

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERIA

MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA



**“Modelización Hidráulica de la Relación Acuífero-Río
Colorado en el Tramo FFCC-Vado Carranza como
Elemento para la Restauración de la Zona Riparia”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

PRESENTA:

DENNICE PÉREZ GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. JORGE RAMIREZ HERNANDEZ

Mexicali, B.C. Diciembre del 2008

AGRADECIMIENTOS

A Mis Padres

Irma y Agustín Que con su cariño, apoyo y comprensión incondicional me dieron las fuerzas necesarias para seguir adelante y el ejemplo de no desistir. Son mi mejor ejemplo de amor y sobretodo de lucha. Espero nunca defraudarlos y con todo mi corazón solo me cabe decirles padres míos....Los amo y Muchas Gracias!

A mi hermano

"Guty" Que puede decir hermanito... Solo que eres el mejor de los hermanos y que me siento orgullosa de ti. Te quiero mucho!!

A mis maestros

Dr. Jorge Ramírez Hernández que su sencillez y actitud fue el mejor ejemplo de éxito! Gracias "profe" por la dirección de esta tesis y que Dios lo bendiga siempre.

Maestros miembros del jurado Dr. Francisco Zamora Arroyo, M.I. Laura María Ruiz Medina, Dra. Concepción Carreón Díazconti y Dr. Jaime Alonso Reyes López. Le agradezco por sus correcciones que fueron clave para mejorar esta tesis!!

A mis Tíos

Tíos y tías que puedo decir, solo que me hace muy feliz el echo de ser su sobrina y darles mil gracias por el apoyo y su confianza.. Dios los bendiga siempre! Los quiero muchooo.

A mis amigos y amigas

A las "hijas del Río" ya estamos por finalizar una etapa mas de nuestras vidas.. Solo quiero decirles que las Quiero mucho y que fue todo un placer haber compartido con ustedes todo este tiempo de trabajo...Dios las bendiga!!

A aquellos amigos y amigas todos, que directa o indirectamente contribuyeron y ofrecieron su apoyo incondicional, no me cabe mas que darles las gracias del mundo.

A ti Angelito ...

Que bueno que viniste a Mexicali.....!! Llego un "Angel" a mi vida y me hizo feliz.....! Las palabras no bastan para decirte " Muchas Gracias" por tu apoyo y sobretodo amor... Te quiero muchooo!!

La realización de esta tesis ha sido posible gracias al apoyo y colaboración de las siguientes personas y organismos, a los cuales quiero expresarles mis más sinceros agradecimientos.

- ✦ *A la Universidad Autónoma de Baja California*
- ✦ *Al instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California*
- ✦ *Al Sonoran Institute y a Pronatura Noroeste por su aportación financiera y técnica para el desarrollo de esta tesis. Se agradece especialmente al Dr. Francisco Zamora y a Edith Santiago así como al SR. Guadalupe por su apoyo en la toma de datos de campo.*
- ✦ *Se agradece a la Comisión Nacional del Agua por habernos proporcionado los datos de nivelación del terreno en la zona de estudio.*
- ✦ *Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Así como USAID (United States Agency International Development) y a HED (Higher Education for Development). Por la beca proporcionada durante el periodo de estudio. Muchas Gracias!!*

1. INTRODUCCION

1.1 Localización del área de estudio.

El Estado de Baja California está situado en la región noroeste de la República Mexicana y en la parte septentrional de la Península del mismo nombre. El estado de Baja California limita al norte con la frontera de Estados Unidos de América, al este por el RC y el mar de Cortés, al sur por el paralelo 28 y al oeste por el océano Pacífico, (Figura 1).

El RC cruza los Valles de Mexicali e Imperial, ambos ubicados actualmente en su margen derecha, y los Valles de San Luís RC y Yuma en su margen izquierda. Tanto el Valle de Yuma como el de Imperial corresponden a terreno Norteamericano. En su paso a territorio nacional el RC forma parte de la frontera internacional entre México y Estados Unidos, desde el poblado Los Algodones hasta la ciudad de San Luís RC aproximadamente 34 km. Desde este punto hasta su desembocadura, el cauce del RC se ubica dentro del territorio mexicano y discurre por el Valle de Mexicali mostrando una pendiente muy baja y con un cauce muy sinuoso que ha sido rectificado y acotado para evitar posibles desbordamientos y daños a los pobladores de sus riveras. Los bordos de contención están separados entre sí de 500 a 1200 m, dejando al río transcurrir libremente sobre esta superficie conocida como corredor ripario.

El área de estudio comprende una porción de aproximadamente 12 km de longitud del RC y la superficie entre bordos de contención. Los límites aguas arriba y abajo del área de estudio están localizadas en el puente del Ferrocarril Mexicali-Puerto Peñasco Sonora en las coordenadas 32.233 de latitud norte y 115.05 de longitud oeste, y el cruce del RC con el vado de la Colonia. Carranza en las coordenadas 32.183 de latitud norte y 115.15 de longitud.

Toda esta superficie de la vega actual del RC ha sido poco utilizada para la agricultura y en general ha desarrollado vegetación tanto nativa como invasora condicionada únicamente a la disponibilidad de agua. Aguas arriba de la zona de estudio la vega del río (corredor ripario) esta concesionada para actividades agrícolas de forma mucho más intensa.

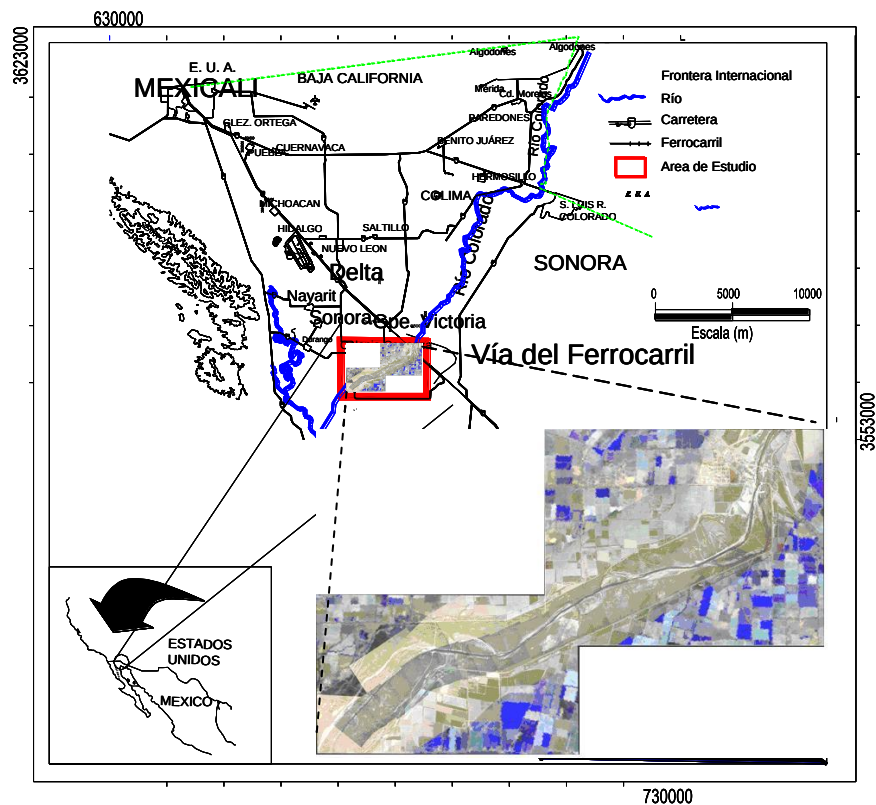


Figura 1. Ubicación del Área de Estudio

En la (Figura 2) se pueden observar el área de vegetación riparia entre bordos y la superficie parcelada, utilizada con fines agrícolas de forma intensiva, en ambos márgenes. En los flancos externos de ambos bordos de contención se construyeron canales de riego recubiertos por cemento. A su vez, se muestran los puntos en los que se construyeron los piezómetros de observación del nivel freático y las líneas que serán presentadas y discutidas como las secciones o secciones transversales.

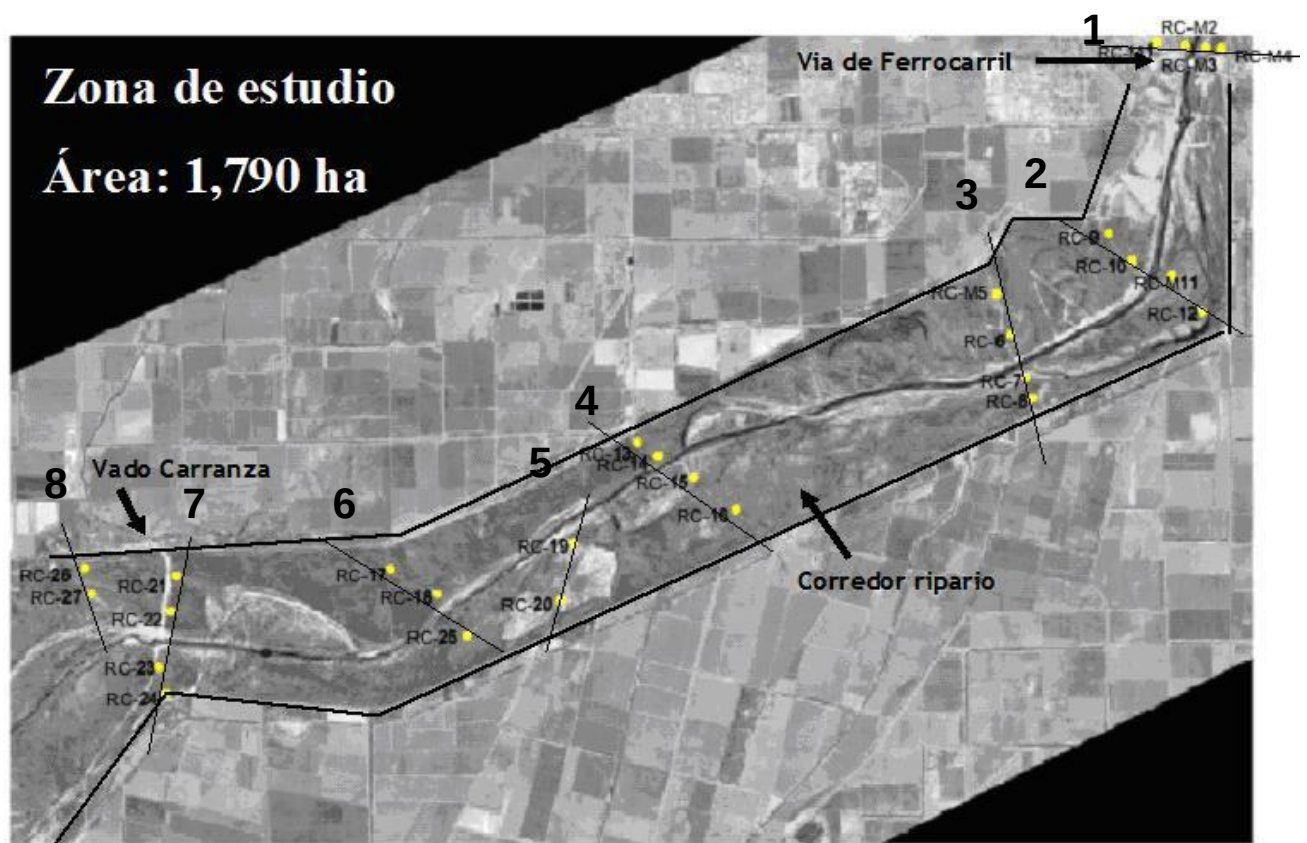


Figura 2. Imagen satelital mostrando la ubicación de los piezómetros de control y secciones transversales

1.2 Límites de la Zona de Estudio

Los límites de la zona de estudio son: al norte (aguas arriba del RC) el puente de la vía del ferrocarril que cruza la carretera (Figura 3a) y el vado Carranza, (Figura 3b). Este límite norte fue elegido porque a menos de 500 m aguas arriba el RC ya no contiene agua en su cauce y porque aquí se podría tener un buen control de la cantidad de agua que pasa por el RC, ya que se encuentra una estación hidrométrica de la Comisión Internacional de Límites y Aguas. Por su parte, el límite sur corresponde al vado carranza, en el que se han instalado tubos que funcionan como alcantarillas del vado y en los cuales es más fácil y preciso obtener el caudal, en caso de que éste se presente. A su vez, el acceso a la porción sur desde este punto es más complicado y la cantidad y frecuencia de agua en su cauce es menor.



a)



b)

Figura 3a. Foto del puente que limita al norte la zona de estudio, se observa el paso del ferrocarril sobre el puente. 3b Foto del Vado Carranza y la tubería que permite el paso del agua en el lecho del RC.

1.3 Antecedentes

El Río Colorado (RC) representa una importante fuente de agua para el suroeste de los Estados Unidos y noroeste de México. Nace en las montañas de Colorado y Wyoming, atravesando los estados de Utah, Arizona, Nevada, California, Baja California y Sonora. En México, abarca partes de Sonora y Baja California, (Figura 4). El RC recorre más de 2,300 km desde sus nacientes hasta el Delta, pasando en su camino por una variedad de ecosistemas. (WET, 2005).

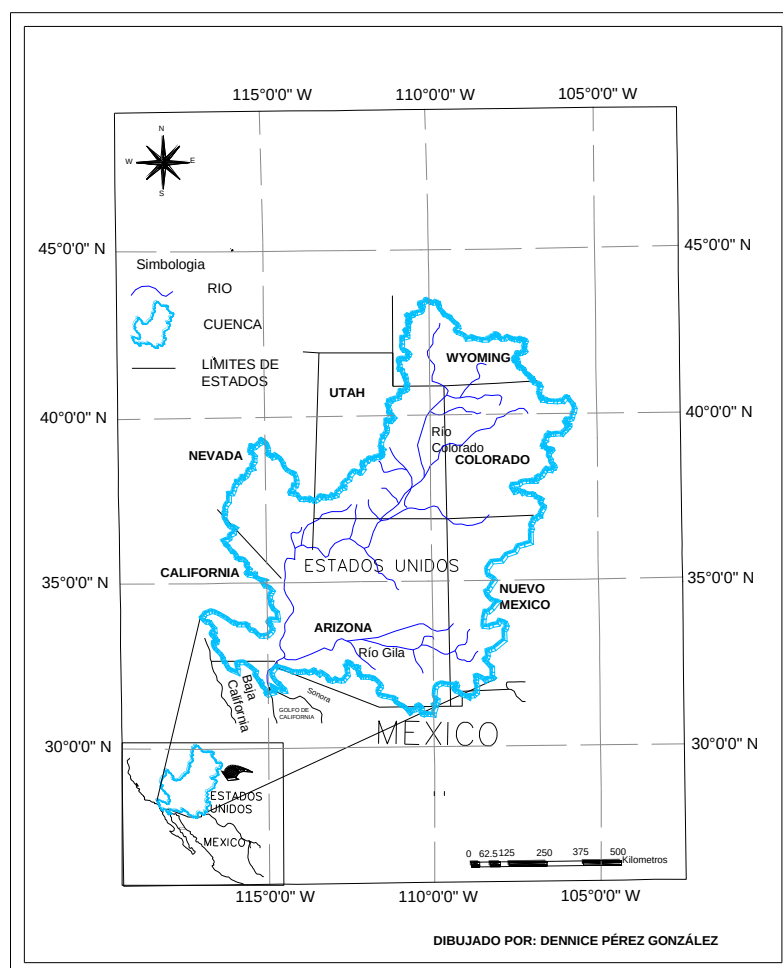


Figura 4. Cuenca del Río Colorado (RC). Obsérvese los siete estados que abarca en los Estados Unidos, los dos en México y la extensión de la cuenca en terreno americano con respecto a la cuenca en México.

El RC se extiende hacia el Golfo de California aproximadamente 153 Km. río abajo de la Presa Morelos. Los primeros 97 Km. están confinados entre dos bordos para el control de inundaciones, formando lo que se conoce como corredor ripario. Con variaciones en amplitud que van desde menos de 1.5 km en la parte norte, hasta 18 km en el Sur, las aguas del corredor ripario desbordan sus márgenes durante grandes inundaciones. En las últimas dos décadas, modestos flujos continuos combinados con grandes inundaciones han permitido el restablecimiento de importantes comunidades de vegetación riparia nativa. (Zamora-Arroyo et al, 2005).

El RC ha constituido la principal fuente de abastecimiento de agua para el Valle Imperial en California, EE.UU. y el Estado de Baja California. El impresionante sistema de regulación de su flujo hace posible controlar un volumen de $1,850 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. El cual fue estipulado en el Tratado de Aguas, firmado por los Estados Unidos y México el 3 de febrero de 1944, en el cual se determina la cantidad de agua para cada país. (Román y Ramírez-Hernández, 2003). El valle de Mexicali, ubicado sobre el Delta de RC (Figura 5) ha sido regado para fines agrícolas por las aguas del mismo desde principios del siglo XX (Construcciones Ariel, 1970).

