3.53036
221	361224	3498774	1080.559	1075.487	-5.072062
222	367935	3495898	1076.261	1068.408	-7.853163
223	373632	3498785	1094.642	1086.341	-8.300691
225	373932	3500058	1065.605	1055.414	-10.19143
230	375114	3495950	1114.285	1096.721	-17.56405
231	370661	3485722	1106.627	1108.975	2.34822
232	368197	3493396	1084.403	1085.663	1.26033
233	372995	3492326	1100.881	1094.302	-6.578876
234	372136	3494539	1096.253	1084.102	-12.15071
28	362430	3510373	1073.583	1072.478	-1.104851
3_Z	372976	3503755	1101.704	1100.101	-1.602804
33	362193	3512992	1075.11	1073.917	-1.193374
37	363499	3512340	1074.844	1073.631	-1.21253
38	364090	3511062	1073.467	1072.177	-1.289632
39	364090	3511062	1073.467	1072.177	-1.289632
4_Z	371350	3501862	1085.764	1079.536	-6.228355
42_R	364616	3509804	1073.017	1071.459	-1.558382
45	362499	3509306	1055.681	1053.463	-2.218231
46_R	364037	3503426	1057.201	1051.752	-5.448803
47_R	369650	3505376	1088.343	1086.436	-1.906721
48	367280	3508712	1074.111	1072.013	-2.097694
5	361817	3512064	1074.707	1073.576	-1.131316
5_R	360341	3513563	1074.662	1073.301	-1.360975
50_R	363691	3506543	1060.682	1057.921	-2.761224
53Y53_R	358273	3512524	1052.34	1047.478	-4.861851
54Y54_R	364131	3504830	1058.758	1055.227	-3.530705
55_R	359406	3512969	1068.382	1064.013	-4.369183
56Y56_R	370070	3506344	1090.538	1088.722	-1.81571
58Y58_R	362889	3513596	1075.303	1074.068	-1.234763
59	360776	3508333	1054.673	1050.719	-3.954494
60	359507	3509430	1063.977	1060.295	-3.6822
61Y61_R	363361	3508802	1063.489	1061.631	-1.85753
62_R	358970	3513165	1068.625	1064.005	-4.620361
63_R	361257	3506318	1056.852	1052.578	-4.273997
64	361310	3510027	1047.538	1043.607	-3.930822
66	362210	3508143	1054.323	1050.873	-3.450319
67_R	366206	3512085	1077.263	1075.352	-1.911193
68_R	365800	3509266	1072.781	1070.838	-1.943109
71Y71_R	364934	3511509	1074.911	1073.399	-1.511708
73_RR	365254	3504131	1063.748	1060.168	-3.579909
74	363896	3508587	1068.906	1066.989	-1.917475
76	367166	3511673	1078.719	1076.453	-2.265997
77	363257	3507683	1068.191	1066.161	-2.029501
79_R	369764	3507578	1090.952	1089.334	-1.617527
8_Z	371295	3503204	1087.758	1082.874	-4.884465
80_B	365834	3504499	1064.137	1060.646	-3.491004
80A_R	369218	3503611	1072.773	1066.316	-6.456716
81	361992	3507321	1049.671	1045.542	-4.128886

No de pozo	Este X	NorteY	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
82_R	361050	3505692	1056.932	1052.519	-4.412713
84	360983	3507414	1058.181	1054.12	-4.061127
86_R	362231	3506324	1054.367	1050.19	-4.176937
87	362690	3505849	1055.65	1051.616	-4.034277
88	363493	3505086	1057.703	1053.918	-3.784665
89_R	361571	3504826	1057.521	1052.815	-4.705814
9_R	358652	3513071	1068.874	1064.099	-4.775245
90_RR	360662	3505003	1057.192	1052.619	-4.572859
91	360217	3505656	1057.224	1052.86	-4.363526
92	362391	3504562	1058.24	1053.404	-4.836313
93Y93_R	361458	3503941	1059.208	1054.241	-4.966667
94Y94_R	361106	3502697	1062.854	1057.618	-5.23608
95	362530	3503483	1060.49	1055.307	-5.182993
96	362297	3502335	1064.865	1059.426	-5.43873
97Y97_R	362003	3501818	1067.334	1061.847	-5.48732
98_R	363562	3504386	1057.484	1053.149	-4.334952
99_R	363151	3503174	1059.953	1054.363	-5.589963
PAPLOMABLANCA	376867	3494577	1071.324	1069.083	-2.241114
PAPSANAGUSTINI1	380742	3487452	1061.306	1048.673	-12.63315
PAPSANAGUSTINI2	380414	3487314	1092.239	1075.828	-16.411
PAPSANISIDRO	378367	3490949	1110.956	1101.945	-9.010565
PGL_25	373503	3500321	1072.239	1070.968	-1.271471
PGL_3	377679	3492912	1068.167	1068.819	0.6518477
PGL_6	379353	3489855	1097.797	1086.037	-11.76038
PGL_78	381309	3486183	1098.168	1079.127	-19.0408
PGL_86	374444	3497028	1098.126	1086.664	-11.46218
PGL_87	375061	3497066	1081.15	1070.812	-10.33799
PGL_89	374811	3496636	1089.64	1074.003	-15.63744
SS	380417	3488027	1096.604	1079.755	-16.84887

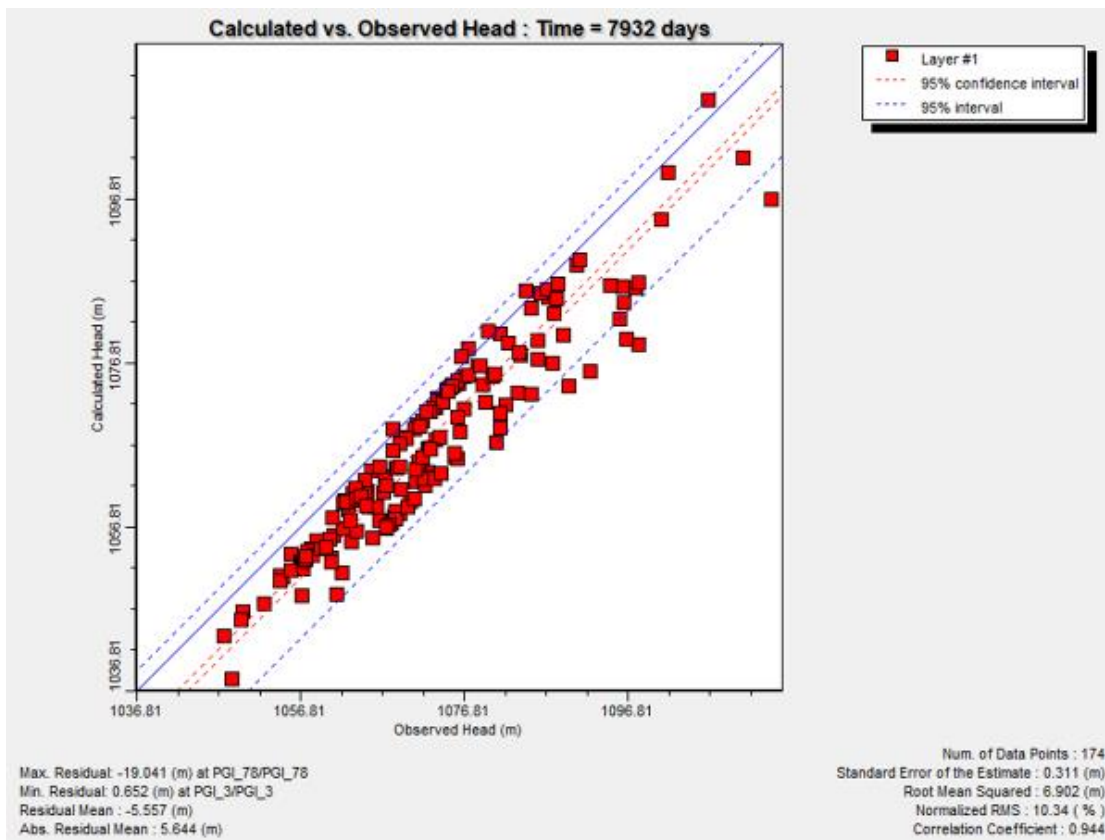


Figura 84 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 3)

También se puede observar en la figura 84 la depresión que sufren las líneas equipotenciales de la elevación del nivel estático y la dirección del flujo que cambian de dirección hacia las zonas de mayor abatimiento hacia la parte centro-sur de la ciudad, zona del acuífero donde se registran las mayores extracciones esto para el periodo 2014-2018. En la parte sur de la ciudad donde se planteó la operación de la batería de pozos las curvas de igual elevación estática sufren una marcada diferencia sobre el área de la batería acentuándose un gran abatimiento esto para el periodo 2018-2030 como lo vemos en la figura 85.