El actual aprovechamiento del RC, cuyo caudal de agua es desviado desde la presa Morelos a los canales de riego agrícola impidiendo la circulación del agua sobre su lecho original, en su Delta se formó un importante acuífero, por su capacidad y extensión. Se trata de una región intergranular, con una alta porosidad, formada por gravas, arenas, e intercalación de lentes arcillosos denominado de forma general, en el terreno mexicano, acuífero del Valle de Mexicali. La recarga neta hacia el acuífero del Valle de Mexicali fluctúa de 600 a $800 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, resultando una recarga promedio de $700 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. (Construcciones Ariel, 1970). El estado de equilibrio en que se encuentra puede verse seriamente afectado por cualquier fenómeno externo, tales como, el recubrimiento

del Canal Todo Americano, y la disminución de los escurrimientos naturales del RC, que impactarían directamente sobre la calidad y cantidad del agua disponible (Ramírez-Hernández, 1997). Se estima que el revestimiento del Canal Todo Americano abarcara desde Julio 2006 hasta Marzo del 2010 (abarcando 37 de los 132 Kilómetros) reducirá las infiltraciones (recarga) al acuífero del Valle de Mexicali a $83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ (Imperial Irrigation District, 2008) dando lugar a implicaciones directas como el abatimiento del nivel freático del acuífero.

Sin embargo en la zona de estudio del RC seleccionada para esta tesis, la disponibilidad de agua esta estrechamente relacionada con la dinámica del acuífero, donde el nivel freático (NF) en la zona riparia del RC esta estrechamente relacionada entre el acuífero y el RC observándose una conexión hidráulica entre ambos cuerpos de agua, el superficial y el subterráneo. Las variaciones de la Elevación del Nivel Estático (ENE) obedecen a variaciones en la aplicación del agua para riego, observándose que en los meses en que se lleva a cabo un riego más intenso (traslape de riegos primavera-verano y otoño-invierno) la ENE es mayor y sufre un decremento en los meses de escasa o nula aplicación de agua. El comportamiento del NF y el nivel en el río durante el período medido Abril del 2005 a Octubre 2007, muestra que en la época de mayor riego el acuífero abastece de forma subterránea al río permitiéndole mantener un caudal y un nivel de agua durante este tiempo. (Pérez, 2006).

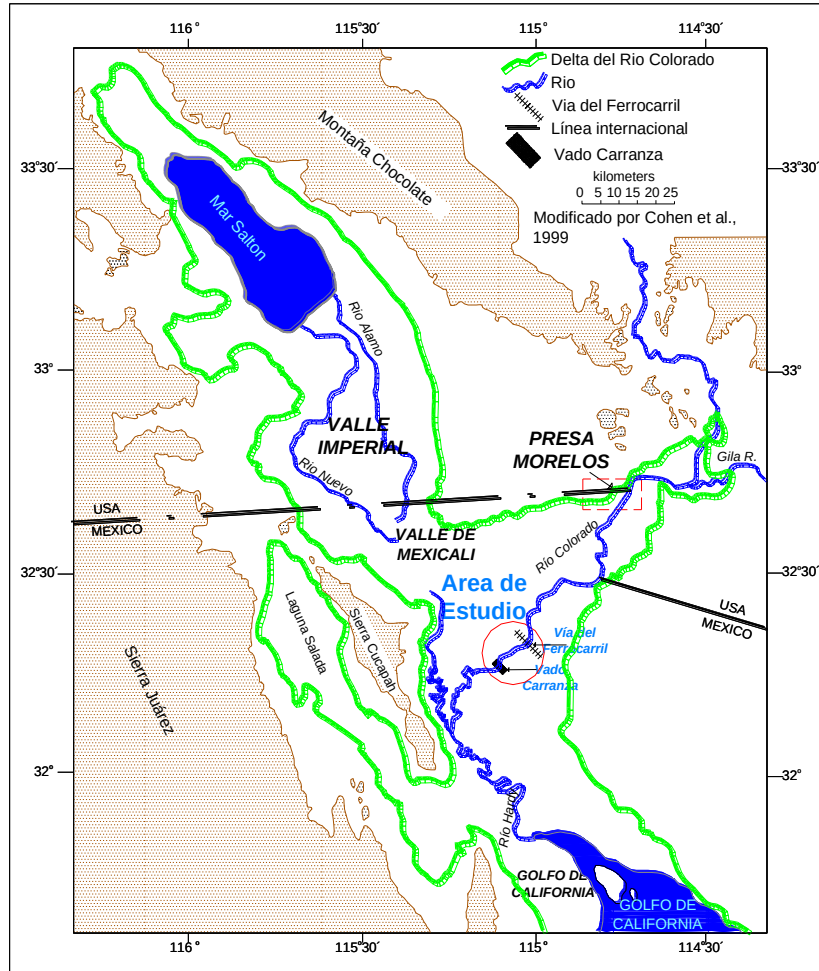


Figura 5. Delta del RC. Obsérvese su extensión sobre el Estado de California dando lugar al Mar del Salton y la formación del escurrimiento de la descarga del acuífero del Valle de Mexicali, conocido como río Hardy. (Modificado por Cohen et al, 1999).

1.3.1 Trabajos previos

El comportamiento hidráulico del acuífero del Valle de Mexicali ha sido estudiado y modelizado por diferentes autores. Entre ellos destaca la simulación numérica del acuífero superior del valle de Mexicali, Baja California, México desarrollado por (Díaz, 2001) cuyos objetivos fueron dos; el primero fue establecer un modelo geohidrológico conceptual a partir de la información geológica y geohidrológica disponible y el segundo objetivo es llevar a cabo la simulación numérica del comportamiento del acuífero superior del Valle de Mexicali con base en el modelo geohidrológico conceptual y a través de la utilización de un código numérico de la modelización. En este trabajo se presento un modelo conceptual y la simulación del comportamiento hidráulico del acuífero del Valle de Mexicali para los años 1972 y 1994, con el método de diferencias finitas utilizando el programa Modflow. Las superficies piezométricas obtenidas para 1972 y 1994 con el programa Modflow presentan bastante similitud con las realizadas por CNA. En este periodo de simulación el acuífero no presenta abatimientos debido a que se tuvieron escurrimientos extraordinarios provenientes del Río Colorado.

El segundo autor (Jael, 2007). Realizó una Investigación Multidisciplinaria para hacer frente a los efectos de los cambios hidrológicos en el Delta del Río Colorado que ha ido en aumento desde la década de 1980. Se construyó un modelo conceptual y fue desarrollado por el Departamento de Defensa del software de modelado de aguas subterráneas (GMS) en un modelo numérico utilizando el código MODFLOW puestos a disposición por los EE.UU. Geological Survey. Los resultados del modelo indican que en gran escala las inundaciones en el Río Colorado como un acto de recarga al acuífero y ponen de manifiesto que la relación entre aguas subterráneas y las retiradas de captura son evidentes en una escala de temporada

1.4 OBJETIVO GENERAL

Obtener el modelo conceptual del sistema hidrológico RC-acuífero y modelizar las relaciones hidráulicas del nivel del agua en el RC y en el acuífero, en el tramo comprendido entre la vía del ferrocarril y el vado Carranza, con la finalidad de considerar esta relación como un elemento más en la disponibilidad de agua para la vegetación riparia y para la definición del caudal ecológico.

1.4.1 Objetivos Particulares

1. Mediante la observación y medición de los niveles de agua del acuífero y del río, en distintas secciones de la zona de estudio, redefinir el modelo hidrológico conceptual entre ambos cuerpos de agua.
2. Obtener los parámetros hidráulicos requeridos para llevar a cabo la modelización de esta zona con una mayor certidumbre.
3. A través de la modelación hidráulica del acuífero y el RC como una aproximación telescópica hacia el tramo comprendido entre la vía del ferrocarril y el vado Carranza obtener mapas de elevación nivel freático en la zona riparia en estado estacionario.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Metodología

La metodología utilizada para alcanzar los objetivos propuestos consistió fundamentalmente en 4 etapas:

1. Actividades de campo, recopilación y depuración de la información. En esta sección se describen las actividades realizadas en campo, así como la recopilación y depuración de la información adquirida.
2. Definición del modelo conceptual. La información adquirida permitió obtener los factores que incurren al comportamiento del nivel piezométrico.
3. Modelo matemático (numérico). El modelo conceptual fue traducido a un modelo matemático el cual fue discretizado utilizando el programa Visual Modflow 4.2. Este modelo se resuelve mediante el método de diferencias finitas y considera un estado estacionario inicial.
4. Validación del modelo. Los resultados fueron comparados entre las cargas observadas y calculadas, analizando sus diferencias espaciales. Esta comparación permitió calibrar los parámetros introducidos en esta modelización reduciendo los errores en la estimación espacial del potencial piezométrico.

2.2 Trabajo de campo

La perforación de los piezómetros fue posible con la maquina perforadora tipo auger sin fluido de perforación para no alterar las condiciones hidráulicas de la formación (Figura 6). Se construyeron 27 piezómetros distribuidos en 8 transectos ubicados en el área de estudio, realizando una nivelación del brocal de cada uno de ellos, (Figura 7) así

como su liga con un banco de nivel conocido, se realizó utilizando la estación total y nivel fijo.



Figura 6. Proceso de perforación con perforadora tipo auger sin fluido de perforación y detalle de material arenoso recuperado.



Figura 7. Imagen (izquierda) utilización de estación total para medir nivelación de brocales. Imagen (derecha) levantamiento de nivelación con estación total para secciones transversales.

Los bancos de nivel utilizados como referencia son los construidos por la Comisión Nacional del Agua. La estación total utilizada para la realización del levantamiento topográfico y la generación de perfiles y secciones transversales, fue proporcionada por el Laboratorio de Topografía de la Facultad de Ingeniería de la UABC. Este trabajo de nivelación se realizó en el mes de enero del 2005, con ayuda de estudiantes de la Universidad Autónoma de Baja California UABC.

El objetivo principal de cada uno de los piezómetros es observar y estudiar mediante mediciones echas por una sonda eléctrica cada 15 días (Figura 8) las variaciones que surgen en el nivel piezométrico presentadas durante el período observado (Abril del 2005 a Octubre del 2007).

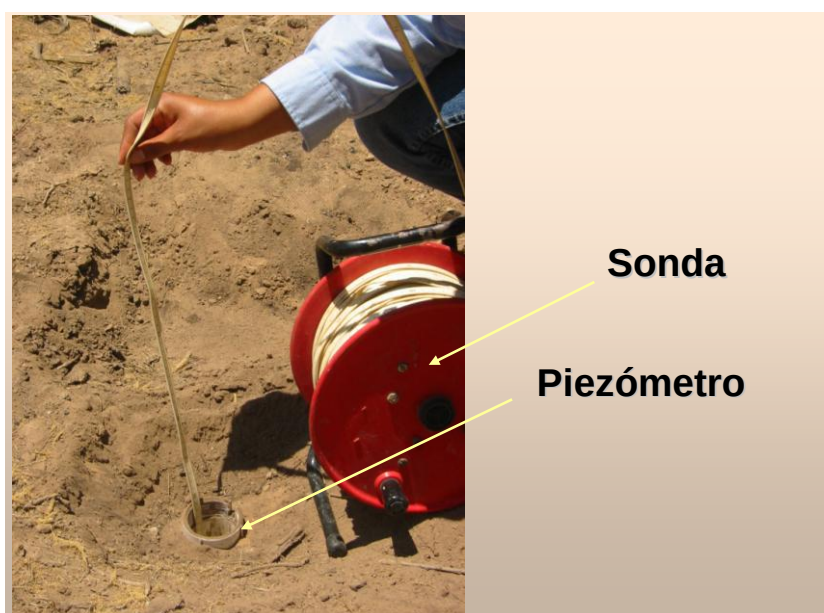


Figura 8. Ilustra la obtención de la profundidad del nivel freático y la profundidad total del piezómetro utilizando la sonda eléctrica.

Sin embargo la instalación y utilización de medidores automáticos (Figura 9) (Global Water modelo WL14 Water Level Logger y HOBOWare 2.2) ayudo a registrar información continua de periodos de 1 hr. De manera que la información adquirida de forma manual (utilizando la sonda) fue intercalada con la registrada por los medidores automáticos

permitiendo así, llevar un registro continuo del nivel freático. Las mediciones manuales fueron hechas por la brigada del Grupo de Ciencias de la Tierra del Instituto de Ingeniería y la del Sonoran Institute, A.C. Todo esto es con la finalidad de explicar las relaciones hidráulicas entre el RC y el acuífero considerando los elementos externos que gobiernan esta relación, como son la entrada de agua superficial al sistema hidráulico del RC en la zona de estudio y la influencia del riego en la elevación del nivel freático del acuífero y su correspondiente efecto en el nivel del RC.



Figura 9. Foto superior izquierda: El sensor es introducido al piezómetro con una cinta métrica para verificar la profundidad en la que se dejará suspendido. Foto superior derecha: Se coloca cinta para impedir que más cable pase por el brocal del piezómetro. Foto inferior izquierda: Se hace una excavación para enterrar el MA como a 0.30 m del piezómetro. Foto inferior derecha: El MA se envuelve en la bolsa de plástico y se cubre con tierra en el espacio excavado.

En la tabla 1 se enlista las características de cada uno de los piezómetros de acuerdo a su ubicación geográfica en la zona de estudio, altura del brocal y la fecha de perforación.

Piezómetro	Coordenada Norte	Coordenada Oeste	Altura del Brocal	Fecha de perforación
RC1	3,569,158	683,105	14.65	Abr-05
RC2	3,569,183	683,380	14.65	Abr-05
RC3	3,569,148	683,649	15.27	Abr-05
RC4	3,569,122	683,782	14.14	Abr-05
RC5	3,566,872	681,573	13.15	Abr-05
RC6	3,566,252	681,783	13.40	Abr-05
RC7	3,565,934	681,939	11.67	Abr-05
RC8	3,565,746	681,935	13.13	Abr-05
RC9	3,567,296	682,696	13.68	Abr-05
RC10	3,567,041	682,890	13.12	Abr-05
RC11	3,566,953	683,246	13.72	Abr-05
RC12	3,566,565	683,583	14.45	Abr-05
RC13	3,565,235	678,182	11.52	Ene-06
RC14	3,565,159	678,315	11.87	Ene-06
RC15	3,564,812	678,839	11.67	Ene-06
RC16	3,564,496	679,294	11.43	Ene-06
RC17	3,564,011	675,748	11.51	Ene-06
RC18	3,563,372	675,890	12.70	Ene-06
RC19	3,564,250	677,697	11.319	Ene-06
RC20	3,563,627	677,405	no hay	Ene-06
RC21	3,563,904	673,648	11.473	Ene-06
RC22	3,563,527	673,611	11.75	Ene-06
RC23	3,563,160	673,527	11.46	Ene-06
RC24	3,562,856	673,698	10.43	Ene-06
RC25	3,563,007	676,324	9.29	Ene-06
RC26	3,563,776	672,156	10.88	Ene-06
RC27	3,563,204	672,370	10.68	Ene-06

Tabla 1. Ubicación geográfica en UTM, altura del brocal y fecha de perforación de cada uno de los 27 piezómetros.

En el mes de Enero de 2007, se llevaron a cabo los ensayos de bombeo para determinar la conductividad hidráulica del área de estudio (Figura 10). Los métodos citados por todos los manuales de hidrogeología son los de nivel variable de Hvorslev (1951) para acuíferos libres, que es una prueba de perturbación de carga instantánea esencialmente consiste en medir la recuperación del nivel piezométrico en un pozo luego de un cambio casi instantáneo de la carga hidráulica de dicho pozo. Durante esta prueba

se le inyecta o se le saca repentinamente al pozo un volumen conocido o un “slug” de agua y se mide la reducción o recuperación de los niveles de agua durante intervalos rápidos en el transcurso de los próximos minutos. La realización de los ensayos de bombeo fue en 15 piezómetros (Figura 11).



a



b



c)



d

Figura 10. a) Como primer paso el medidor de nivel tipo HOBOT es introducido a 5 cm. arriba del fondo del piezómetro, b) como segundo paso el “slug” un tubo de PVC de 1.5 pulgadas de diámetro relleno de arena es introducido rápidamente en el piezómetro hasta 20 cm. arriba del fondo, c) como tercer paso una vez introducidos los 2 instrumentos anteriormente mencionados se deja por 10 min de forma intacta antes de sacar el slug y después de retirarlo se dejan otros 10 min. Únicamente con el medidor de nivel aun dentro del piezómetro una vez transcurridos los 10 min. Se saca el medidor de nivel y como se observa en la figura d) la información adquirida por el medidor de nivel se pasa a la computadora y de esta manera observar el comportamiento del nivel de agua en abatimiento y en recuperación por medio del programa Aquifer test.

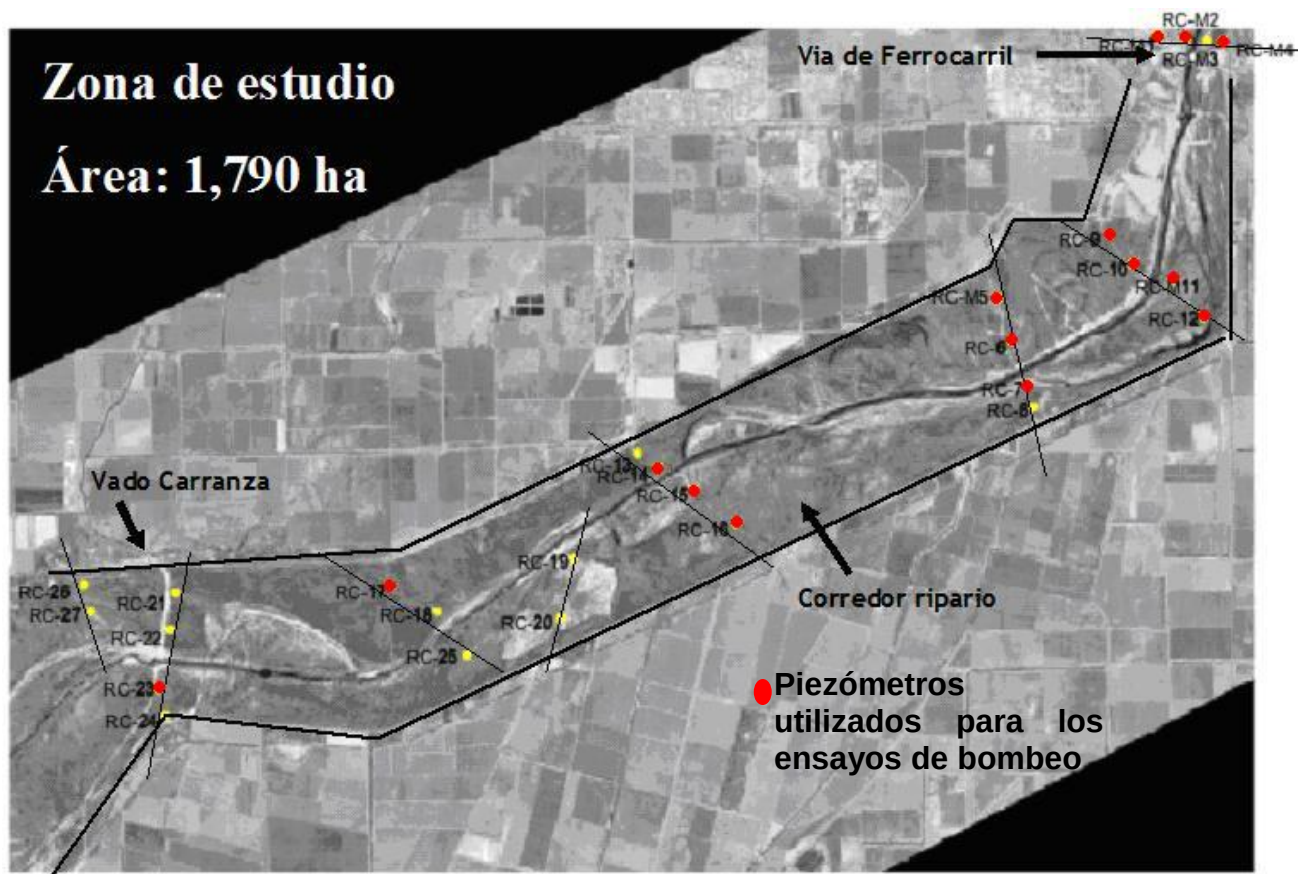


Figura 11. Imagen satelital mostrando los piezómetros donde se realizó los ensayos de bombeo.

Para realizar el ensayo de bombeo se utilizó un medidor de registro automático. Nivel automático marca Hobo versión 2.55 ya que sería imposible medir y anotar manualmente una docena de niveles en un minuto o menos. Los ensayos se realizaron en un intervalo de 2 segundos con el objetivo de recolectar información en los primeros momentos en que se introduce el cuerpo dentro de la columna de agua. Es decir, relacionar el tiempo con el movimiento del nivel de agua durante el abatimiento y la recuperación en cada uno de los piezómetros donde se realizó el ensayo. Hay que señalar que tanto la introducción como la retirada del slug de la columna de agua del pozo deben hacerse rápidamente para cumplir con la condición de colocación instantánea del cuerpo en el sistema.

2.3 Modelo Conceptual

2.3.1 Definición del modelo conceptual.

El modelo conceptual es una representación grafica del sistema de flujo de aguas subterráneas que tiene como propósito construir una versión simplificada del problema y organizar los datos de campo relacionados al mismo, para que el problema pueda ser analizado rápidamente. (Anderson y Woessner, 1992). Durante el desarrollo es necesaria la simplificación, ya que no es posible hacer una reconstrucción del sistema real.

2.3.2 Dominio del modelo

El sistema hidrológico incluye parte del valle de Mexicali, hasta los límites de los canales agrícolas aledaños al Río Colorado en el tramo de estudio. En este trabajo el área de interés y control geohidrológico se limita a la zona definida en la (Figura 2). Por la disponibilidad de información de acuerdo a la superficie topográfica el espesor del acuífero incluyo solo los primeros 15 (msnm).

2.3.3 Condiciones geohidrológicas en las fronteras del modelo.

Con la finalidad de abarcar toda el área de estudio y alejar las condiciones de frontera geohidrológicas, se extendió el dominio del modelo hacia el NE, SE, NW y SW de la zona de estudio. Las fronteras consideradas en el modelo corresponden a fronteras de potencial constante conocidas obtenidas del resultado de la simulación del trabajo de Jael (2007) (Figura 12) (Anexo II). Con el propósito de cubrir el área de estudio y delimitar sus fronteras, se diseño una malla de 7.4 km de ancho y 17.4 km de largo, con una separación internodal de 100 m dentro del área de estudio y de 250 m y 500 m en las partes más alejadas de la zona de estudio. El resultado de todo el dominio es una malla

regular de 60 renglones por 160 columnas (Figura 13). Con una superficie total de 128.76 km².

La orientación de la malla se determinó considerando a los canales agrícolas aledaños al RC y así el modelo fue discretizado paralelo a estos.

La conceptualización e implementación de las celdas se muestran en la (Figura 14).

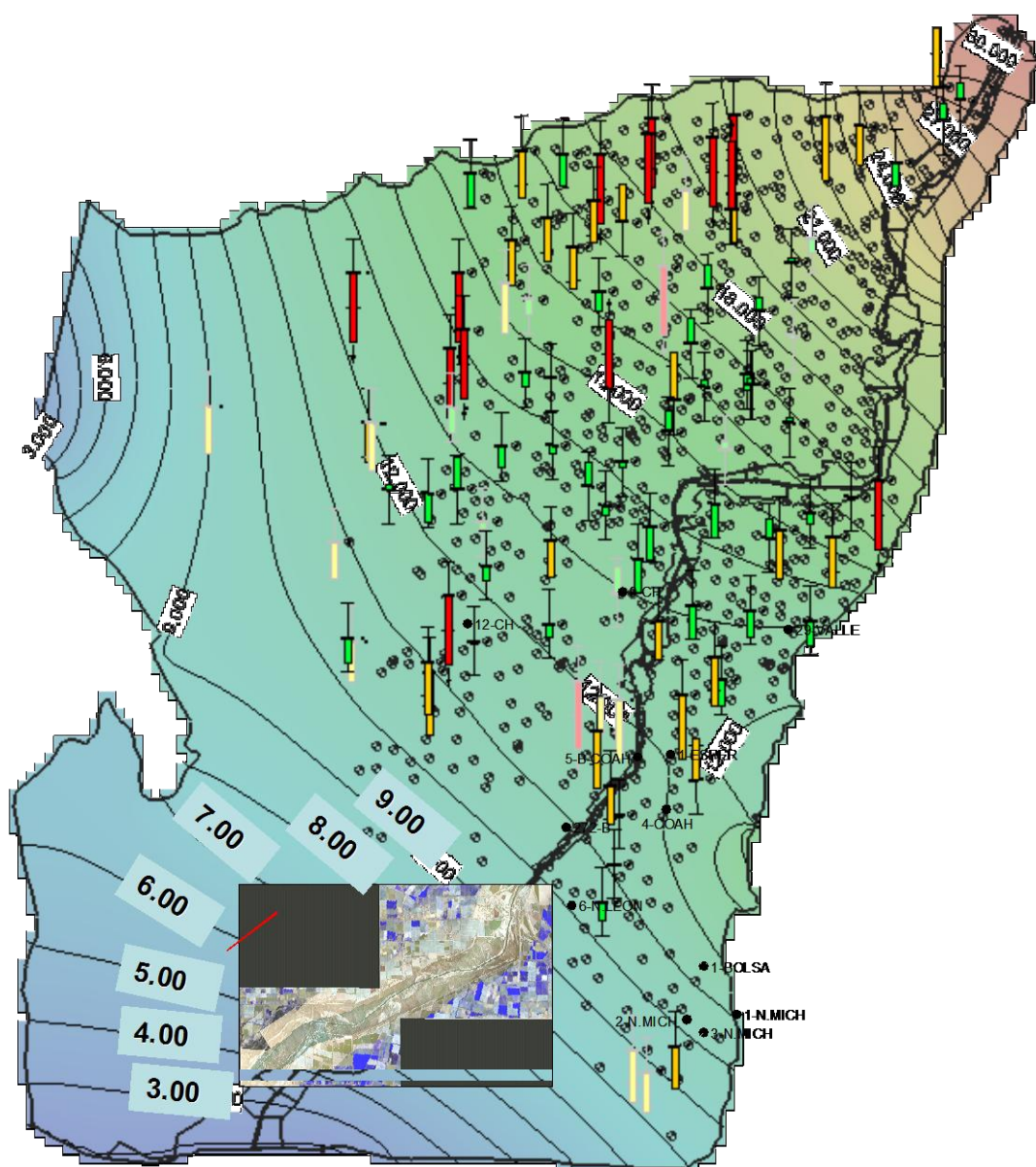


Figura 12. Determinación de las fronteras de potencial constante (Jael, 2007)

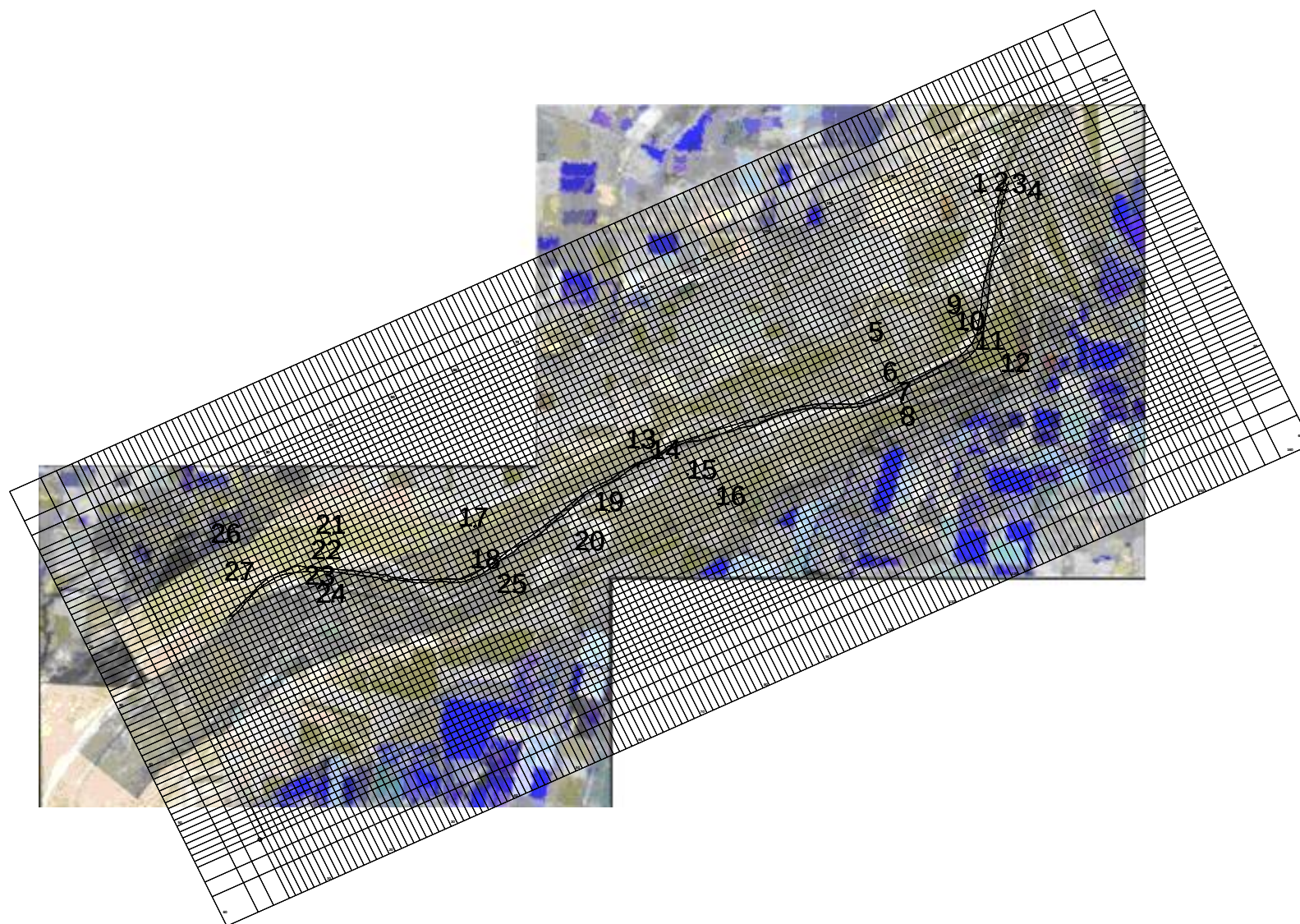


Figura 13. Discretización espacial del sistema acuífero-Río Colorado en la zona de estudio

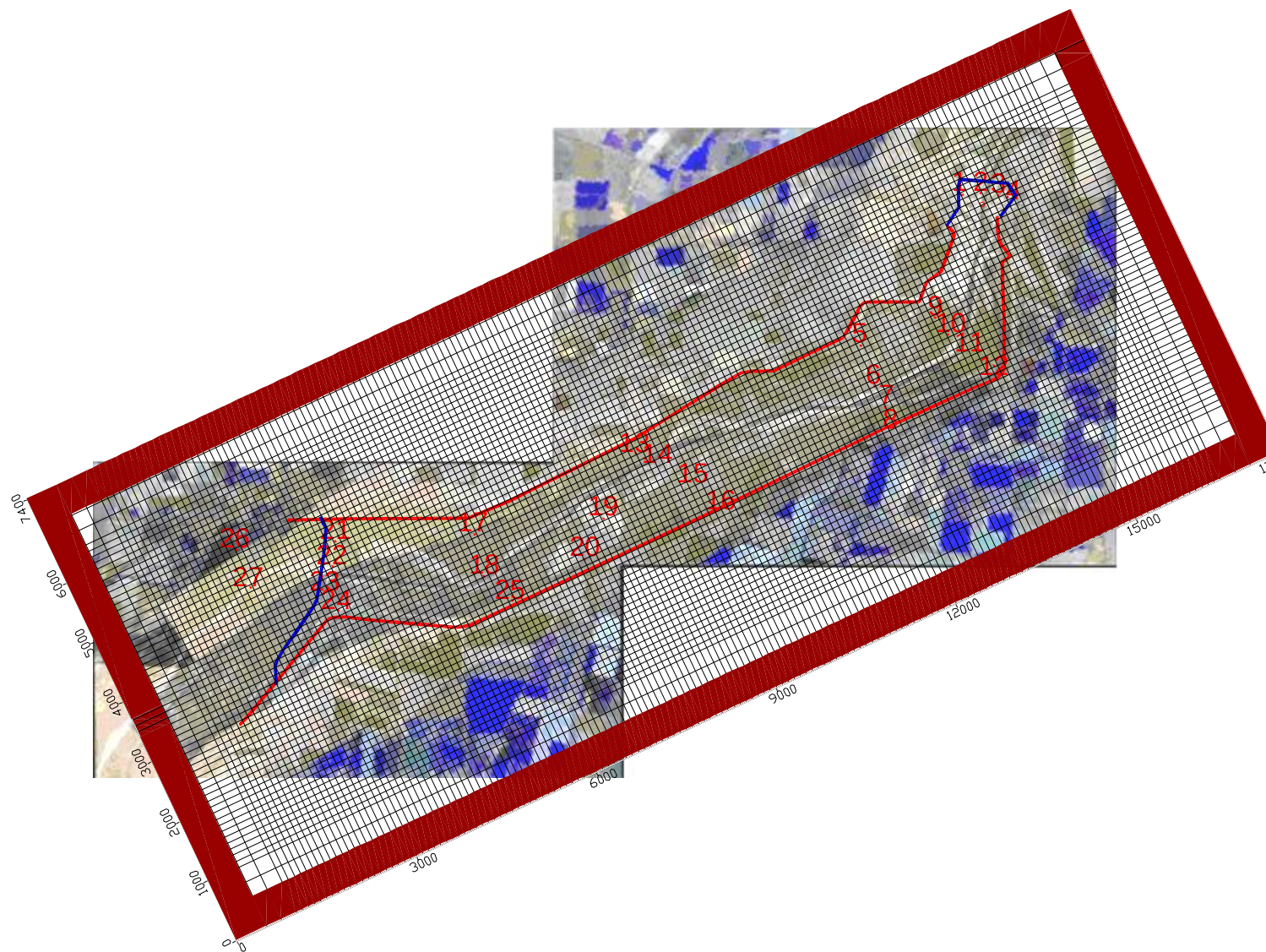


Figura 14. Conceptualización e implementación de las celdas de potencial constante