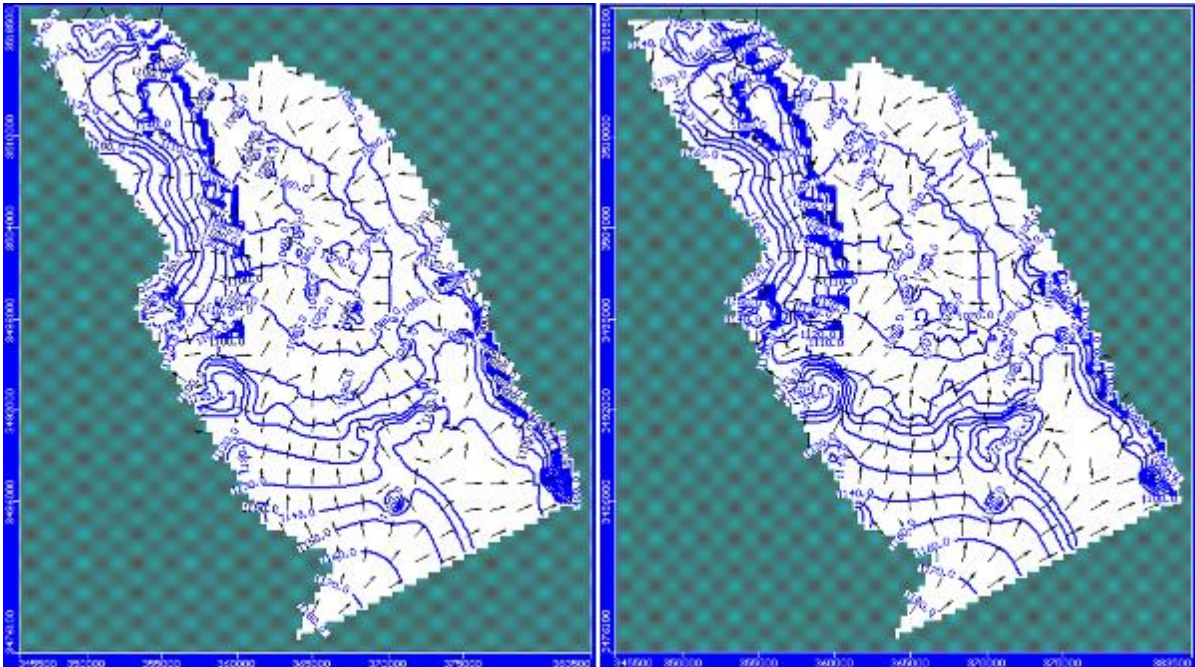


Figura 85 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2018 (Esc 3)

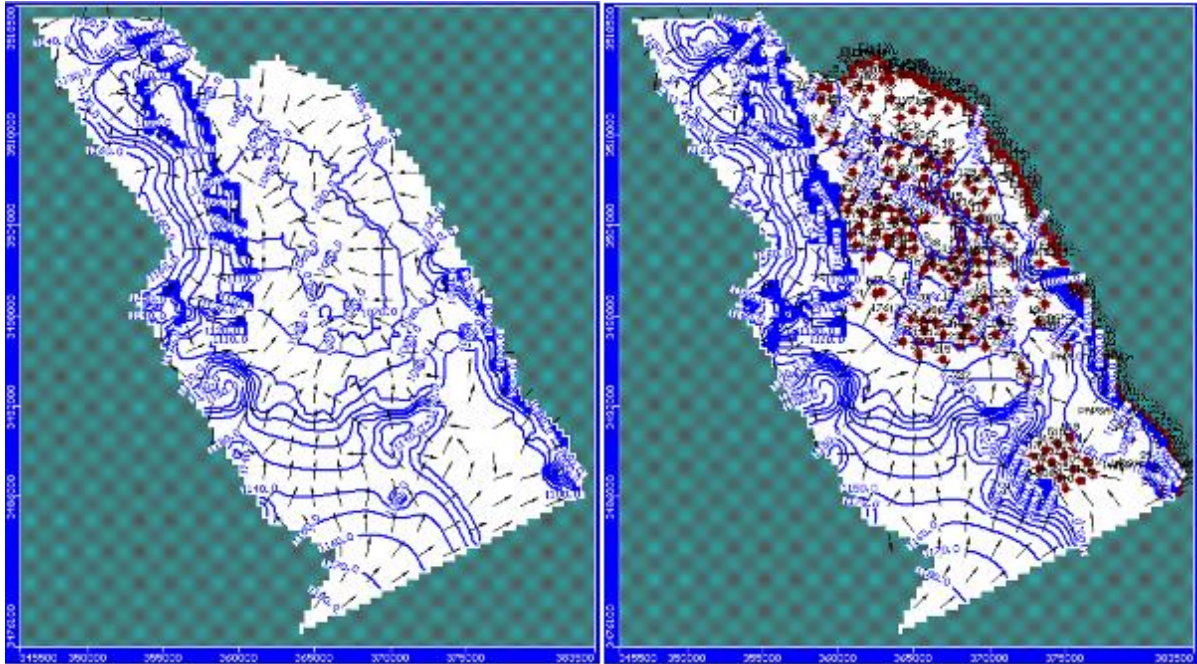


Figura 86 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2018-2030 (Esc 3)

En la figura 86 se comparan los cortes 2018-2030 donde se muestran 2 secciones transversales sobre la columna 68 donde apreciamos que para el año 2018 empezaba un cambio en la dirección de flujo principalmente sobre las zonas de bombeo, moviéndose principalmente hacia los pozos 235 y 178 pozos con un bombeo real sin que se tuvieran abatimientos importantes, para la simulación matemática del año 2030 hay un drástico cambio en las direcciones de flujo principalmente a partir de la entrada en operación de la nueva batería de pozos este cambio de dirección se da hacia los pozos de la batería por el intenso bombeo a que esta sometidos apreciándose un gran cono de abatimiento sobre el pozo 503, La simulación de este posible escenario de explotación produjo resultados poco alentadores, la batería de pozos colocados al sur de la ciudad, en su mayoría secan el entorno del filtro o ranurado, mientras que en la 4, secan incluso, la primera capa.