2.3.4 Parámetros geohidrológicos

Los parámetros geohidrológicos de requeridos para establecer el modelo conceptual de la zona de estudio del RC son la conductividad hidráulica, y el coeficiente de almacenamiento. Se cuenta con un mapa de valores de conductividades estimado a partir de ensayos de bombeo, sin embargo las distancias entre sitios de la prueba de bombeo implicaron realizar interpolaciones y de esta manera tener una proporción suave en el mapa de conductividades desde intervalos de $1.40\text{E-}04$ a $9.0\text{E-}03$ m/s (6.912 224.64 m/día) (Tabla 2). Que después de la modelización presenta cambios. El coeficiente de almacenamiento se definió de acuerdo a la distribución de la litología dominante en el acuífero (Custodió, 1983).

Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
1	0.00014	0.00014	0.00014
2	0.00235	0.00235	0.00235
3	0.00672	0.00672	0.00672
4	0.000834	0.000834	0.000834
5	0.00268	0.00268	0.00268
6	0.00217	0.00217	0.00217
7	0.00077	0.00077	0.00077
8	0.00126	0.00126	0.00126
9	0.00188	0.00188	0.00188
10	0.00153	0.00153	0.00153
11	0.000831	0.000831	0.000831
12	0.00214	0.00214	0.00214
13	0.00112	0.00112	0.00112
14	2.465645E-5	2.465645E-5	2.465645E-5
15	0.000904	0.000904	0.000904
16	0.0013	0.0013	0.0013
17	0.008	0.008	0.008
18	0.001	0.001	0.001
19	0.002	0.002	0.002
20	0.003	0.003	0.003
21	0.004	0.004	0.004
22	0.005	0.005	0.005
23	0.006	0.006	0.006
24	0.007	0.007	0.007
25	0.008	0.008	0.008
26	0.009	0.009	0.009
27	0.001	0.001	0.001
28	0.0011	0.0011	0.0011
29	0.00126	0.00126	0.00126
30	0.0013	0.0013	0.0013
31	0.0014	0.0014	0.0014
32	0.00153	0.00153	0.00153
33	0.0016	0.0016	0.0016
34	0.0018	0.0018	0.0018
35	0.0019	0.0019	0.0019
36	0.0017	0.0017	0.0017
37	0.002	0.002	0.002
38	0.0021	0.0021	0.0021
39	0.0022	0.0022	0.0022
40	0.0023	0.0023	0.0023
41	0.0024	0.0024	0.0024
42	0.0025	0.0025	0.0025
43	0.0026	0.0026	0.0026

Tabla 2. Valores de la conductividad hidráulica en m/s.

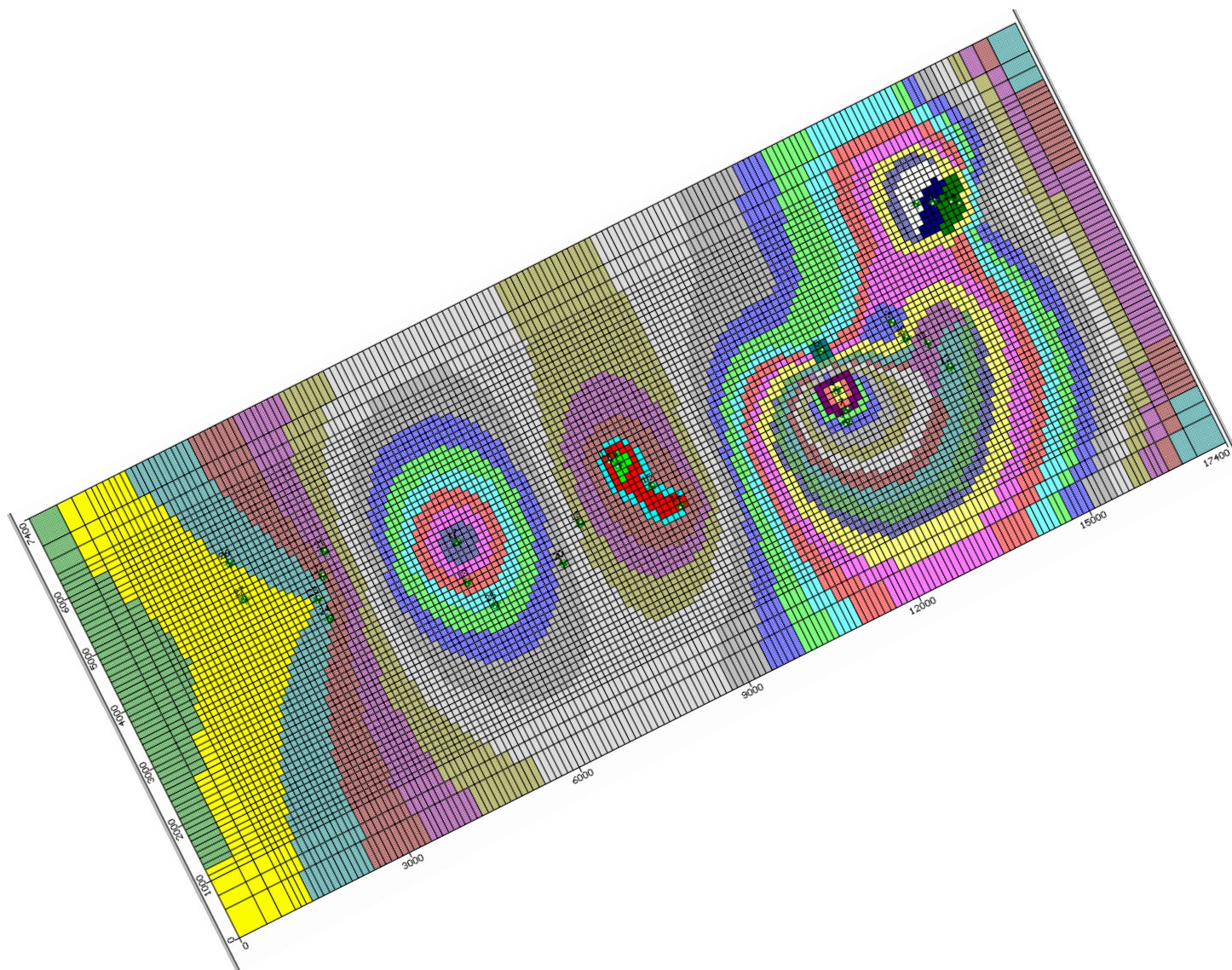


Figura 15. Mapa de Conductividades del modelo que van de 6.912 hasta 224.64 m/día

2.3.5 Representación del Río

El Río Colorado es conceptualizado como un cauce ubicado sobre la celda a modelar en el que la longitud del bloque de lecho es simplemente la longitud de río en la celda, L , el ancho del bloque es el ancho del río, W , la distancia que viajara el flujo es el grosor de dicha capa, M ; y la conductividad hidráulica de la capa de lecho se designa como K (Figura 16). Se supone que la pérdida de potencial entre el río y el acuífero es debida únicamente a la capa de lecho de río, esto es, no hay una pérdida significativa de potencial entre la base del lecho del río y el punto representado por el nodo debajo del río. A su vez, también se supone que la celda de acuífero debajo del lecho del río permanece totalmente saturada, en otras palabras, que el nivel de agua dentro del acuífero no disminuirá por debajo de la base del lecho del río. Bajo estas dos suposiciones, el flujo entre el río y el acuífero puede representarse por: (McDonald y Harbaugh, 1989).

$$Q_{rIV} = \frac{KLW}{M} (H_{rIV} - h_{i,j,k})$$

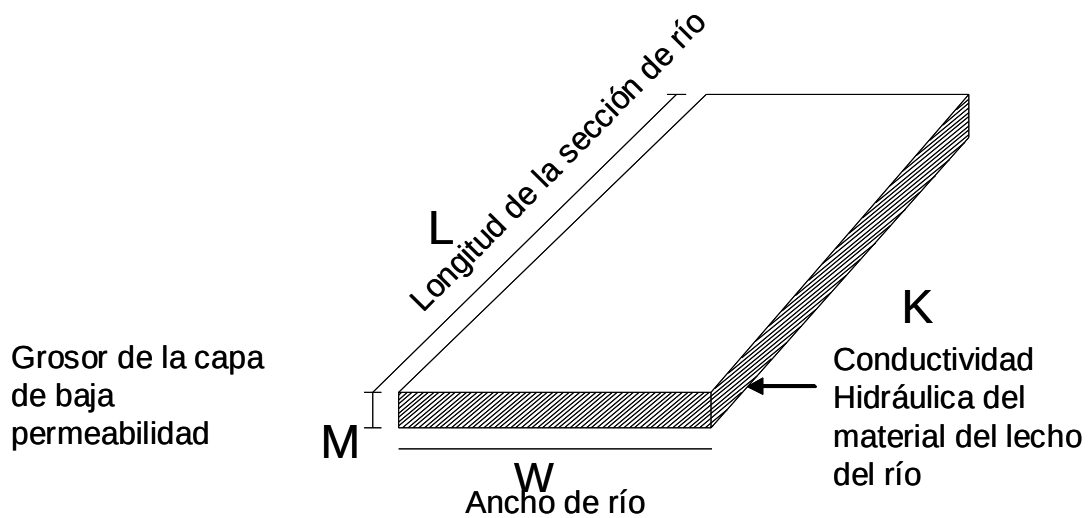
Donde:

Q_{rIV} es el flujo entre el río y el acuífero. Positivo si va del río al acuífero.

H_{rIV} es el potencial en el río.

$CRIV$ es la conductancia hidráulica del lecho del río (KLW/M).

$h_{i,j,k}$ es el potencial en el nodo de la celda que contiene la sección de río.



$$\text{CONDUCTANCIA DEL RIO} = \frac{KLW}{M}$$

Figura 16. Idealización de la conductancia del río en una celda en la malla.

De esta manera es necesario modelar el RC como un cauce ubicado en la celda a modelar. En cada celda se define la elevación del espejo que fue de 50 cm, ya que la mayoría del año el río está seco, la elevación del fondo de río y la conductancia de río la cual será variable en cada celda. Este parámetro numérico se puede observar en la (Tabla 3). (Waterloo hydrogeologic, 2006). Los datos de elevación del fondo del río a lo largo del cauce se obtuvieron del control de 4 secciones en el RC los cuales se obtuvieron por medio de nivelación diferencial, pero la falta de datos para agregarlos al programa nos llevó a realizar una interpolación lineal entre estos 4 puntos de control y de esta manera llegar a tener el mayor número de datos necesarios para la modelación. En la siguiente (Figura 17) se muestra la conceptualización e implementación de las celdas de río.

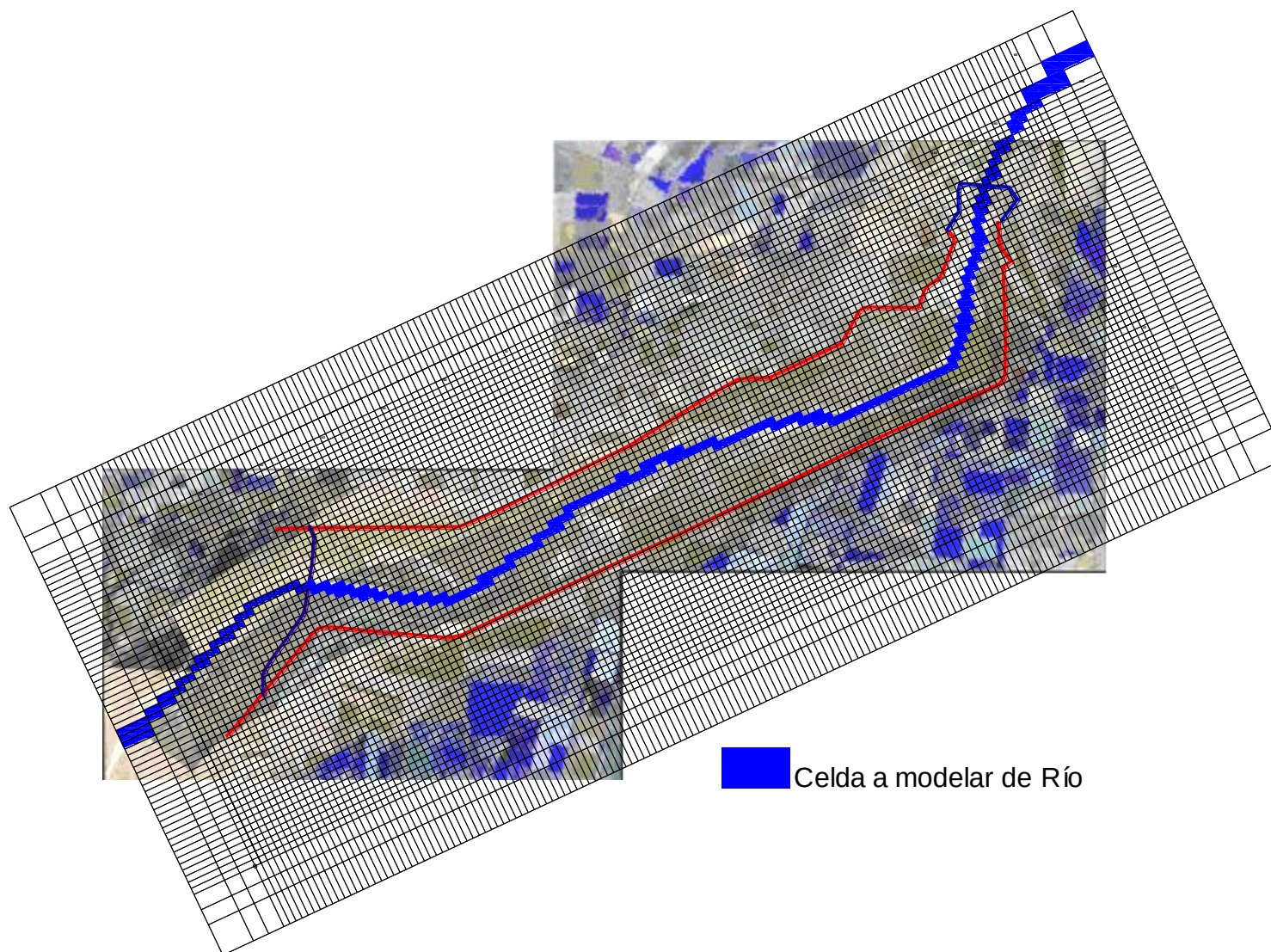


Figura 17. Conceptualización e implementación de las celdas de Río

PARÁMETROS DEL RIO COLORADO (RÍO)

REGLÓN	COLUMNA	NIVEL DE AGUA SUPERFICIAL (m)	LECHO DEL RIO (m)	CONDUCTANCIA
33	1	5.7382344	5.238234	0.00001
32	1	5.7382344	5.238234	0.00001
31	1	5.7382344	5.238234	0.00001
31	2	5.8360819	5.336082	0.00001
30	2	5.8360819	5.336082	0.00001
30	3	5.9339281	5.433928	0.00001
29	3	5.9339281	5.433928	0.00001
29	4	6.0317756	5.531776	0.00001
29	5	6.1296219	5.629622	0.00001
28	5	6.1296219	5.629622	0.00001
28	6	6.2274693	5.727469	0.00001
28	7	6.3253156	5.825316	0.00001
27	8	6.423163	5.923163	0.00001
27	9	6.5210094	6.021009	0.00001
26	9	6.5210094	6.021009	0.00001
27	10	6.6188567	6.118857	0.00001
26	10	6.6188567	6.118857	0.00001
26	11	6.7167031	6.216703	0.00001
26	12	6.8145504	6.31455	0.00001
25	12	6.8145504	6.31455	0.00001
25	13	6.9123969	6.412397	0.00001
25	14	7.0102441	6.510244	0.00001
24	14	7.0102441	6.510244	0.00001
25	15	7.1080906	6.608091	0.00001
24	15	7.1080906	6.608091	0.00001
24	16	7.2059378	6.705938	0.00001
24	17	7.3037844	6.803784	0.00001
23	17	7.3037844	6.803784	0.00001
23	18	7.4016315	6.901632	0.00001
23	19	7.4994781	6.999478	0.00001
22	19	7.4994781	6.999478	0.00001
22	20	7.5973252	7.097325	0.00001
22	21	7.6951719	7.195172	0.00001
22	22	7.7930189	7.293019	0.00001
22	23	7.8908656	7.390866	0.00001
22	24	7.9887126	7.488713	0.00001
22	25	8.0865594	7.586559	0.00001
22	26	8.2822531	7.782253	0.00001
23	27	8.1844063	7.684406	0.00001
22	27	8.1844063	7.684406	0.00001
23	28	8.3801	7.8801	0.00001
24	29	8.40055	7.9	0.00245
23	29	8.40055	7.90055	0.00181
24	30	8.421	7.921	0.0043
25	31	8.44145	7.94145	0.00312
24	31	8.44145	7.94145	0.0006
26	32	8.4619	7.9619	0.00044
25	32	8.4619	7.9619	0.00329

PARÁMETROS DEL RIO COLORADO (RÍO)

REGLÓN	COLUMNA	NIVEL DE AGUA SUPERFICIAL (m)	LECHO DEL RIO (m)	CONDUCTANCIA
26	33	8.48235	7.98235	0.00554
25	33	8.48235	7.98235	0
27	34	8.5028	8.0028	0.00348
26	34	8.5028	8.0028	0.00183
28	35	8.52325	8.02325	0.00051
27	35	8.52325	8.02325	0.00456
28	36	8.5437	8.0437	0.00524
27	36	8.5437	8.0437	0
29	37	8.56415	8.06415	0.00541
28	37	8.56415	8.06415	0.00166
29	38	8.5846	8.0846	0.00239
30	39	8.60505	8.10505	0.00289
31	40	8.6255	8.1255	0.00194
30	40	8.6255	8.1255	0.00115
31	41	8.64595	8.14595	0.00399
32	42	8.6664	8.1664	0.00272
31	42	8.6664	8.1664	0.00036
32	43	8.68685	8.18685	0.00335
33	44	8.7073	8.2073	0.00128
32	44	8.7073	8.2073	0.0016
33	45	8.72775	8.22775	0.00404
34	46	8.7482	8.2482	0.00185
33	46	8.7482	8.2482	0.00052
34	47	8.76865	8.26865	0.0034
34	48	8.7891	8.2891	0.00397
34	49	8.80955	8.30955	0.00385
34	50	8.83	8.33	0.00519
34	51	8.8196667	8.3196667	0.00471
34	52	8.8093333	8.3093333	0.00258
33	52	8.8093333	8.3093333	0
34	53	8.799	8.299	0.00536
33	53	8.799	8.299	0.0125
33	54	8.7886667	8.2886667	0.03309
33	55	8.7783333	8.2783333	0.04185
33	56	8.768	8.268	0.03935
33	57	8.7576667	8.2576667	0.0075
32	57	8.7576667	8.2576667	0.01352
32	58	8.7473333	8.2473333	0.03411
32	59	8.737	8.237	0.03712
32	60	8.7266667	8.2266667	0.04588
32	61	8.7163333	8.2163333	0.01876
32	62	8.706	8.206	0.01367
31	62	8.706	8.206	0.00665
31	63	8.6956667	8.1956667	0.03151
31	64	8.6853333	8.1853333	0.0363
31	65	8.675	8.175	0.03736
30	65	8.675	8.175	0
31	66	8.6646667	8.1646667	0.00165

PARÁMETROS DEL RIO COLORADO (RÍO)				
REGLÓN	COLUMNA	NIVEL DE AGUA SUPERFICIAL (m)	LECHO DEL RIO (m)	CONDUCTANCIA
30	66	8.6646667	8.1646667	0.03095
30	67	8.6543333	8.1543333	0.03292
30	68	8.644	8.144	0.02162
29	68	8.644	8.144	0
29	69	8.6336667	8.1336667	0.02142
29	70	8.6233333	8.1233333	0.03017
29	71	8.613	8.113	0.03512
29	72	8.6026667	8.1026667	0.02871
29	73	8.5923333	8.0923333	0.03435
29	74	8.582	8.082	0.03836
29	75	8.5716667	8.0716667	0.04357
29	76	8.5613333	8.0613333	0.03168
29	77	8.551	8.051	0.01788
28	77	8.551	8.051	0
29	78	8.5406667	8.0406667	0.00652
28	78	8.5406667	8.0406667	0.00652
29	79	8.5303333	8.0303333	0.02597
29	80	8.52	8.02	0.02359
29	81	8.484625	7.984625	0.01951
28	81	8.484625	7.9846257	0.00796
29	82	8.44925	7.94925	0.00223
28	82	8.44925	7.94925	0.01396
28	83	8.413875	7.913875	0.03099
28	84	8.3785	7.8785	0.03326
29	85	8.343125	7.843125	0
28	85	8.343125	7.843125	0.029
29	86	8.30775	7.80775	0.00206
28	86	8.30775	7.80775	0.02118
29	87	8.272375	7.772375	0.03526
28	87	8.272375	7.772375	0
29	88	8.237	7.737	0.05717
29	89	8.201625	7.701625	0.06113
29	90	8.16625	7.66625	0.06254
29	91	8.130875	7.630875	0.05888
30	92	8.0955	7.5955	0.01706
29	92	8.0955	7.5955	0.00591
30	93	8.060125	7.560125	0.02576
30	94	8.02475	7.52475	0.03611
30	95	7.989375	7.489375	0.05671
30	96	7.954	7.454	0.07441
30	97	8.0116744	7.5116744	0.05363
30	98	8.0693488	7.5693488	0.04006
30	99	8.1270233	7.6270233	0.03331
30	100	8.1846977	7.6846977	0.03355
31	101	8.3000465	7.8000465	0.01586
30	101	8.3000465	7.7423721	0.00564
31	102	8.4153953	7.9153953	3.26808
31	103	8.5307442	8.0307442	3.65076

PARÁMETROS DEL RIO COLORADO (RÍO)				
REGLÓN	COLUMNA	NIVEL DE AGUA SUPERFICIAL (m)	LECHO DEL RIO (m)	CONDUCTANCIA
31	104	8.646093	8.146093	3.56018
32	105	8.7614419	8.2614419	2.10108
31	105	8.7614419	8.2614419	1.59076
32	106	8.8767907	8.3767907	6.2681
33	107	8.9344651	8.4344651	0
32	107	8.9344651	8.4344651	5.52707
33	108	8.9921395	8.4921395	5.19793
32	108	8.9921395	8.4921395	2.36849
34	109	9.049814	8.549814	3.37686
33	109	9.049814	8.549814	2.2366
34	110	9.1074884	8.6074884	4.3736
34	111	9.1651628	8.6651628	3.71664
34	112	9.2228372	8.7228372	4.62407
34	113	9.2805116	8.7805116	4.32164
34	114	9.338186	8.838186	4.05584
34	115	9.3958605	8.8958605	3.85942
34	116	9.4535349	8.9535349	4.22322
34	117	9.5112093	9.0112093	4.68861
34	118	9.5112093	9.0112093	4.97114
34	119	9.5688837	9.0688837	4.69812
34	120	9.5688837	9.0688837	4.51083
34	121	9.6265581	9.1265581	4.53091
34	122	9.6265581	9.1265581	4.54057
34	123	9.6842326	9.1842326	5.17483
34	124	9.6842326	9.1842326	6.30779
34	125	9.6842326	9.1842326	6.79189
34	126	9.6842326	9.1842326	8.20269
34	127	9.741907	9.241907	7.89908
34	128	9.7995814	9.2995814	5.71516
34	129	9.8572558	9.3572558	2.25778
33	129	9.8572558	9.3572558	7.80438
33	130	9.9149302	9.4149302	0.72983
32	130	9.9149302	9.4149302	5.69236
32	131	9.9726047	9.4726047	7.85951
31	131	9.9726047	9.4726047	0.87388
31	132	10.0303	9.5302791	6.41429
30	132	10.0303	9.5302791	6.16697
29	132	10.0303	9.5302791	0
30	133	10.088	9.5879535	1.45999
29	133	10.088	9.5879535	8.19219
28	133	10.088	9.5879535	0.38202
29	134	10.1456	9.6456279	0.38202
28	134	10.1456	9.6456279	8.13778
27	134	10.1456	9.6456279	7.14134
26	134	10.1456	9.6456279	2.41872
27	135	10.2033	9.7033023	2.4985
26	135	10.2033	9.7033023	8.22425
25	135	10.2033	9.7033023	7.27525

PARÁMETROS DEL RIO COLORADO (RÍO)				
REGLÓN	COLUMNA	NIVEL DE AGUA SUPERFICIAL (m)	LECHO DEL RIO (m)	CONDUCTANCIA
25	136	10.261	9.7609767	4.40061
24	136	10.261	9.7609767	4.81223
23	136	10.261	9.7609767	1.0911
23	137	10.3187	9.8186512	2.88783
22	137	10.3187	9.8186512	3.95533
22	138	10.3763	9.8763256	2.60037
21	138	10.3763	9.8763256	3.33386
21	139	10.434	9.934	5.13808
20	139	10.434	9.934	2.41398
20	140	10.0713	9.9916744	6.04664
19	140	10.4917	9.9916744	8.16515
18	140	10.4917	9.9916744	2.80774
19	141	10.5493	10.0493	0.82665
18	141	10.5493	10.0493	2.78739
17	141	10.5493	10.0493	4.34993
16	141	10.5493	10.0493	4.33189
16	142	10.607	10.107	5.57746
14	142	10.607	10.107	0.00827
15	143	10.6647	10.1647	1.32128
14	143	10.6647	10.1647	0.0008
13	143	10.6647	10.1647	0.0008
14	144	10.7224	10.2224	0.0008
13	144	10.7224	10.2224	0.0008
12	144	10.7224	10.2224	0.0008
12	145	10.78	10.28	0.0008
11	145	10.78	10.28	0.0008
11	146	10.8377	10.3377	0.0008
10	146	10.8377	10.3377	0.0008
11	147	10.8954	10.3954	0.0008
10	147	10.8954	10.3954	0.0008
9	147	10.8954	10.3954	0.0008
9	148	10.9531	10.4531	0.0008
8	148	10.9531	10.4531	0.0008
8	149	11.0107	10.5107	0.0008
7	149	11.0107	10.5107	0.0008
8	150	11.0684	10.5684	0.0008
7	150	11.0684	10.5684	0.0008
7	151	11.1261	10.6261	0.0008
6	152	11.1838	10.6838	0.0008
5	152	11.1838	10.6838	0.0008
6	153	11.2414	10.7414	0.0008
5	153	11.2414	10.7414	0.0008
4	153	11.2414	10.7414	0.0008
5	154	11.2991	10.7991	0.00008
4	154	11.2991	10.7991	0.00008
4	155	11.3568	10.8568	0.00008
4	156	11.4145	10.9145	0.00008
3	156	11.4145	10.9145	0.00008

PARÁMETROS DEL RIO COLORADO (RÍO)				
REGLÓN	COLUMNA	NIVEL DE AGUA SUPERFICIAL (m)	LECHO DEL RIO (m)	CONDUCTANCIA
4	157	11.4721	10.9721	0.00008
3	157	11.4721	10.9721	0.00008
3	158	11.5298	11.0298	0.00008
2	159	11.5875	11.0875	0.00008
2	160	11.6452	11.1452	0.00008

Tabla 3. Parámetros de Río Colorado (Río)

2.4 Modelo de Flujo

El flujo de agua subterránea dentro del acuífero se simula usando el esquema de aproximación conocido como de “bloque centrado en diferencias finitas”. El movimiento en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante a través de un material poroso puede ser descrito por la ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} representan los valores de la conductividad hidráulica a lo largo del eje de coordenadas x , y y z ; que asumen ser paralelos al eje mayor de la conductividad hidráulica (Lt^{-1})

h es el potencial pizométrico (L)

W es el flujo volumétrico por unidad de volumen y representa fuentes y/o sumideros de agua (t^{-1}).

S_s es el almacenamiento específico del material poroso (L^{-1})

t es el tiempo (t)

La ecuación (1), junto con la especificación de flujo y/o condiciones de potencial, las fronteras de sistema acuífero y la definición de potencial inicial, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de aguas subterráneas. La solución de la ecuación (1), en un sentido analítico, es una expresión algebraica. Excepto para sistemas muy simples, la solución analítica de la ecuación es raramente posible, sin embargo, algunos métodos de solución numéricos pueden ser empleados para obtener

soluciones aproximadas. Uno de estos métodos de aproximación es el de diferencias finitas.

2.5 Solución Numérica

2.5.1 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas y elementos finitos son usualmente las técnicas más usadas. El método más fácil de desarrollar es el de diferencias finitas, con el que se obtiene la solución de la ecuación para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. La ecuación de acuerdo este método hace la descripción del sistema en elementos celulares asignados a cada uno de los puntos del espacio. La ecuación diferencial se aproxima por una serie de ecuaciones algebraicas en que las incógnitas son las alturas piezométricas en los puntos escogidos, y las particularidades del método consisten en el planteamiento de esas ecuaciones y en la forma de solucionarlas. (Custodio, 1983).

2.5.2 Programa de Cómputo

El programa utilizado para el modelado es el Visual Modflow desarrollado por Waterloo hydrogeologic, Inc. conocido como Visual MODFLOW versión 4.2.0.151 es el ambiente más completo y de uso fácil, que permite modelar aplicaciones. La interfaz principal para Visual MODFLOW es muy similar a las versiones anteriores de Visual MODFLOW, pero se ha mejorado de manera espectacular para proporcionar poderosas herramientas para introducir, modificar, analizar y presentar un modelado de datos de aguas subterráneas. Es un paquete totalmente integró que combina las herramientas analíticas poderosas con una estructura del menú lógica. La estructura modular consiste en un código principal y una serie de subrutinas muy independientes llamadas “módulos”. Los módulos están agrupados en “paquetes”. Cada paquete contribuye con la simulación de

un fenómeno hidrogeológico específico, por ejemplo, el flujo desde el río o el flujo de un drenaje; o bien, con un método específico de resolución de ecuaciones lineales que describe el sistema de flujo.

El flujo de agua subterránea dentro del acuífero se simula usando el esquema de aproximación conocido como de “bloque centrado en diferencias finitas”. Las capas se pueden simular como confinadas o no confinadas, o una combinación de confinada y no confinada. El programa permite simular también flujos asociados a fuentes externas, tales como, pozos, áreas de recarga, evapotranspiración, drenajes y corrientes.

En este trabajo se incluyo el paquete de Río que tiene como propósito simular las relaciones de flujo entre aguas superficiales y aguas subterráneas. Para examinar las relaciones de flujo, deben agregarse los términos que representan la infiltración desde o hacia la superficie a las ecuaciones de flujo.

3 CALIBRACIÓN

La calibración del modelo es el proceso por el cual el modelo selecciona parámetros de entrada que se ajustan dentro de límites razonables para producir resultados de la simulación que mejor se adapte a los valores medidos. La calibración del modelo es el proceso mas critico en la construcción del flujo de agua subterránea y en el transporte de contaminantes, debido a que la calidad de la calibración inevitablemente determina la fiabilidad de las conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los resultados de la simulación (Visual MODFLOW, 2006). El proceso de la calibración del modelo consistió en ajustar a prueba y error los parámetros de la Conductividad Hidráulica y la conductancia del RC, con la finalidad de que por esas celdas entrara o saliera el volumen de agua deseado al sistema, y que las líneas piezometricas obtenidas del modelo no tuvieran diferencias a la media de las mediciones realizadas en cada piezómetro.