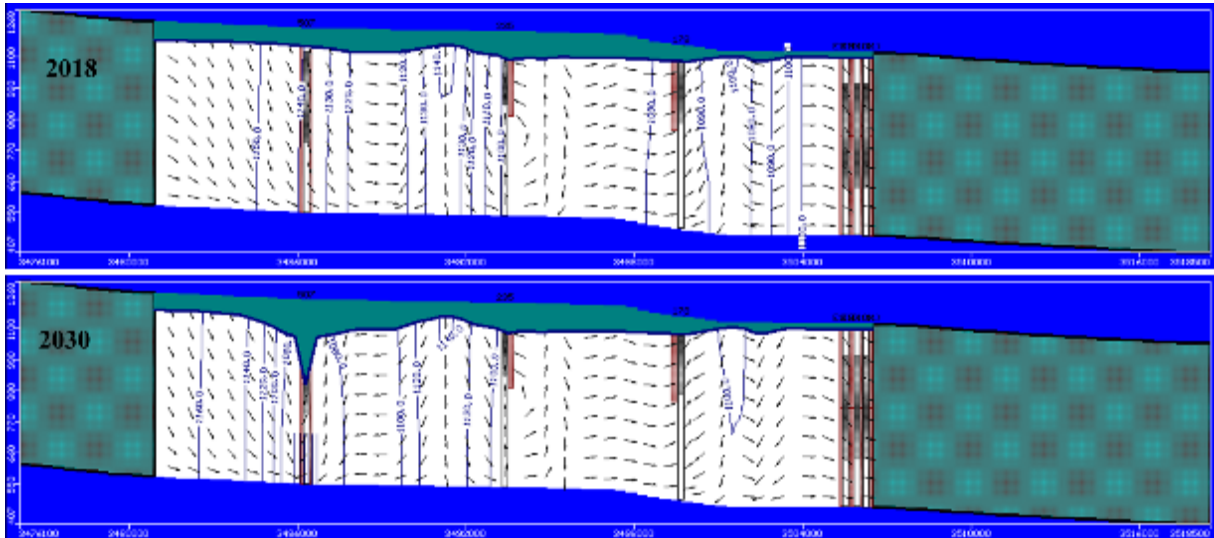


Figura 87 Cortes transversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2018-2030

4 DISCUSIÓN

El desarrollo de las áreas urbanas afecta significativamente el ciclo hidrológico natural, principalmente en lo que corresponde al agua superficial y subterránea, en donde el principal factor de cambio es el proceso de urbanización que evoluciona en varias etapas en el desarrollo de una ciudad. Cada etapa afecta de manera particular y significativa a los acuíferos. En la problemática del desarrollo de la ciudad no se consideraron durante la planeación y desarrollo de los centros urbanos los escenarios futuros de su expansión en lo que respecta a la disponibilidad de agua. Los conceptos, metodologías y experiencias sobre medidas de prevención y mitigación de impactos relacionados al agua subterránea, deben ser analizados aplicando la hidrología urbana como parte integral de la gestión ambiental en áreas urbanas.

El desarrollo urbano (DU), así como el medio ambiente (MA) son conceptos integrales desde una perspectiva de planeación. No podemos separar el desarrollo urbano de la planeación, de la economía, de la sociedad y del medio ambiente por ser un concepto integral holístico, los

cuales son interdisciplinarios y están integrados en un paquete de análisis de estudio y cada uno tiene su propia vertiente. Sociedad y planeación urbana buscan la calidad de vida de los ciudadanos por lo que se integra en la búsqueda de un desarrollo urbano sustentable.

Para hablar de desarrollo urbano sustentable se tiene que pensar en equilibrio del desarrollo desde la perspectiva de la infraestructura, de las clases sociales y del cómo se integra la planeación urbana en el DU y MA los que son conceptos básicos para lograr calidad de vida, y si se logra conservar el equilibrio del desarrollo urbano se puede aspirar a tener sustentabilidad.

Logrando la sustentabilidad ambiental entonces la sociedad se empodera del aspecto del desarrollo urbano y la planeación, y la sociedad es la que planea y la que define si destruye el medio ambiente o lo conserva, por lo que si lo conserva se tendrá una mejor calidad de vida. Un ejemplo claro en la ciudad es el desarrollo habitacional en el sur poniente llamado Riberas del Bravo que no tuvo una adecuada planeación y ahora sus habitantes enfrentan las consecuencias de hundimientos, asentamientos y violencia, que se genera en la zona porque no se tomaron en cuenta los conceptos básicos de MA y un DU y se perdió el equilibrio.

La persona que vivieron en décadas pasadas, añoran como era la vida cuando se tenían grandes corredores llenos de árboles, esto era porque se tenía un equilibrio con el DU toda esa abundante vegetación de aquellos tiempos se acabó porque se perdió el balance entre los conceptos de DU y MU. Otro ejemplo claro de mala planeación es el desarrollo de Ciudad Universitaria de la UACJ, región de modelado hidrogeológico de esta investigación, en donde no se tomó en cuenta el MA y se urbanizó y prácticamente acabando con la vegetación natural, rompiendo con ello el equilibrio del lugar.

La disponibilidad de agua subterránea en el acuífero es buena a un plazo de 16 años según lo demostrado por los escenarios en lo que respecta a la mancha urbana de Ciudad Juárez debido a que el proceso de recarga se modifica principalmente por la impermeabilización de la superficie, debido a la urbanización, produciéndose una entrada indirecta diferente a la de las en zonas rurales, Actualmente, se tiene menos experiencia sobre la recarga en áreas urbanas y la existencia de diferentes fuentes como puede ser: infiltración en grietas, pozos de agua pluvial, lagunas, letrinas y red de alcantarillado y fugas del sistema de suministro, complican el escenario para determinar un volumen aproximado a la realidad. de acuerdo con los aforos de la Dirección Técnica de la JMAS, son del orden de 23%. considerando que un 80 % del volumen de fugas se logra infiltrar al acuífero. La cuantificación detallada de los procesos de infiltración en áreas urbanas es casi imposible debido a la falta de datos, la gran variabilidad y la extrema no linealidad de las propiedades hidráulicas de los sedimentos en la zona no saturada. La aplicabilidad y flexibilidad de los balances aproximados son útiles para evaluar la recarga.

Para la zona sur oriente la disponibilidad de agua subterránea es muy poca, por la pobre recarga, aunque el valor de precipitación de 265.3 mm anuales, la recarga difusa por infiltración y percolación de las escasas lluvias en la superficie del valle tiende a ser poco o nula. Por lo que resultaría poco viable que la ciudad siguiera creciendo hacia esa zona de la ciudad porque secaría rápidamente los pocos pozos del área.

El desarrollo urbano y su relación hídrica (hidrología Urbana) a escala micro cuenca con una urbanización masiva provoca, que el agua superficial corra por las calle pavimentadas en vez de arroyos naturales, provocando el aumento de riesgos hidrometeorológicos y con ellos inundaciones, este concepto de hidrología urbana reduce también las área de recarga en la

ciudad y una destrucción de la infraestructura urbana, pero todos estos escenarios negativos podrían modificarse haciendo uso de técnicas ya probadas como lo son la tecnologías verdes, la cosecha de lluvia, la de promover pavimentos permeables en los estacionamientos de los grandes centros comerciales lo que serían puntos de recarga naturales al acuífero distribuidos por toda la ciudad, trasformando un problema en un beneficio, a una solución tanto de los problemas de inundación como de recarga.

En lo que respecta a la sustentabilidad hídrica, cuidar y preservar el recurso agua es clave, y se conoce que el acuífero tiene una gran cantidad de agua, pero no toda es de buena calidad. La excesiva explotación del agua subterránea es la consecuencia lógica de una densidad poblacional alta o de prácticas y costumbres ineficientes, originando a su vez serios problemas de calidad y cantidad en el agua almacenada en los acuíferos. Los principales problemas son: descenso y ascenso del nivel estático a lo largo del tiempo, donde hay grandes abatimientos y altos bombeos hay mayor deterioro de la calidad, área impactadas desde un punto de vista de calidad y no de cantidad porque el acuífero va a seguir funcionando, porque se tiene un aproximado de 2800m de profundidad, entre más abajo el agua es de menor calidad es decir que el agua se mide por su tiempo de residencia, lo que tendría un alto costo el de potabilizarla que impactaría a la población de más escasos recursos.