La medida tradicional de la calibración fue realizar una comparación entre los mapas piezometricos medidos y simulados, (Figura 18), los cuales producen visualmente una carga, la medida cualitativa de la similitud entre los patrones nos proporciona una idea de la distribución espacial de error en la calibración. Sin embargo, los mapas de piezometricos de los datos de campo incluyen errores introducidos al momento de su distribución, de manera que no deben utilizarse como única prueba de calibración. La (Figura 19) muestra la calibración entre la carga calculada y la observada.

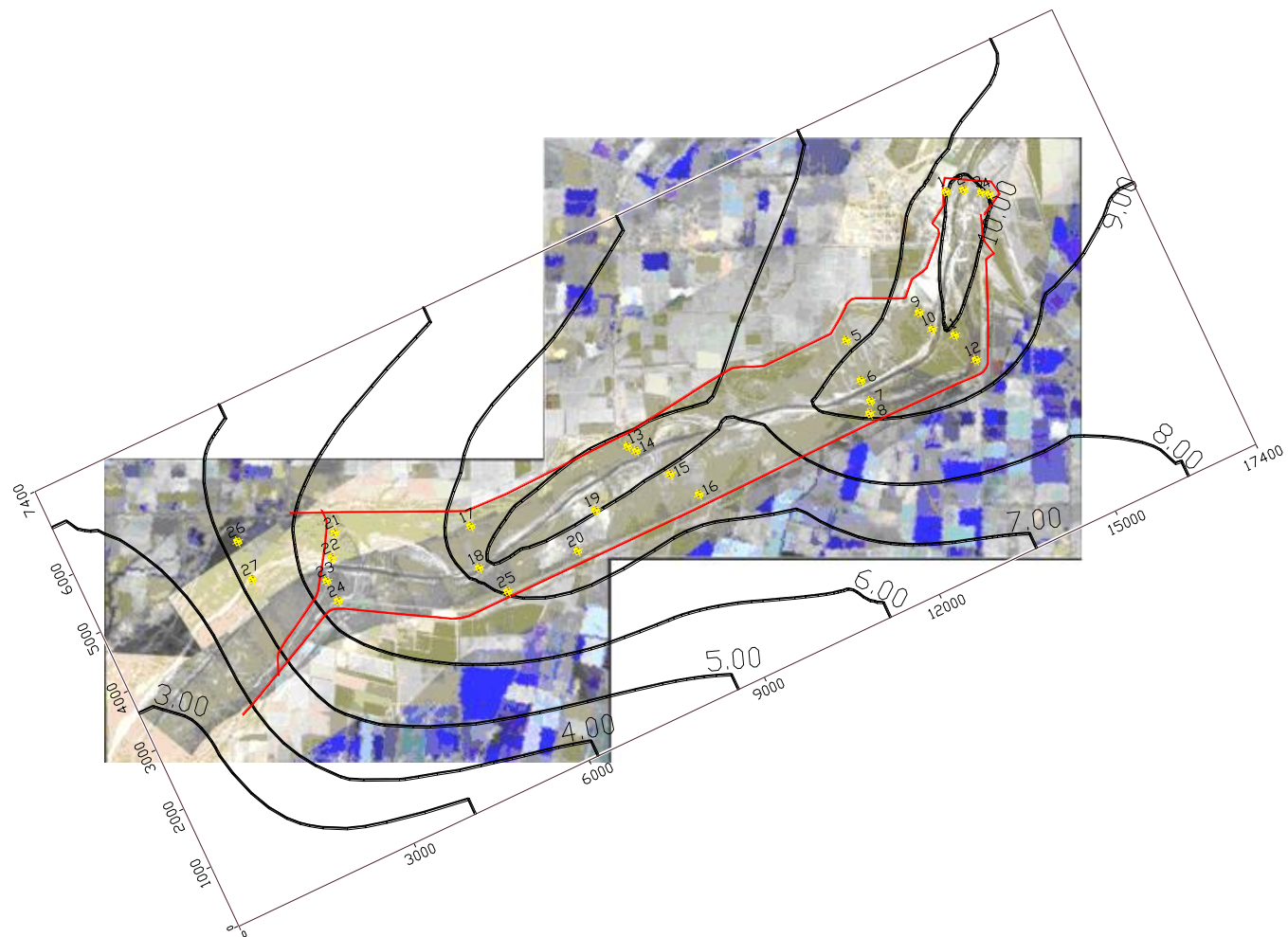


Figura 18. Superficie piezométrica observadas comparadas con las calculadas.

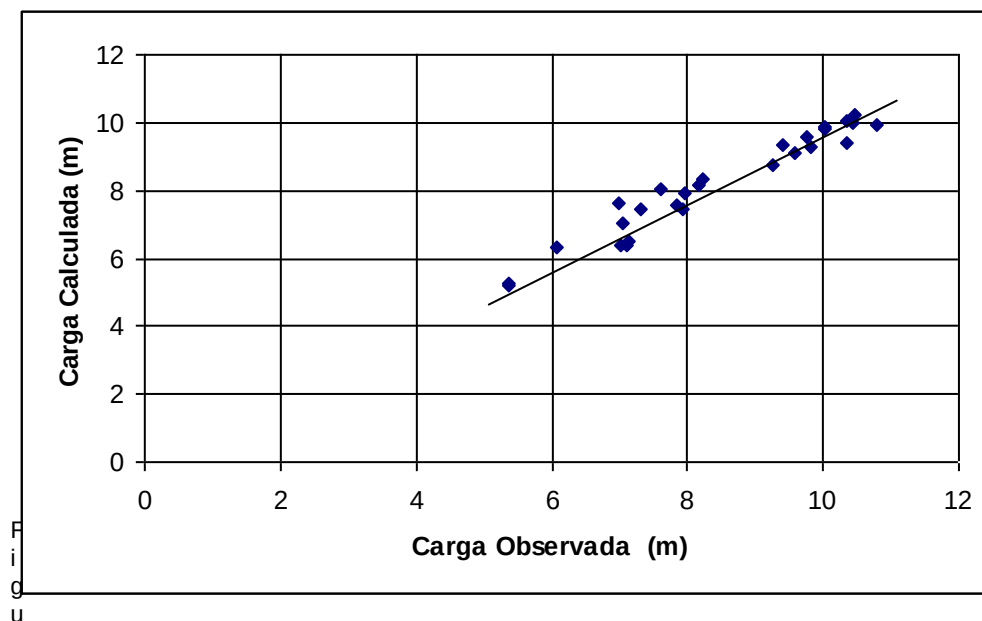


Figura 19. Carga calculada contra carga observada.

Debido a que las cargas observadas son el principal conjunto de datos que permiten comparar la carga calculada de acuerdo a sus diferencias y algunos tipos de promedio de las diferencias son maneras que comúnmente se reportan en los resultados de la calibración (Tabla 4). El promedio de las diferencias es cuantificable en el error promedio de la calibración. El objetivo de la calibración es minimizar este error.

Piezómetro	Obs.	Calc.
1	10.79	9.95033
2	10.47	10.2067
3	10.35	10.0486
4	10.43	9.96518
5	9.26	8.7479
6	9.42	9.36897
7	9.81	9.27102
8	9.58	9.081
9	9.76	9.54693
10	10.03	9.7842
11	10.03	9.86625
12	10.35	9.37624
13	8.18	8.17199
14	8.23	8.31846
15	7.95	7.911
16	7.92	7.42613
17	7.325	7.45209
18	7.838	7.5474
19	7.62	8.01675
20	7	7.60691
21	7.018	6.40057
22	7.131	6.51101
23	7.107	6.4052
24	6.0875	6.30532
25	7.05	7.05653
26	5.354	5.23677
27	5.376	5.21229

Tabla 4. Carga observada y Calculada de los piezómetros.

Para ello hay tres maneras estadísticas que evalúan el promedio de las diferencias entre la carga observada y la calculada de los niveles de agua. Los indicadores estadísticos empleados incluyen el *error medio* (ME), *error medio absoluto* (MAE), y *error medio de la raíz cuadrada* (RMS).

El error medio (ME) significa la diferencia entre las cargas observadas (h_m) y la simulada (h_s).

$$ME = 1/n \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i$$

Donde n es el número de valores calibrados. Este método es muy útil para evaluar la precisión de un modelo, pero resulta menos útil cuando hay un gran número de datos positivos y negativos ya que estos valores son incorporados en la media y pueden cancelar el error.

El error medio absoluto significa el valor absoluto de las diferencias de las cargas observadas y calculadas.

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i|$$

El error medio de la raíz cuadrada (RMS) o Desviación estándar es el promedio de las diferencias al cuadrado entre las cargas observadas y calculadas.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_a)_i^2}$$

La Tabla 5 muestra el error calculado en la modelización.

Error medio	-0.024
Error medio absoluto	0.3541
Error medio de la raíz cuadrada	0.438

Tabla 5. Error calculado en la condiciones iniciales de la modelización.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Mediciones del Nivel Estático

En esta sección se presenta los registros obtenidos de profundidad al nivel estático (PNE) y elevación del nivel estático (ENE) (Tabla 6). Estos datos han sido tabulados considerando las fechas en que fueron medidos y considerando todos los 27 piezómetros que forman parte de este estudio. Se presentan también de forma gráfica las variaciones de la ENE con respecto del tiempo en cada piezómetro y agrupados por secciones. En todos los casos, la línea continua corresponde a las mediciones automáticas y los asteriscos a las mediciones manuales. Haciendo énfasis que los valores de la ENE corresponden al periodo de Abril 2005 hasta Octubre 2007, dos periodos anuales (en términos agrícolas los periodos anuales corresponden a años agrícolas del 1º de Octubre al 3º de Septiembre), dentro de la zona de estudio.

El aumento y disminución del nivel de agua observado en las (Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28). Esta estrechamente relacionado con el periodo de riego agrícola efectuado a los diferentes tipos de cultivos producidos en el Valle de Mexicali. La (Figura 20) muestra la asignación de agua en Mm3 para cada uno de los cultivos en el año agrícola 2005-2006.

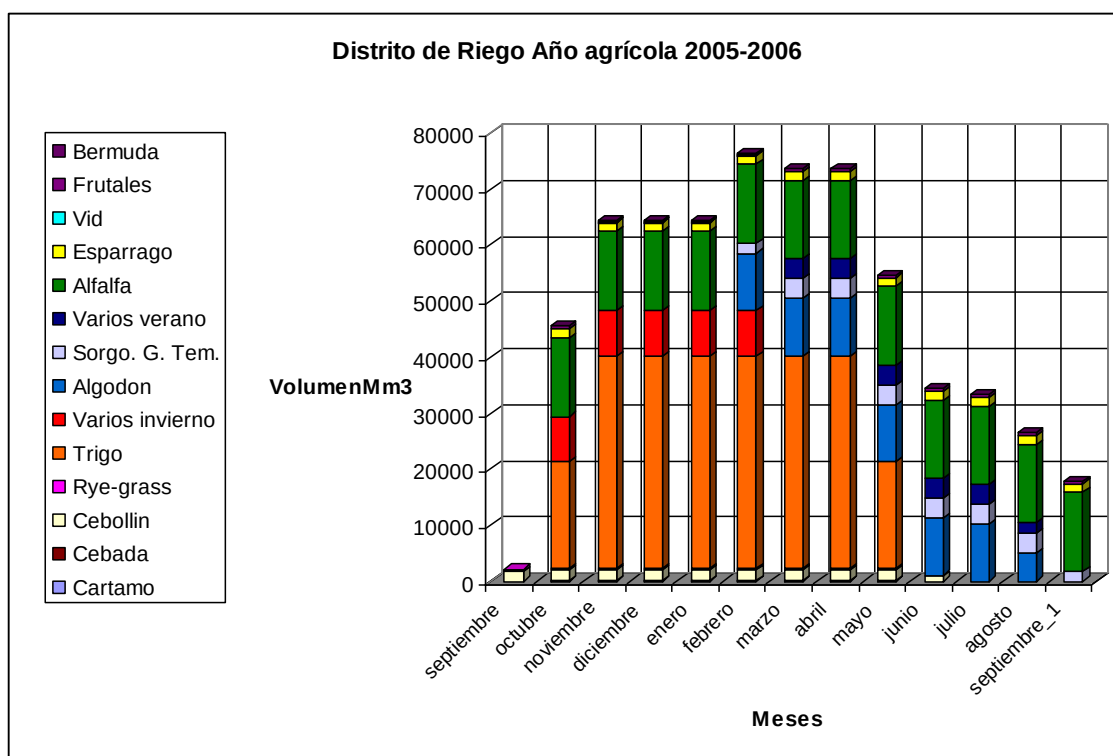


Figura 20. Asignación de agua para los diferentes tipos de cultivos en el Valle de Mexicali. Año agrícola 2005-2006.

Unidades msnm

Piezometro	7 abril 05		21 Mayo 05		30 Junio 05		5 Agosto 05		23 Septiembre 05		7 Octubre 05		10 Octubre 05		24 Octubre 05		15 Noviembre 05	
	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE
RC-M1	3.47	11.18	3.48	11.17							4.08	10.57	4.09	10.56	4.17	10.48	4.11	10.54
RC-M2	3.88	10.77											4.35	10.30	4.15	10.50	4.32	10.33
RC-M3	0.00	15.27	4.78	10.49	4.92	10.35	5.05	10.22	5.08	9.57			5.06	10.21	4.93	10.34	5.01	10.26
RC-M4	3.36	10.78	3.45	10.69	3.65	10.49							3.80	10.34	3.71	10.43	3.74	10.40
RC-M5	3.12	10.03	3.54	9.61	3.91	9.24	4.14	9.01	4.10	11.17	4.29	8.86	4.29	8.86	4.19	8.96	4.13	9.02
RC-M6	3.45	9.95	3.72	9.68	3.93	9.47	4.06	9.34	4.12	10.02	4.29	9.11	4.28	9.12	4.19	9.21	4.16	9.24
RC-M7	1.21	10.46	1.38	10.29	2.02	9.65	2.14	9.53	2.21	10.94			2.37	9.30	2.25	9.42	2.22	9.45
RC-M8	2.79	10.34	3.43	9.70	3.87	9.26	3.99	9.14	4.02	9.38			4.14	8.99	3.98	9.15	3.94	9.19
RC-M9	3.26	10.42	3.68	10.00									4.34	9.34	4.25	9.43	4.23	9.45
RC-M10													3.76	9.36	3.62	9.50	3.65	9.47
RC-M11				13.72							3.99	9.73	3.97	9.75	3.83	9.89	3.96	9.76
RC-M12	3.35	11.10		14.45							4.30	10.15	4.30	10.15	4.29	10.16	4.31	10.14
RC-M13																		
RC-M14																		
RC-M15																		
RC-M16																		
RC-M17																		
RC-M18																		
RC-M19																		
RC-M20																		
RC-M21																		
RC-M22																		
RC-M23																		
RC-M24																		
RC-M25																		
RC-M26																		
RC-M27																		