Una gestión inteligente debe tener claro que el agua subterránea es un recurso limitado, por tanto, debe hacer todo lo necesario para su aprovechamiento sostenible. El objetivo de la gestión debe ser proteger, utilizar, reciclar y verter el agua en condiciones ambientalmente satisfactorias, procurando su disponibilidad a las futuras generaciones, además debe involucrar políticas públicas, decisiones sociales y tecnologías limpias.

Por lo que hay que reducir de la extracción, reciclar las aguas residuales, subsidio para la optimización de sistemas de riego, determinación de la vulnerabilidad de acuíferos, limitar las áreas con alta densidad de viviendas, control de ubicación de tiraderos y rellenos sanitarios, así como su monitoreo y gestión. Se deben mejorarse los sistemas de distribución de la red de agua y drenaje.

El uso de modelos integrales de gestión del agua en la ciudad cuenta con un desarrollo económico acelerado, para así gestionar ambientalmente el recurso “agua subterránea” en el ciclo hídrico urbano.

En este trabajo de investigación se estableció una relación entre la dirección del flujo del agua subterránea con el desarrollo urbano de Ciudad Juárez Chihuahua. Para ello se integró toda la información disponible del acuífero Bolsón del Hueco, un acuífero compartido binacionalmente con los Estados Unidos de América. La información que se encontró es confiable pero intermitente por lo que se limitó a trabajar únicamente la parte norte del acuífero donde se encuentra la mancha urbana de la ciudad, con un tiempo limitado para realizar la simulación, donde los datos estaban completos (2008-2014) con lo que se obtuvo un modelo muy robusto con más de 170 pozos lo que dio como resultado una calibración del modelo matemático aceptable y así poder plantear los escenarios futuros al 2030. Un segundo análisis paralelo fue el crecimiento demográfico, para lo cual se recopiló la información disponible, y se realizó un análisis exhaustivo de la población y se presentó un resumen del comportamiento del crecimiento de la población en los últimos 115 años de Ciudad Juárez, Chih., teniendo alta y baja en el crecimiento de la población, pero siempre de forma ascendente, además de analizar prospectivamente la población utilizando para ello diferentes métodos estadísticos inclinándonos a usar la proyección que realizó el Consejo Nacional de

Población (CONAPO) por ser la más acertada en sus pronóstico por la serie de variables que utiliza, para acomodar y ubicar a esta población geográficamente dentro de la ciudad se decidió usar los escenario prospectivos que realizo el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). Se decidió usar esta distribución porque identificando las áreas hacia dónde dirigir el crecimiento urbano, sujetándose a los distintos lineamientos de orden federal en materia de desarrollo urbano y vivienda y sobre todo respetando las reservas naturales, determinando las áreas donde se puedan albergar a la nueva población, se consideraron varios aspectos, como el suelo vacío (baldíos) de una y más hectáreas, las rutas troncales (corredores urbanos) y troncales de transporte público entre otros. Tomando en cuenta este escenario demográfico se realiza un modelo matemático del acuífero proponiendo 3 posibles líneas de investigación, los escenario propuestos se plantearon por tener una relación directa con el posible desarrollo urbano que fuera sustentable, al tener los resultados de los tres escenario y la calibración del tiempo presente nos ofrece un panorama muy distinto al que se viene manejando, en el cual se nos dice que el acuífero esta extremadamente sobreexplotado, principalmente por las autoridades encargadas de administrarlo, lo cierto es que con este modelo y sus escenarios nos muestra un panorama muy distinto donde pese a que hay abatimientos importantes bajo la ciudad y las direcciones de flujo naturales han ido cambiando con el tiempo nos muestra un acuífero en un estado estable, con el resultado de los 2 primeros escenarios los resultados son favorables para desarrollar infraestructura urbana dentro de la ciudad, los descensos de los niveles estáticos están entre 0.32 y 0.42 m para un escenario de 16 años, con una mínima variación de las direcciones de flujo por lo que consideramos que el acuífero se mantendrá estable pese al aumento de población de aproximadamente 194,835 habitantes, resultando desfavorable para el acuífero el escenario 3 donde se propone una batería de pozos al sur de la ciudad planteado para poder dotar a la

población futura de agua potable y no aumentar o perforar pozos nuevos dentro de la mancha urbana, esta batería según la simulación traería fuertes abatimiento en la zona y cambiaría drásticamente las direcciones de flujo, secando la primera capa del acuífero alrededor de varios pozos en los primeros años de simulación, incluso invertiría el flujo del agua de Estados Unidos de América a México, por lo que este escenario se descarta. No obstante, de los buenos resultados, se reconocen algunos problemas que deben analizarse para evitarlos o reducirlos en trabajos posteriores. Se describen brevemente alguno de ellos de ellos. Para este estudio se observa que la relación con el desarrollo urbano y la disponibilidad tiene una fuerte relación, entre más población menos disponibilidad, entre más dispersa la ciudad menos disponibilidad esto quedó demostrado por los resultados de los escenarios propuestos.

Pese a que el modelo tiene buenos valores de calibración la recarga siempre ha sido tema de discusión en estudios anteriores por lo que en nuestro modelo se utilizaron los usos de suelo para estimar la recarga según su tipo, en la zona urbana se utilizó las entradas por pérdidas en sistemas de agua potable y alcantarillado, así como entradas por flujo horizontal para la zona agrícola se utilizaron las entradas de retorno por riego.

Para la zona sur oriente la disponibilidad de agua subterránea es muy poca, por la pobre recarga, aunque el valor de precipitación de 265.3 mm anuales, no se pueden aplicar métodos empíricos para estimar la evapotranspiración real, que permita a su vez el cálculo de la infiltración a través de un balance hidrometeorológico, en este tipo de condiciones climáticas la recarga difusa por infiltración y percolación de las escasas lluvias en la superficie del valle tiende a ser poco o nula.

Se recomienda usar programas especializados como lo es el Soil Water Assessment Tools (SWAT) para tener una recarga más efectiva pasada por una calibración, y así descartar

cualquier error. Otra problemática fue el no tener información del lado americano sobre todo lo relacionado con el bombeo para estimar cuanto sale y entra entre la frontera del modelo, y por último se recomienda hacer un modelaje de todo el acuífero para tener un panorama completo de lo que ocurre en la totalidad del acuífero.

Hay que resaltar que la parte que se modela la extracción de agua subterránea es para uso urbano el acelerado crecimiento de la ciudad absorbió casi por completo en la primera sección del distrito de riego 009 Valle de Juárez por lo que lo poco que se siembra en la parte sur poniente de la ciudad se hace con agua del tratado de 1906 ya que los pozos que se tenían concesionados por Conagua ya están fuera de operación

El resto de los pozos en el área agrícola del Valle de Juárez Conagua les tiene concesionados 466 Mm³ de los cuales los agricultores utilizan únicamente 3.714 Mm³ Por lo cual se extrae actualmente muy poca agua para fines agrícolas en comparación a décadas pasadas. Esto se debe a que volumen requerido para las zonas agrícolas, es cubierto con aguas superficiales de que se dispone en gran parte distrito de riego, por conceptos de Agua de Convención de 1906 y de Aguas Residuales tratadas que se emplean para el riego.

En lo que respecta al modelo matemático predictivo Rubín (2003), nos dice que el paradigma que ofrece la hidrogeología estocástica es que un buen modelo es aquél que valora con precisión la incertidumbre asociada con las predicciones, y que proporciona asintóticamente mejores límites de desempeño en la medida en que se enriquecen las bases de datos.