☐ Periodo seco
☐ Piezometros no realizados

Unidades msnm

Piezometro	1 Diciembre 05		14 Diciembre 05		29 Diciembre 05		12 Enero 06		27 Enero 06		9 Febrero 06		23 Febrero 06		15 Marzo 06		11 Abril 06	
	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE
RC-M1	4.12	10.53	4.08	10.57	3.77	10.88	3.86	10.79	4.22	10.43	3.79	10.86	3.75	10.90	3.59	11.06	3.57	11.08
RC-M2	4.29	10.36	4.26	10.39	4.11	10.54	4.19	10.46	4.19	10.46	4.13	10.52	4.18	10.47	4.15	10.50	4.10	10.55
RC-M3	4.99	10.28	4.95	10.32	4.90	10.37	4.93	10.34	4.95	10.32	4.84	10.44	4.98	10.29	4.95	10.32	4.98	10.29
RC-M4	3.77	10.37	3.67	10.47	3.67	10.47	3.69	10.45	3.69	10.45	3.69	10.45	3.80	10.34	3.70	10.44	3.69	10.45
RC-M5	3.93	9.22	3.76	9.39	3.79	9.36	3.77	9.38	3.74	9.41	3.66	9.50	3.57	9.58	3.40	9.76	3.37	9.78
RC-M6	4.09	9.31	4.17	9.23	3.97	9.43	3.94	9.46	3.93	9.47	3.83	9.57	3.87	9.53	3.73	9.67	3.80	9.60
RC-M7	2.22	9.45	2.18	9.49	2.12	9.55	2.13	9.54	2.10	9.57	2.06	9.61	2.20	9.47	1.99	9.69	2.00	9.67
RC-M8	3.88	9.25	3.82	9.31	3.78	9.35	3.76	9.37	3.70	9.43	3.67	9.46	3.59	9.54	3.51	9.62	3.51	9.62
RC-M9	4.10	9.58	3.92	9.76	3.85	9.83	3.85	9.83	3.83	9.85	3.76	9.92	3.72	9.96	3.59	10.09	3.58	10.10
RC-M10	3.58	9.54	3.49	9.63	3.41	9.71	3.40	9.72	3.38	9.74	3.36	9.76	3.31	9.81	3.26	9.86	3.26	9.86
RC-M11	3.91	9.81	3.85	9.87	3.82	9.90	4.03	9.69	3.78	9.94	3.77	9.95			3.67	10.05	3.65	10.07
RC-M12	4.18	10.27	4.11	10.34	4.04	10.41	3.82	10.63	3.95	10.50	3.91	10.55			3.62	10.83	3.35	11.10
RC-M13							2.91	8.61	2.74	8.78	2.71	8.81	2.60	8.92	2.59	8.93	2.50	9.02
RC-M14							3.16	8.71	3.05	8.82	3.00	8.87	2.93	8.94	2.87	9.00	2.83	9.04
RC-M15									3.24	8.43	3.17	8.50	3.14	8.53	3.07	8.60	3.10	8.57
RC-M16									4.08	7.35	3.04	8.40	3.98	7.45	2.89	8.54	2.94	8.49
RC-M17							7.26	4.25	SECO		Seco		seco		seco			
RC-M18					4.13	8.57	4.16	8.54	4.10	8.60	4.04	8.66	4.07	8.63	3.92	8.78	3.95	8.75
RC-M19									3.20	8.12	3.18	8.14	3.14	8.18	3.00	8.32	2.96	8.36
RC-M20									NP									
RC-M21							4.48	6.99	4.37	7.10	4.31	7.17	4.23	7.24	4.13	7.35	4.00	7.47
RC-M22							4.36	7.39	4.25	7.51	4.10	7.66	4.70	7.05	3.96	7.79	3.89	7.86
RC-M23							4.40	7.06	3.95	7.51	3.85	7.61	3.76	7.70	3.66	7.80	3.61	7.85
RC-M24									4.16	6.27	4.15	6.28	4.00	6.43	3.90	6.53	3.79	6.64
RC-M25									1.71	7.58	1.62	7.67			1.52	7.77		
RC-M26									5.37	5.51	5.28	5.60	5.16	5.72	5.07	5.82	4.89	5.99
RC-M27									5.08	5.60	4.94	5.74	4.83	5.85	4.73	5.95	4.61	6.07
		Periodo seco																
		Piezometros no realizados																

Unidades msnm

Piezometro	25 Abril 06		13 Mayo 06		25 Mayo 06		9 Junio 06		26 Junio 06		8 Julio 06		27 Julio 06		10 Agosto 06	
	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE
RC-M1	3.68	10.97	3.80	10.85	3.90	10.75	4.00	10.65	4.12	10.53	4.18	10.47	4.22	10.43	4.24	10.41
RC-M2	4.18	10.48	4.36	10.29	4.33	10.32	4.40	10.25	4.45	10.21	4.44	10.21	4.43	10.23	4.43	10.22
RC-M3	5.09	10.18	5.08	10.19	5.14	10.13	5.21	10.06	5.26	10.01	5.22	10.05	5.23	10.05	5.21	10.06
RC-M4	3.77	10.38	3.82	10.32	3.89	10.26	3.95	10.19	4.10	10.04	4.01	10.13	4.06	10.08	4.06	10.08
RC-M5	3.41	9.74	3.73	9.42	3.92	9.23	4.04	9.11	4.27	8.88	4.37	8.78	4.55	8.61	4.66	8.49
RC-M6	3.88	9.52	3.99	9.41	4.07	9.33	4.12	9.28	4.23	9.17	4.28	9.12	4.38	9.02	4.45	8.95
RC-M7	2.04	9.63	2.14	9.53	2.19	9.48	2.25	9.42	2.34	9.33	2.39	9.28	2.48	9.19	2.55	9.12
RC-M8	3.60	9.53	3.75	9.38	3.84	9.29	3.98	9.15	4.11	9.02	4.13	9.00	4.21	8.92	4.31	8.82
RC-M9	3.59	10.09	3.80	9.88	3.96	9.72	3.99	9.69	4.12	9.56	4.25	9.43	4.35	9.33	4.41	9.27
RC-M10	3.33	9.79	3.43	9.69	3.53	9.59	3.57	9.55	3.68	9.44	3.75	9.37	3.81	9.31	3.90	9.22
RC-M11	3.69	10.03			3.84	9.88	3.90	9.82	3.96	9.76	3.98	9.74	4.06	9.66	4.13	9.59
RC-M12	3.63	10.82			3.89	10.56	3.98	10.47	4.90	9.55	4.15	10.30	4.25	10.20	4.31	10.14
RC-M13	2.63	8.89	2.76	8.76	2.85	8.67	3.00	8.52	3.23	8.29	3.38	8.14	3.60	7.92	3.75	7.77
RC-M14	2.95	8.93	3.07	8.80	3.17	8.71	3.28	8.59	3.58	8.29	3.68	8.19	0.00		4.04	7.83
RC-M15	3.17	8.50	3.28	8.39	3.39	8.28	3.48	8.19	3.88	7.79	3.72	7.95	3.25	8.42	4.04	7.63
RC-M16	2.96	8.47	3.04	8.39	3.15	8.28	3.22	8.21	4.06	7.38	3.44	7.99	3.64	7.80	3.76	7.67
RC-M17							4.50	7.01			3.39	8.12	5.94	5.57	3.72	7.79
RC-M18	3.98	8.72	4.06	8.64	4.21	8.49	4.45	8.25	4.79	7.91	4.93	7.77	5.18	7.52	5.30	7.40
RC-M19	3.00	8.32	3.04	8.28	3.15	8.17	3.26	8.06	3.53	7.79	3.60	7.72	3.79	7.53	3.90	7.42
RC-M20							3.18				4.78		3.69		5.00	
RC-M21	4.00	7.48	4.12	7.35	4.24	7.23	4.36	7.11	4.52	6.95	4.62	6.85	4.79	6.68	4.88	6.59
RC-M22	3.89	7.86			4.15	7.60	4.34	7.41	4.53	7.22	4.62	7.13	4.78	6.98	4.88	6.87
RC-M23	3.64	7.82	3.76	7.70	3.98	7.48	4.12	7.34	4.39	7.07	4.45	7.01	4.65	6.81	4.73	6.73
RC-M24	3.76	6.67	3.84	6.59	3.94	6.49	4.17	6.26	4.24	6.19	4.34	6.09	4.51	5.92	4.60	5.83
RC-M25	1.51	7.78			1.79	7.50	1.90	7.39	2.12	7.17	2.23	7.06	2.32	6.97	2.50	6.79
RC-M26	4.92	5.96	5.09	5.79	5.27	5.61	5.40	5.48	5.65	5.23	5.69	5.19	5.85	5.04	5.91	4.97
RC-M27	4.60	6.08	4.73	5.95	4.91	5.77	5.08	5.60	5.28	5.40	5.39	5.29	5.56	5.12	5.64	5.04
	Periodo seco															

Unidades msnm

Piezometro	25 Agosto 06		9 Septiembre 06		26 Septiembre 06		12 Octubre 06		30 Octubre 06		8 Noviembre 06		30 Noviembre 06		14 Diciembre 06		10 Enero 07	
	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE
RC-M1	4.18	10.47	4.18	10.47	4.27	10.38	4.26	10.39	4.31	10.34	4.1	10.549	3.96	10.689	4.00	10.65	3.83	10.82
RC-M2	4.38	10.27	4.36	10.29	4.40	10.26	4.38	10.27	4.39	10.27	4.27	10.382	4.23	10.422	4.22	10.43	4.15	10.50
RC-M3	5.22	10.06	5.16	10.11	5.18	10.09	5.12	10.15	5.12	10.16	5.05	10.222	5.06	10.212	4.98	10.29	4.94	10.33
RC-M4	4.07	10.07	4.03	10.11	4.01	10.13	3.96	10.18	3.91	10.23	3.86	10.281	3.82	10.321	3.76	10.38	3.71	10.43
RC-M5	4.65	8.50	4.65	8.50	4.59	8.57	4.49	8.66	4.40	8.75	4.27	8.88	4.08	9.07	4.00	9.15	3.82	9.33
RC-M6	4.52	8.89	4.50	8.90	4.37	9.03	4.32	9.08	4.26	9.14	4.2	9.203	4.04	9.363	3.97	9.43	3.84	9.56
RC-M7	2.60	9.07	2.57	9.10	2.11	9.57	2.25	9.42	2.17	9.50	1.45	10.22	1.32	10.35	1.49	10.18	1.12	10.55
RC-M8	4.31	8.82	4.28	8.85	4.02	9.11	3.98	9.15	3.95	9.18	3.56	9.565	3.46	9.665	3.47	9.66	3.22	9.91
RC-M9	4.45	9.23	4.46	9.22	4.40	9.28	4.35	9.33	4.22	9.46	4.1	9.575	3.95	9.725	3.84	9.84	3.66	10.02
RC-M10	3.90	9.22	3.88	9.24	3.80	9.32	3.71	9.41	3.58	9.54	3.5	9.618	3.295	9.823	3.22	9.90	3.13	9.99
RC-M11	4.10	9.62	3.94	9.78	3.83	9.89	3.75	9.97	3.61	10.11	3.51	10.206	3.41	10.306	0.00		3.30	10.42
RC-M12	4.16	10.29	3.78	10.67	3.67	10.78	3.57	10.88	3.52	10.93	3.46	10.993	3.41	11.043	0.00		3.31	11.14
RC-M13	3.88	7.64	3.93	7.59	4.17	7.35	4.09	7.43	4.14	7.38	4.14	7.379	3.74	7.779	3.63	7.89	3.15	8.37
RC-M14	4.18	7.69	4.27	7.60	4.39	7.48	4.42	7.45	4.46	7.41	4.43	7.444	4.075	7.799	3.96	7.91	3.43	8.44
RC-M15	4.15	7.52	4.24	7.43	4.32	7.35	4.37	7.30	4.36	7.31	4.33	7.338	4.11	7.558	3.94	7.73	3.62	8.05
RC-M16	3.82	7.61	3.93	7.50	4.02	7.41	4.02	7.41	3.96	7.47	3.44	7.991	3.79	7.641	3.62	7.81	3.36	8.07
RC-M17	5.09	6.42	5.15	6.36	5.20	6.31	5.24	6.27	5.26	6.25	5.25	6.255	5.115	6.39	5.02	6.49	4.86	6.65
RC-M18	5.43	7.27	5.52	7.18	5.62	7.08	5.70	7.00	5.77	6.94	5.77	6.933	5.725	6.978	5.64	7.06	4.66	8.04
RC-M19	4.07	7.25	4.26	7.06	4.34	6.98	4.42	6.90	4.38	6.94	4.37	6.949	0		4.11	7.21	3.75	7.57
RC-M20	3.87		3.96		3.88		4.10		4.03		4.03		3.91		3.85		3.47	
RC-M21	4.97	6.50	5.04	6.43	5.10	6.38	5.13	6.34	5.17	6.30	seco		5.09	6.383	5.00	6.47	4.92	6.55
RC-M22	4.98	6.77	5.07	6.68	5.15	6.60	5.20	6.55			5.27	6.481	5.31	6.441	5.21	6.54	5.10	6.65
RC-M23	4.84	6.62	4.90	6.56	4.97	6.49	5.00	6.46	5.05	6.41	5.03	6.432	5.1	6.362	4.92	6.54	4.79	6.67
RC-M24	4.69	5.74	4.75	5.68	4.83	5.60	4.90	5.53	4.93	5.50	4.9	5.527	4.92	5.507	4.86	5.57	4.72	5.71
RC-M25	2.59	6.70	2.67	6.62	2.88	6.41	2.96	6.33	2.81	6.48	2.73	6.558	2.56	6.728	2.51	6.78	2.17	7.12
RC-M26	5.97	4.91	6.01	4.87	6.07	4.81	6.08	4.80	6.10	4.78	6.09	4.794	5.96	4.924	5.86	5.02	5.75	5.13
RC-M27	5.73	4.95	5.78	4.90	5.85	4.83	5.89	4.79	5.90	4.78	5.9	4.776	5.81	4.866	5.73	4.95	5.62	5.06
	Periodo seco																	

Unidades msnm

Piezometro	25 Enero 07		14 Febrero 07		25 Febrero 07		26 Marzo 07		26 Marzo 07		18 Abril 07		30 Abril 07		9 Mayo 07		1 Junio 07	
	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE
RC-M1	3.71	10.94	3.52	11.129	3.62	11.029	3.52	11.129	3.42	11.229	3.4	11.249	3.405	11.244	3.4	11.249	3.62	11.029
RC-M2	4.06	10.59	3.98	10.672	4.02	10.632	3.99	10.662	3.94	10.712	3.92	10.732	3.92	10.732	3.93	10.722	3.94	10.712
RC-M3	4.97	10.30	4.88	10.392	4.94	10.332	4.84	10.432	4.87	10.402	4.79	10.482	4.78	10.492	4.8	10.472	4.83	10.442
RC-M4	3.70	10.44	3.63	10.511	3.64	10.501	3.6	10.541	3.56	10.581	3.54	10.601	3.53	10.611	3.57	10.571	3.63	10.511
RC-M5	3.78	9.37	3.7	9.45	3.58	9.57	3.65	9.5	3.55	9.6	3.67	9.48	3.71	9.44	3.9	9.25	3.99	9.16
RC-M6	3.82	9.58	3.72	9.683	3.75	9.653	3.78	9.623	3.75	9.653	3.84	9.563	3.885	9.518	3.94	9.463	4.035	9.368
RC-M7	1.29	10.38	1.23	10.44	1.37	10.3	1.59	10.08	1.67	10	1.82	9.85	1.795	9.875	1.92	9.75		
RC-M8	3.24	9.89	3.09	10.035	3.08	10.045	3.2	9.925	3.26	9.865	3.42	9.705	3.4	9.725	3.56	9.565	3.46	9.665
RC-M9	3.60	10.08	3.545	10.13	3.45	10.225	3.38	10.295	3.38	10.295	3.4	10.275	3.52	10.155	3.64	10.035	3.81	9.865
RC-M10	3.09	10.03	3.02	10.098	2.27	10.848	2.95	10.168	2.92	10.198	2.96	10.158	3.02	10.098	3.07	10.048	3.17	9.948
RC-M11	3.31	10.41	3.26	10.456	3.26	10.456	3.24	10.476	3.24	10.476	3.26	10.456	3.24	10.476	3.26	10.456	3.31	10.406
RC-M12	3.36	11.09	3.34	11.113	3.37	11.083	3.39	11.063	3.405	11.048	3.4	11.053	3.44	11.013	3.47	10.983	3.63	10.823
RC-M13	3.05	8.47	2.81	8.709	3.69	7.829	2.61	8.909	2.58	8.939	2.54	8.979	2.655	8.864	2.76	8.759	2.93	8.589
RC-M14	3.36	8.51	3.15	8.724	3.04	8.834	2.96	8.914	3.04	8.834	2.88	8.994	2.97	8.904	3.08	8.794	3.225	8.649
RC-M15	3.53	8.14	3.36	8.308	3.3	8.368	3.2	8.468	3.175	8.493	3.22	8.448	3.225	8.443	3.32	8.348	3.42	8.248
RC-M16	3.28	8.15	3.03	8.401	3.05	8.381	2.95	8.481	2.95	8.481	2.96	8.471	2.965	8.466	3.08	8.351	3.12	8.311
RC-M17	4.75	6.76	4.54	6.965	4.37	7.135	4.23	7.275	4.11	7.395	3.97	7.535	4.02	7.485	4.13	7.375	4.37	7.135
RC-M18	4.39	8.31	4.2	8.503	4.11	8.593	4.05	8.653	3.99	8.713	3.96	8.743	3.98	8.723	4.03	8.673	4.31	8.393
RC-M19	3.46	7.86	3.28	8.039	3.18	8.139	3.12	8.199	3.065	8.254			3.03	8.289	3.07	8.249	3.205	8.114
RC-M20	3.94		3.21		3.12		3.09		3.08				2.96		3.02		3.07	
RC-M21	4.81	6.66	4.64	6.833	4.55	6.923	4.44	7.033	3.74	7.733	4.25	7.223	4.23	7.243	4.25	7.223	4.44	7.033
RC-M22	4.83	6.92	4.59	7.161	4.45	7.301	4.33	7.421	4.23	7.521	4.14	7.611	4.11	7.641	5.13	6.621	4.4	7.351
RC-M23	4.38	7.08	4.2	7.262			3.81	7.652	4.33	7.132	3.64	7.822			3.68	7.782	3.99	7.472
RC-M24	4.61	5.82	4.42	6.007	4.34	6.087	4.23	6.197	4.16	6.267	4.05	6.377	4.04		4.03	6.397	4.21	6.217
RC-M25	2.05	7.24	0		1.66	7.628	1.68	7.608	1.69	7.598	1.69	7.598	1.755		1.66	7.628	1.92	7.368
RC-M26	5.68	5.20	5.56	5.324	5.48	5.404	5.38	5.504	5.24	5.644	5.2	5.684	5.23		5.26	5.624	5.51	5.374
RC-M27	5.57	5.11	5.44	5.236	5.32	5.356	5.18	5.496	5.09	5.586	5.95	4.726	4.92		4.96	5.716	5.23	5.446
	Periodo seco																	