Un análisis completo de incertidumbre debe incluir los errores del modelo (estructura) y los errores en los parámetros, los primeros abordan las discrepancias entre el modelo conceptual y la realidad, y los segundos cuantifican las limitaciones del modelo para explicar las

observaciones. Rubin aduce que esto reemplaza al paradigma determinístico, el cual establece que un buen modelo es aquél que reproduce con exactitud la realidad, y a la pregunta de ¿por qué el enfoque determinístico es inferior? respondió, porque, aunque se trata de un concepto noble en sí mismo, no se puede materializar.

Por su parte, Gómez-Hernández (2003) advirtió que el problema principal en los modelos que tratan de incorporar la heterogeneidad de las propiedades hidráulicas de una manera realista con información escasa, es la imposibilidad de determinar una representación heterogénea única que sea consistente con los datos disponibles; siempre hay representaciones alternativas que son igualmente consistentes y por tanto igualmente plausibles, lo que da lugar a una incertidumbre acerca de la representación del parámetro y de las predicciones efectuadas con el modelo.

Chaves et al., (2006) por su parte dice que las respuestas puramente determinísticas a los problemas hidrogeológicos y ambientales del mundo real ya demostraron sus deficiencias, ha sido el de aprovechar el determinismo principios físicos fundamentales contenido en la ecuación de flujo de agua subterránea (uso de MODFLOW), en combinación con el enfoque estocástico de estimación de parámetros y de análisis de incertidumbre que proporcionan los códigos inversores (uso de PEST).

De lo anterior se desprende que el ensayo y error, como procedimiento único de calibración, ha quedado rebasado por los modernos enfoques y desarrollos de la modelación aplicada. El uso del ensayo y error, sin el acompañamiento de un código inversor, es anacrónico y debe evitarse en todo proyecto de relevancia económica, social o ambiental, en particular en aquéllos relacionados con la planeación y la gestión de los recursos hídricos.

5 CONCLUSIONES

El presente estudio revela información importante sobre las condiciones presentes y futuras del Acuífero Valle de Juárez de proyecciones de consumo del agua subterránea, Los procedimientos empleados en el análisis geoestadístico, validados resultaron apropiados para realizar el análisis estructural de las diferentes variables estudiadas y el de su comportamiento espacial. Se analizaron para este trabajo dos variables importantes, el crecimiento demográfico y el estudio hidrogeológico del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez). Se realizó un recorrido por la historia demográfica del mundo, analizando su evolución desde el año 8000 AC al 1900 que contaba con 1634 millones de habitantes, para el 2015 la población aumento a 7349.42 millones de habitante con una prospección al 2050 de 7818 mh, el mismo análisis se realizó para la población de México, teniendo al 2015 119.5 millones de habitantes, con una prospección para el 2050 de 150.87mh.

Para Ciudad Juárez Chihuahua se tiene un resumen de cómo se ha comportado el crecimiento de la población en los últimos 115 años de la cabecera de Ciudad Juárez, donde en 1921 se puede apreciar el incremento en las décadas, así como la tasa de crecimiento media anual presentada. Se observa que la mayor tasa de crecimiento ocurrió en el año de 1995, con un 4.75%. Históricamente Ciudad Juárez se ha caracterizado por sus niveles altos de crecimiento de población debido principalmente, a la constante llegada de inmigrantes a la ciudad. La población de la ciudad para 1900 era apenas de 8218 hab.

A pesar de todos los problemas que ha tenido que enfrentar Ciudad Juárez su crecimiento demográfico logro despuntar 1.04% en 2015 con una población de 1,391,180 hab. Se espera que para el año 2030 se llegue a tener una población de 1,593,238 habitantes según la proyección de CONAPO donde el crecimiento sería de forma lineal. En lo que respecta al

estudio hidrogeológico del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez), Existe consistencia en los valores obtenidos del procesamiento de las variables: superficie del terreno, capas, transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y niveles piezométricos, en las zonas del acuífero donde existe información básica, en cantidad y calidad, referente a topografía, litología, ubicación de filtros, caudales, abatimientos, niveles observados.

Se logró reproducir en el modelo de simulación matemática el comportamiento hidráulico de los niveles piezométricos a partir de 2008 hasta el año 2014. La calibración del modelo se realizó al comparar las cargas hidráulicas medidas en campo y las estimadas por el modelo, obteniendo de ello un error cuadrático medio normalizado $nRMS=1.45\%$ referente al año 2008 y para 2014 un $nRMS=5.29\%$. Existe muy buena correlación entre los niveles generados por el modelo y los observados en campo.

La configuración piezométrica realizada en campo en 2008 no refleja desplazamientos bruscos en sus direcciones equipotenciales con respecto a las configuraciones piezométricas referentes a años anteriores, por lo que permite suponer que el acuífero dispone de estabilidad, en base a la evidencia presentada, la evolución sufrida por el nivel estático en el período comprendido entre 2008 y 2014 ha ocasionado que la profundidad al nivel estático bajo Ciudad Juárez varíe en promedio los 30 m esto debido al bombeo del agua subterránea para garantizar el suministro de agua potable para una población que cada día va en aumento, excepto en las Riberas del Río Bravo donde las profundidades son generalmente menores de 10 m. La profundidad del nivel estático en Ciudad Juárez en las últimas décadas en tendencia ha sido un descenso en los niveles, los mismos que se presentan en hidrogramas que muestran la evolución piezométrica en zonas relevantes, como lo es la zona con mayores abatimientos.

Es importante resaltar que en tiempos recientes el descenso se ve compensado con un cambio de pendiente en los hidrogramas principalmente en las zonas norte y centro de la ciudad, se puede considerar en forma general que se está tendiendo a una recuperación moderada de niveles del agua en el acuífero en algunas zonas, pero queda lejos de ser un alivio en la explotación del acuífero.

La extracción de agua subterránea ha jugado un papel determinante en la historia del acuífero Valle de Juárez, en tiempos de "predesarrollo" en Ciudad Juárez, Chihuahua la extracción en el año de 1903 era mínima, el agua subterránea está fluyendo esencialmente de norte a sur en Nuevo México y Texas hasta que llega al Río Grande, cuando gira hacia el sureste, las líneas de flujo seguían la corriente del Rio Bravo, de manera natural por ser la parte más baja de las ciudades de Juárez y El Paso, la dirección del flujo de agua subterránea en la década de los 90 se observa un importante cono de abatimiento en la parte central de Ciudad Juárez causado por un bombeo intenso moviéndose el flujo hacia ese punto en respuesta a dichas extracciones, hay que tomar en cuenta que antes de 1960, el agua subterránea fluía de Ciudad Juárez a El Paso, y a partir de 1960, por el aumento del bombeo en Ciudad Juárez, ha dado como resultado un cambio de esta tendencia y ahora el agua subterránea fluye de El Paso a Ciudad Juárez. Es por lo que el agua subterránea tiende a fluir al área central de la ciudad donde los abatimientos son más fuertes y lo suficientemente grandes como para revertir el gradiente hidráulico natural que tendía a fluir a lo largo de la cuenca con rumbo al Río Bravo.

Actualmente los flujos en la parte sur de la ciudad son de Ciudad Juárez a el paso Tx. Desde el Fraccionamiento Riberas del Bravo hasta Porvenir, esto debido a la poca extracción de agua de los pozos concesionados para la agricultura, al exceso de riego que mantiene al nivel estático entre 3 y 5 metros en promedio. Hay una zona de transición entre Riberas del Bravo

y Zaragoza donde los flujos se invierten y entra agua al área urbana del Paso Tx. a Ciudad Juárez, como lo mencionamos anteriormente es por el intenso bombeo que se tiene en la parte central de la ciudad, que están jalando esos flujos a las zonas abatidas.

Se ha tratado de remediar la sobre explotación reduciendo caudales dejando de aprovechar algunas zonas del acuífero donde se tienen abatimientos, y aprovechando otros con la perforación de nuevos pozos, el descenso de los niveles estáticos no es generalizado en todo el acuífero ya que el sureste de Ciudad Juárez el nivel estático se mantiene en 4 metros posiblemente por la recarga por medio de los excedentes de las aguas de riego con agua residuales.

El proceso de simulación del comportamiento del acuífero bajo diferentes escenarios de explotación reveló que el escenario 1 es el que menos efectos perjudiciales produce a la sostenibilidad del acuífero es el de mantener la situación de extracción actual, teniendo un abatimiento de los niveles estáticos en promedio de 5.25 m aproximadamente 0.32 m por año. Sin embargo, en este escenario no contempla el aumento de población y por lo tanto la extracción actual de agua subterránea no sería suficiente para abastecer a la población por lo que este escenario no es viable para un desarrollo urbano sustentable.

El resultado de la simulación 2 al aumentar el bombeo de extracción máxima en 52,605 m³/día, correspondiente a aumentar 194,835 habitantes distribuidos en 16 años de simulación, teniendo un abatimiento de los niveles estáticos en promedio de 6.79 m aproximadamente 0.42 m por año. De mantenerse el actual ritmo de extracción al año 2014 se predice que no se presentarán abatimientos de mayor consideración y los niveles

piezométricos en el centro de la ciudad se mantendrán estables; por el contrario si se tiende a incrementar el bombeo por cualquier otra situación, se incrementarían a futuro los efectos negativos al acuífero como lo sería el de secarse el área cercana a los tramos ranurado de los pozos o inclusive secar la primer capa del acuífero que traería consecuencias graves a la población por la escases del vital líquido, en conclusión para este escenario 2 se cumple con los requisitos de sostenibilidad que se busca para en desarrollo urbano sostenible y da cabida a que la ciudad se desarrolló hacia dentro de la misma el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) con una sustentabilidad hídrica comprobada por esta simulación.

Para el escenario 3 contempla perforar una batería de 20 pozos fuera de la mancha urbana con un caudal de extracción de 1 (m^3/s) esta batería de pozos empezara operaciones hipotéticamente el 15 de Julio del 2018 para cubrir la demanda de agua potable de la población futura del 2018/2030 con un incremento de población de 145,674 habitantes con un consumo estimado de 39331.77 (m^3/d), los resultados para este escenario no fueron los esperados las simulaciones muestran abatimientos de gran magnitud en la batería de pozos propuesta con respecto a las condiciones iniciales, los pozos que actualmente bombean activamente en acuífero Valle de Juárez y los agregados en el 2018 se abaten en promedio 5.64m es decir que, en 16 años en las condiciones actuales y ficticias el nivel estático desciende en promedio poco más de 5 m. prácticamente se tiene una disminución de 0.35m por año de su nivel estático.

Además, hay un drástico cambio en las direcciones de flujo principalmente a partir de la entrada en operación de la batería de pozos este cambio de dirección se da hacia los pozos de la batería por el intenso bombeo a que esta sometidos apreciándose un gran cono de abatimiento sobre el pozo 503. La simulación de este posible escenario de explotación

produjo resultados poco alentadores, la batería de pozos colocados al sur de la ciudad, en su mayoría secan el entorno del filtro o ranurado, mientras que en los 5 pozos de los propuestos secan incluso la primera capa, estos resultados demuestran que la propuesta de proponer una batería de pozos fuera de la ciudad para dotar de agua potable a la población futura de la ciudad no es sustentable a largo plazo.

Actualmente, el acuífero Valle de Juárez, ya presenta un abatimiento importante del nivel del agua subterránea, aunque se encuentra estable actualmente, persiste el riesgo de que se agraven los efectos perjudiciales causados por la explotación intensiva, tales como la inutilización de pozos y el incremento de costos de bombeo, por lo que es necesario seguir con este tipo de estudio de prospección simulando alguno escenarios más para así proteger al acuífero de un significativo desequilibrio hídrico que pudiera llegar a afectar las actividades sociales, ambientales, económicas y políticas, puesto que la toma de decisiones no obedece a una adecuada planeación urbana en equilibrio con el medio ambiente.

6 BIBLIOGRAFIA

Aboites Aguilar, L., Birrichaga Gardida, D., & Garay Trejo, J. (2010). El manejo de las aguas mexicanas en el siglo XX. enB. Jiménez, ML Torregrosa y L. Aboites Aguilar (editores). El agua en México: cauces y encauces, Academia Mexicana de Ciencias, Comisión Nacional del Agua, México, 21-50.

Alcañiz, M. (2008). Cambios demográficos en la sociedad global. Papeles de población, 14(57), 227-255

Alfaro, P. E. M., Santos, P. M., & Castaño, S. C. (2006). Fundamentos de hidrogeología. Mundi-Prensa Libros.

Alvarez, H.J., y Buckner, A.W., (1980), Explotación de aguas subterráneas en la región de El Paso, Texas con énfasis en los recursos del Valle bajo de El Paso: Departamento de Recursos Hidráulicos de Texas, reporte 246, p 346.

Anderson, M. P., and Woessner, W. W., (1992). Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport. Editorial Academic Press - UK, 381 p.

ASTM Intenational. (2002). Standard guide for conducting a sensitivity analysis for a groundwater flow model application. D 561194.

Barnett, B. G., and Muller, J., (2008). Upper Condamine Groundwater, Model Calibration Report. A report to the Australian Government from the CSIRO MurrayDarling Basin Sustainable Yields Project. CSIRO, Australia. 51 p.

Betancur, t., & Palacio, c. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (caso de aplicación: bajo cauca antioqueño). Dyna, 76(160), 39-49.

Bossel, Hartmut (1999), Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications, International Institute for Sustainable

Carrera,J.,and S.P.Neuman (1986). Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 2. Uniqueness, Stability, and Solution Algorithms, *Water Resources Research* 22(2): 211-227

Carrillo, Joel, E. Ducoig y R. Pérez (2005). Agua y desarrollo nacional. Alternativa Ciudadana 21, APN, enero-marzo.

Chávez, A., A. Pinales, R. Ducoing, and J.L. Cruz. (2006). Modelación aplicada a sistemas de acuíferos: enfoques y desarrollos en México. Guanajuato, Gto. Comision Estatal de Agua de Guanajuato 2006

Cervera Gómez, L. E. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. Estudios fronterizos, 8(16), 9-41.

COCEF, (1999) Plan Maestro de Agua Potable y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua (CNA). 2007. Disponibilidad. Agua subterránea. www.cna.gob.mx

COCEF, (2013) Actualización de Plan Maestro para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Juárez, Chihuahua.

Comisión Internacional de Límites y Aguas, (1989). Condición de las aguas subterráneas en el Valle de Juárez/El Paso: Hydraulics Branch, Planning División, p 43.

Comisión Nacional del Agua (CNA). (2000) El Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2025 de la Región VI, Río Bravo, Mexico

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2006). La gestión del agua en México. Avances y retos. México. CONAGUA. 249 p.

Comisión Nacional del Agua (CNA). (2007). Títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. www.cna.gob.mx

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2008). Actualización geohidrológica del Acuífero Valle de Juárez, chihuahua, México.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2010). Estadísticas del agua en México, edición 2010. México. CONAGUA. 249 p.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2015). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 0833 valle de Juárez, estado de Chihuahua México. CONAGUA.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (1997). Programa hidráulico gran visión del estado de Chihuahua 1996-2020. Gerencia estatal Chihuahua-CONAGUA. México.

Consejo Nacional de Población (CNP), (2010). Chihuahua: indicadores demográficos 2005-2030. www.conapo.gob.mx

Custodio, E. (1983). Principios básicos de química y radioquímica de aguas subterráneas. CUSTÓDIO e LLAMAS, MR, Hidrología subterránea. Barcelona. Ed. Omega.

Custodio, E. (2000). Effects of groundwater development on the environment. Águas Subterráneas. De Asiain Alberich, M. L., Ehrenfried, A., & del Real, P. P. (2007). El ciclo urbano del agua. *Ide@ Sostenible*, (16), 3.

Dávila Pórcel, R. A., & Gómez, H. D. L. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*, 63(3), 463-477.

De la O'Carreno, A., (1957). p 101 del Estudio Geohidrológico preliminar del Valle de Juárez y sus áreas circunvecinas, estado de Chihuahua: Mexico, D.F.

De la O'Carreno, A., (1958), Investigación de las condiciones hidrogeológicas subterráneas en Ciudad Juárez, Chihuahua aplicando geofísica eléctrica: México, D.F., p 55.

Dobrin, M.B., (1976). Introducción a la prospección geofísica: Me Graw Hill editores; Nueva York, p 630.

Doherty, J. (1994). *PEST: Model independent parameter estimation*, Watermark Numerical Computing, Australia.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2010. *The Wealth of Waste: The economics of wastewater use in agriculture*. Rome, FAO.

Federal, P. E. (1994). Ley General de Asentamientos Humanos. *Diario Oficial de la Federación*, (21-07-1993).

Fernández, T. M. A., (2004). Estudio y modelización de la contaminación del acuífero del Río Najerilla. Aplicación de la microextracción en fase sólida para la determinación de los contaminantes. Tesis Doctoral, Universidad de la Rioja, España. 415 p.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M., (2002). Protección de la calidad del agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. GW-MATE-Groundwater Management Advisory Team, en colaboración con Global Water Partnership, 117 p.

Gao, H. (2011). Groundwater modeling for flow systems with complex geological and hydrogeological conditions. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, 23-28.

García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la Rep. Mexicana): México, DF, Univ. Nal. Auton. México, Inst. Geografía, 35.

García, R. (2011). Interdisciplinaria y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*. 1 (1): 65-101.

García Estarrón E. Julieta, (2008). El proceso de expansión urbana y su impacto en el uso de suelo y vegetación del Municipio de Juárez, Tijuana, B. C., México.

Geo Fimex, S.A., (1970) Valle De Juárez, Chihuahua, Estudio Geofísico: Sociedad de Reconocimientos Geotécnicos Del Grupo S.R.G., Coyoacán, México, 16 p.

Gleik Peter, H., Sandra Postel L. y Jason Morrison (1996), *The Sustainable Use of Water in the Lower Colorado River Basin*, The Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security, Oakland, California.

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F.P. and van Beek, L.P.H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488: 197-200, doi:10.1038/nature11295.

González, A. M. (2011). La conmemoración del bicentenario de la Independencia y del centenario de la Revolución Mexicana desde la Universidad Nacional Autónoma de México. *Iberoamericana* (2001-), 11(42), 209-214.

Gómez-Hernández, J. (2003). Complexity, *Proceedings of MODFLOW and More 2003: Understanding through Modeling* International Ground Water Modeling Center, Golden, CO U.S.A.

Gómez, M. L. E. C. (2005). Diagnóstico geo-socioeconómico de Ciudad Juárez y su sociedad. *El Colegio de la Frontera Norte: Ciudad Juárez, México*, 355.

Gottschalk, j. (2013) *El desafío del desarrollo sustentable en America Latina*. Rio de Janeiro. Brasil

Grischek, T., Nestler, W., Piechniczek, D., Fischer, T., (1996). Urban groundwater in Dresden, Germany: *Hydrogeology Journal*, 4, 48-63

Hibbs, B. J. (1998). *Transboundary Aquifers and Binational Ground-Water Data Base*, City of El Paso/Ciudad Juarez Area. International Boundary and Water Commission and others.

Hibbs B., C. Eastoe, F. Philips y J. Hogan (2002), "Groundwater and Surface Water Salinization in the El Paso/Juarez Region. Thrust Area 2 Overview. SAHARA. Disponible en línea: http://www.sahra.arizona.edu/research/TA2/2_9.html

Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS). Información Técnica. (2006)

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez, JMAS, (1995). Diagnóstico de explotación del acuífero de la zona urbana de Cd. Juárez, Chih. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Juárez, estado de Chihuahua 33

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez, JMAS (1998). Modelo Matemático de Simulación Hidrodinámica del acuífero de la Zona Urbana de Ciudad Juárez, Chih.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez, JMAS, (2000). Estudio de Prospección Geofísica en la Zona de Terrazas. Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez, (JMAS, 2003). Estudio Geohidrológico en la cuenca del Arroyo Las Bandejas. (DTGEO-018/03).

JMAS (1997), "Proyecto de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Norte y Sur y Obras Complementarias de Alcantarillado de Cd. Juárez, Chihuahua", Formato Etapa II de COCEF, disponible en línea: www.cocef.com

JMAS (2000), "Alternativas presentadas en el Plan Maestro para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Ciudad Juárez".

JMAS de Juárez Moreno, G.A. y E. Rascón, (1995) Modelo Matemático de Simulación Hidrodinámica del Acuífero de la Zona Urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua., JMAS de Juárez., a finales del año de 1995

Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (pp. 6-A16). Reston: US Department of the

Heywood, C. E., & Yager, R. M. (2003). Simulated ground-water flow in the Hueco Bolson, an alluvial-basin aquifer system near El Paso, Texas (No. 2002-4108). Interior, US Geological Survey.

Hutchison, W. G. (2004). Hueco Bolson groundwater conditions and management in the El Paso Area. EPWU Hydrogeology Report, 04-01.

Hibbs, B. J., Boghici, R. N., Hayes, M. E., Ashworth, J. B., Hanson, A. T., Samani, Z. A., ... & Creel, B. J. (1997). Transboundary Aquifers of the El Paso/Ciudad Juárez/Las Cruces Region. Contract Report, Texas Water Development Board.

Hydrogeologic, W. (2006). Visual MODFLOW v. 4.2. Users Manual.

Instituto Municipal de Planeación e Investigación IMIP, (2016). Plan de Desarrollo Urbano Sostenible, Ciudad Juárez Chihuahua. México

Instituto Municipal de Planeación e Investigación. (2000). Plan de Desarrollo Urbano, Plan municipal de Desarrollo Urbano, Plan Sectorial del Agua y Plan de Desarrollo Urbano de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Iracheta, Alfonso. (1997). Planeación y desarrollo: una visión del futuro. Coedición entre la Facultad de Planeación Urbana y Regional (Fapur) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Gobierno del Estado de México, Plaza & Valdés Editores, con el apoyo del Programa de Investigación Metropolitana de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y el Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad de la Universidad Autónoma de México (UNAM).

Kashaigili, J. J., Mashauri, D. A., & Abdo, G. (2003). Groundwater management by using mathematical modeling: case of the Makutupora groundwater basin in Dodoma Tanzania. Botswana Journal of Technology, 12(1), 19-24.

Kearey, P., y Brooks, M., (1984). Introducción a la exploración geofísica: libros Blackwell, Oxford, p 296.

Kidd, J. (2002). Agua subterránea: un recurso de América del Norte. Taller de expertos en agua dulce de América del Norte. CEC-MCIS-Universidad de Toronto. 22 p

King, M., Carey, G., Abbey, D., Baechler, F., (2003). Groundwater and contaminant transport modelling at the Sydney tar ponds. IAH-International Association of Hydrogeologists, Conference Winnipeg, Canada. 8 p.

- Koepfen, W. (1948). *Climatología: con un estudio de los climas de la tierra*.
- Lacoste, Y. (2003). *El agua. La lucha por la vida*. Ed. Larousse. España. 126 p. OECD (1998), *Toward Sustainable Development: Environmental Indicators*. Francia, OECD.
- Lezama, José Luis. (1993). *Teoría social, espacio y ciudad*, 2da. ed., El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano, México.
- Logan, J. (1964). Estimating transmissibility from **routine** production tests of water wells. *Groundwater* 2(1): 35-37.
- Loucks, P. Daniel y John Gladwell S. (1999). *Sustainability Criteria for Water Resource Systems*, International Hydrology Programme, Cambridge University Press
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model (Vol. 6, p. A1). Reston, VA: US Geological Survey.
- Manzano-Solís, L. R., (2007). *Diseño de Base de Geodatos Censales Demográficos e Implementación Geomática de Indicadores Hídricos*. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. 201p
- Meyer, W.R., (1976) *Modelo digital para la simulación de los efectos del bombeo de aguas subterráneas en el Bolsón del Huevo, área de El Paso, Texas, Nuevo México y Geological Survey*, p 31.
- Neuman, S.P. (2003). Maximum *likelihood* Bayesian averaging of *alternative conceptúa* (mathematical models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17: DOHO. 1007/s00477-003-0151-7.
- Orr, B.R., y Risser, D.W., (1992). *Hidrogeología y efectos potenciales de la explotación de los recursos hidráulicos potables en la porción norte del Bolsón del Huevo, Condados de Doña Ana y Otero, Nuevo México y el Condado de El Paso, Texas: Informe de Investigación de Recursos Hidráulicos num. 91-4082 del U.S. Geological Survey*, p 92.
- Paredes Santaella, A. (2011). *Simulación de la operación de la poza la becerra con fines de preservación de humedales, flora y fauna del Valle de Cuatro Ciénegas*.

Perevochtchikova, Maria. (2009). Gestión del agua en la cuenca de México, coincide la cuenca superficial con la subterránea. México DF.

Ramos, C. y Lorda, J. (2004). “El Desarrollo de la infraestructura hidrológica en México.” En Jacobo Villa, Marco Saborio y Elsa Saborio (coord.): La gestión del agua en México: los retos para el Desarrollo Sustentable, pp. 65-80. México: Porrúa-UAM.

Raisz, E. (1964). Landforms of Mexico. Raisz.

Rejani, R., Jha, M. K., Panda, S. N., & Mull, R. (2008). Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resources Management*, 22(1), 23.

Rosales, V. M., & Sánchez, P. L. J. (2015). Sustentabilidad Urbana Planteamientos Teóricos y Conceptuales.

Rovey II, C.W., and D.S. Cherkauer (1995). Scale dependency of hydraulic conductivity measurements, *Ground Water* 33(5): 769- 779.

Rincon, C. et al. (2005). “Promoción de asociaciones de colaboración participativa para la conservación del recurso agua en la región Paso del Norte”, Paso del Norte Water Task Force (PNWTF), documento en revisión para su publicación en formato electrónico.

Rubin, Y. (2003). *Applied Stochastic Hydrogeology*. Oxford University Press, Inc.

Ruvalcaba, G. A., 2009. Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM. 107 p.

Sanders, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. 1st Edition. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.

Sandeen, W.M., (1954). Geología de la Cuenca Tularosa, Nuevo México, libro guía del sudeste de Nuevo México: Sociedad Geológica de Nuevo México, quinta conferencia de campo, p 81-88.

SAMPER, J. (1997). Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica.

Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 153-180.

SA, J. (s/f), (2016). Agua para un mundo sostenible. Datos y Cifras. Recuperado el 10 de abril de 2016, a partir de <http://www.agua.org.mx/biblioteca-tematica/gestion-del-agua/1332-disponibilidad/38934-agua-para-un-mundo-sostenible-datos-y-cifras>

Shiklomanov, I. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. International Water Resources Association, 25, 11-32.

Schwartz, F. W., and Zhang, H. (2003). Fundamentals of ground water. Ed. John Wiley & Sons, INC. 583 p.

Slichter, C.S., (1905). Observaciones de las aguas subterráneas del Valle del Rio Bravo: Documento de abastecimiento de agua num. 141 del U.S. Geological Survey.

Sisto, N. P. (2010). Manejo sustentable del uso de agua y crecimiento urbano. Ensayos Revista de Economía, 29(1), 23-38.

Strain, W.S., (1966). Fauna mamífera de las formaciones Blanca y del Pleistoceno, Condado de Hudsouth, Texas: Boletín del Memorial Museum num. 10 de la Texas University at Austin p 55.

Silva-Hidalgo, H., Aldama, Á. A., Martín-Domínguez, I. R., & Alarcón-Herrera, M. T. (2013). Metodología para la determinación de disponibilidad y déficit de agua superficial en cuencas hidrológicas: aplicación al caso de la normativa mexicana. Tecnología y ciencias del agua, 4(1), 27-50.

Spitz, K., and Moreno, J., (1996). A practical guide to groundwater and solute transport modeling. Ed. Wiley-Interscience. 461 p.

Todd, D. K. (1980). Groundwater hydrology 2ed. John Wiley.

TWDB-GAM, (2004). Groundwater Availability Modeling for the Queen City and Sparta Aquifers. Texas Water Development Board-Groundwater Availability Modeling. Incorporated, University of Texas Bureau of Economic Geology, y R.J. Brandes Company, Austin, Texas; 67 p.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), (2012). World's groundwater resources are suffering from poor governance. UNESCO Natural Sciences Sector News. Paris, UNESCO.

UNEP (United Nations Environment Programme), (2002). The World's International Freshwater Agreements. Nairobi, UNEP

U.S. Bureau of Reclamation de E.U., (1973). Recursos Hidráulicos del Condado de El Paso, Texas: Rio Grande Project, Nuevo Mexico - Texas Project Office, El Paso, Texas, p 97.

USCB (United States Census Bureau). (2012). International Programs. World Population.http://www.census.gov/population/international/data/worldpop/table_population.ph

2030 WRG (2030 Water Resources Group). (2009). Charting our water future: Economic frameworks to inform decision-making. Washington, DC, 2030 WRG

Valdez, Osvaldo. (2012). Determinación de la disponibilidad de agua subterránea del acuífero la muralla con la norma 011. México.

Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., Carrera, J., (1999). Gestión de las aguas subterráneas en zonas urbanas, conceptualización y modelación: aplicación a Barcelona (España), en Tineo, A. (ed.), Hidrología Subterránea: Tucumán, Argentina, Instituto Superior de Correlación Geológica, 153-160.

Verdejo, María Eugenia (2000). Desarrollo sustentable y sostenido: un reto para la economía. Reflexiones y avances hacia un desarrollo sustentable en México.

Vorosmarty, C.J.; P. Green; J. Salisbury and R.B. Lammers. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. Science 289:284-288.

Wagner, T., D.P. Boyle, M.J. Lees, H.S. Wheat, H.V. Gupta, and S. Sorooshian (2001). A framework for model development and application of hydrological models, Hydrology and Earth System Sciences, 5(1) 13-26.

Waterloo Hydrogeologic Inc. (1999). Users manual for visual Modflow. Waterloo Ontario Canada, 280 p.

Wilkins, D.W., (1986). Hidrogeología y análisis de los sistemas acuíferos regionales de las cuencas aluviales del sudoeste, porciones de colorado, Nuevo México y Texas, informe de investigación de recursos hidráulicos num. 84-4224 del U.S. Geological Survey, p 61.

Wirth, Louis. (2005). El urbanismo como modo de vida. [En Línea] Revista Bifurcaciones Núm. 2, otoño, 2005, Santiago de Chile, [Disponible en: http://www.bifurcaciones.cl/002/bifurcaciones_002_reserva.pdf].

Woessner, W. W., and Anderson, M. P., (1990). Setting calibration targets and assessing model calibration—Room for improvement: An example from North America. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling. Ed. K. Kovar USA. IAHS Pub. 125; p. 279–290.