Unidades msnm

Piezometro	13 Junio 07		27 Junio 07		25 Julio 07		8 Agosto 07		4 Septiembre 07		18 Octubre 07		8 Noviembre 07	
	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE	PNE	ENE
RC-M1	3.68	10.969	3.74	10.91	3.94	10.71	4.04	10.61	4.03	10.62	4.25	10.4	4.25	10.4
RC-M2	3.93	10.722	4.04	10.61	4.18	10.47	4.25	10.4	4.21	10.44	4.25	10.4	4.25	10.4
RC-M3	4.86	10.412	4.92	10.35	5.02	10.25	5.04	10.23	5.04	10.23	4.99	10.28	4.99	10.28
RC-M4	3.67	10.471	3.73	10.41	3.85	10.29	3.88	10.26	3.92	10.22	3.85	10.29	3.85	10.29
RC-M5	4.09	9.06	4.21	8.94	4.47	8.68	4.55	8.6	4.63	8.52	4.51	8.64	4.51	8.64
RC-M6	4.07	9.333	4.14	9.263	4.34	9.063	4.37	9.033	4.39	9.013	4.25	9.153	4.25	9.153
RC-M7	2.14	9.53	2.22	9.45	2.45	9.22	2.44	9.23	2.41	9.26	2.27	9.4	2.27	9.4
RC-M8	3.72	9.405	3.83	9.295	4.09	9.035	4.09	9.035	4.12	9.005	4	9.125	4	9.125
RC-M9	3.88	9.795	3.96	9.715	4.1	9.575	4.17	9.505	4.3	9.375	4.25	9.425	4.25	9.425
RC-M10	3.22	9.898	3.3	9.818	3.43	9.688	3.53	9.588	3.72	9.398	3.59	9.528	3.59	9.528
RC-M11	3.35	10.366	3.45	10.27	3.6	10.12	3.73	9.986	3.85	9.866	3.7	10.02	3.7	10.02
RC-M12	3.98	10.473	4.55	9.903	4.36	10.09	4.27	10.18	3.89	10.56	3.8	10.65	3.8	10.65
RC-M13	3.08	8.439	3.27	8.249	3.6	7.919	3.72	7.799	3.87	7.649	4.06	7.459	4.06	7.459
RC-M14	3.38	8.494	3.56	8.314	3.93	7.944	4.04	7.834	4.21	7.664	4.4	7.474	4.4	7.474
RC-M15	3.49	8.178	3.63	8.038	3.92	7.748	3.98	7.688	4.2	7.468	4.33	7.338	4.33	7.338
RC-M16	3.23	8.201	3.34	8.091	3.6	7.831	3.62	7.811	3.85	7.581	3.94	7.491	3.94	7.491
RC-M17	4.48	7.025	4.64	6.865	3.93	7.575	4.95	6.555	3.1	8.405	5.23	6.275	5.23	6.275
RC-M18	4.52	8.183	4.79	7.913	5.16	7.543	5.3	7.403	4.55	8.153	5.81	6.893	5.81	6.893
RC-M19	3.35	7.969	3.53	7.789	3.83	7.489	3.94	7.379						
RC-M20	3.2		3.37		3.58		3.64		3.85		4.07		4.07	
RC-M21	4.51	6.963	4.64	6.833	4.87	6.603	4.94	6.533	5.1	6.373				
RC-M22	4.51	7.241	4.66	7.091	4.92	6.831	5	6.751	5.17	6.581	5.35	6.401	5.35	6.401
RC-M23	4.1	7.362	4.26	7.202	4.51	6.952	4.6	6.862	4.76	6.702	4.89	6.572	4.89	6.572
RC-M24	4.28	6.147	4.42	6.007	4.62	5.807	4.7	5.727	4.85	5.577				
RC-M25	1.94	7.348	2.11	7.178	2.41	6.878	2.6	6.688	2.77	6.518	2.93	6.358	2.93	6.358
RC-M26	5.6	5.284	5.75	5.134	5.93	4.954	6	4.884	6.12	4.764	6.17	4.714	6.17	4.714
RC-M27	5.32	5.356	5.47	5.206	5.69	4.986	5.77	4.906	5.91	4.766	6	4.676	6	4.676
		Periodo seco												

Tabla 6. Datos de mediciones sistemática de niveles piezométricos.

3.2 Secciones Transversales

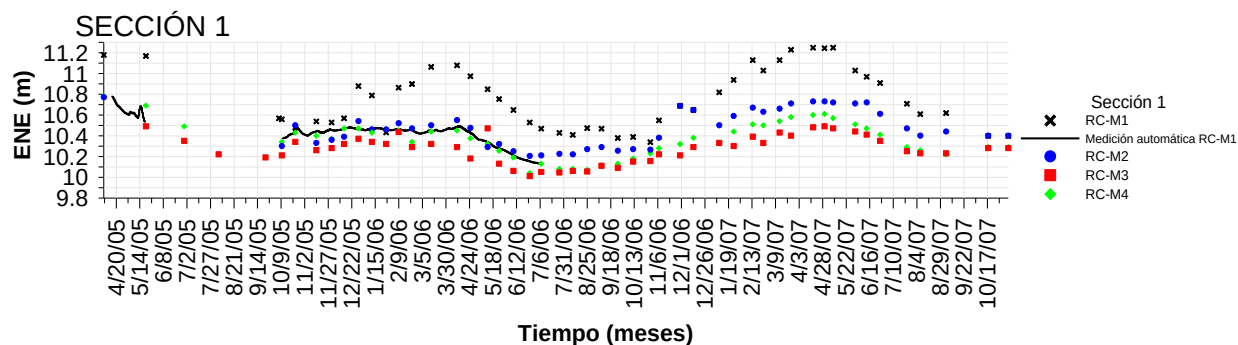


Figura 21. Elevación del nivel piezométrico en los piezómetros de la sección 1.

La Figura 21 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 1, la cual está ubicada aguas arriba de la vía del ferrocarril. Está integrada por los piezómetros RC-M1, RC-M2 (margen derecha) y RC-M3, RC-M4 (margen izquierda) (figura 16). Se perforaron en marzo y abril del 2005. El piezómetro RC-M1 se localiza a 370 m y el piezómetro RC-M2 se localiza a 70 m aproximadamente del cauce del río. En la margen izquierda el piezómetro RC-M3 se localiza a 130 m y el piezómetro RC-M4 a 240 m del cauce del río aproximadamente. La (Tabla 7), muestra la ENE máxima y mínima observada en el ciclo Primavera-Verano (2006-2007) y Otoño-Invierno (2006-2007) el mayor aumento sucedió en el 2007 en los piezómetros de la margen derecha (RC-M1 y RC-M2), lo que permite concluir que este año tuvo una mayor recarga que pudo ser provocada por diversos sucesos.

Piezómetro	ENE máx.	ENE mín.	ENE máx.	ENE mín.
	Primavera- Verano2006	Otoño-Invierno 2006	Primavera- Verano 2007	Otoño -Invierno 2007
RC-M1	11.079	10.38	11.24	10.6
RC-M2	10.55	10.2	10.73	10.4
RC-M3	10.37	10	10.47	10.22
RC-M4	10.47	10.041	10.61	10.22

Tabla 7. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 4 piezómetros que integran la sección 1

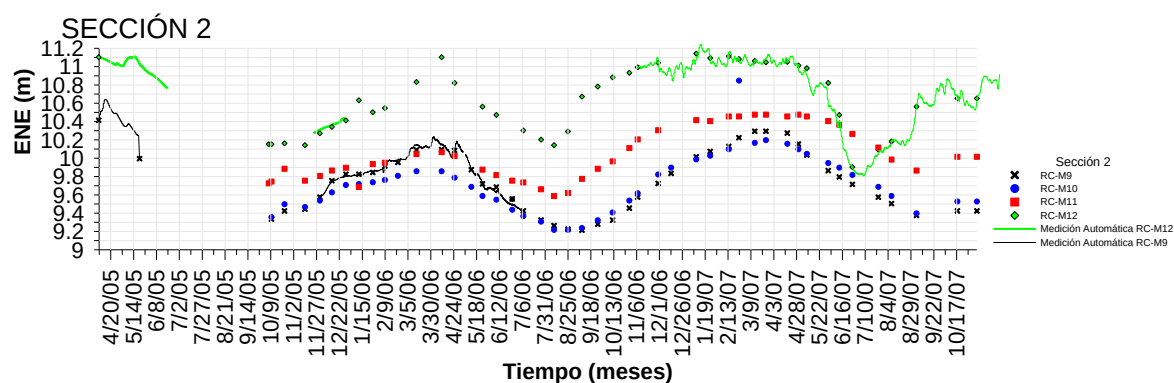


Figura 22. Elevación del nivel piezométrico en los piezómetros de la sección 2.

La Figura 22 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 2, la cual es la primera sección al sur de la vía del ferrocarril, (aguas abajo). Se integra por los piezómetros RC-M9, RC-M10 (margen derecha) y RC-M11, RC-M12 (margen izquierda). De igual manera que la sección 1 se perforaron en marzo y abril del 2005. El piezómetro RC-M9 se localiza a 570 m y el piezómetro RC-M10 a 250 m del cauce del río aproximadamente. El piezómetro RC-M11 se encuentra a 81 m del cauce del río y el piezómetro RC-M12 a 512 m. La (Tabla 8), muestra la ENE máxima y mínima observada en el ciclo Primavera-Verano (2006-2007) y Otoño-Invierno (2006-2007). El mayor aumento sucedió en el 2007 en los piezómetros de la margen izquierda.

Piezómetro	ENE máx. Primavera- Verano2006	ENE mín. Otoño -Invierno 2006	ENE máx. Primavera- Verano 2007	ENE mín. Otoño -Invierno 2007
RC-M9	10.095	9.22	10.3	9.37
RC-M10	9.86	9.22	10.2	9.4
RC-M11	10.066	9.6	10.476	9.87
RC-M12	11.103	10.14	11.14	10.093

Tabla 8. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 4 piezómetros que integran la sección 2.

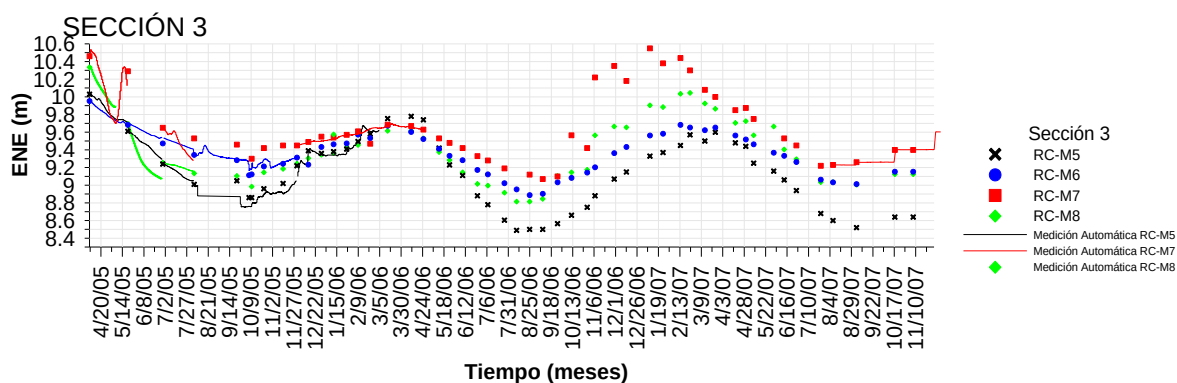


Figura 23. Elevación del nivel piezométrico en los piezómetros de la sección 3.

La Figura 23 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 3, la cual está ubicada al sur aguas abajo de la vía del ferrocarril y de la sección 2. Está integrada por los piezómetros RC-M5, RC-M6 (margen derecha) y RC-M7, RC-M8. (Margen izquierda). Fueron perforados en marzo y abril del 2005.

El piezómetro RC-M5 y el RC-M6 se encuentran a 827 m y a 131 m respectivamente del cauce del río. En la margen izquierda del río se localiza el piezómetro RC-M7 y el RC-M8 que se encuentran a 150 m y a 300 m respectivamente del cauce del río. En el 2007 (Tabla 9) se registro mayor aumento en la ENE, haciendo notar que el piezómetro RC-M7 tuvo un mayor aumento en la ENE por que al estar mas cerca del río lo hace tener esta característica.

Piezómetro	ENE máx.	ENE mín.	ENE máx.	ENE mín.
	Primavera- Verano2006	Otoño-Invierno 2006	Primavera- Verano 2007	Otoño-Invierno 2007
RC-M5	9.78	8.49	9.6	8.52
RC-M6	9.68	8.89	9.68	9
RC-M7	9.68	9.07	10.55	9.22
RC-M8	9.61	8.82	10.045	9

Tabla 9. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 4 piezómetros que integran la sección 3.

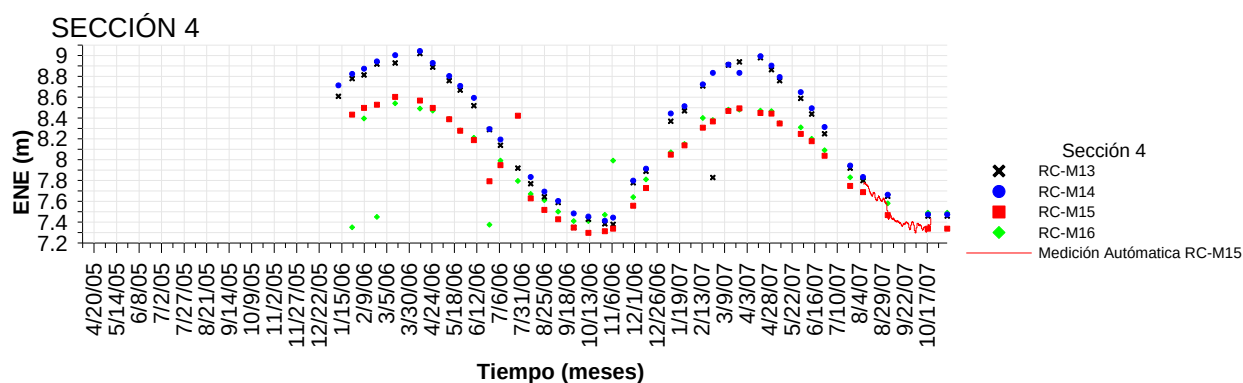


Figura 24. Elevación del nivel piezométrico en los piezómetros de la sección 4.

La Figura 24 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 4, la cual se encuentra situada aguas abajo de la sección 3, esta integrada por los piezómetros RC-M13, RC-M14 (margen derecha) y RC-M15, RC-M16 (margen izquierda). Se perforaron en enero del 2006 por lo tanto la serie de registro abarca desde enero hasta octubre del 2007. El piezómetro RC-M13 y RC-M14 están localizados a 215 m y a 63 m respectivamente del cauce del río. Y los piezómetros RC-M15 y RC-M16 de la margen izquierda se localizan a 500 m y a 1051 m respectivamente del cauce del río. De acuerdo a la (Tabla 10), el mayor aumento en la ENE fue en el ciclo primavera-verano 2006.

Piezómetro	ENE máx.	ENE min. Otoño -Invierno 2006	ENE máx.	ENE min. Otoño -Invierno 2007
	Primavera- Verano2006		Primavera- Verano 2007	
RC-M13	9.044	7.35	8.98	7.49
RC-M14	9.04	7.41	8.99	7.49
RC-M15	8.60	7.30	8.48	7.34
RC-M16	8.54	7.41	8.48	7.49

Tabla 10. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 4 piezómetros que integran la sección 4.

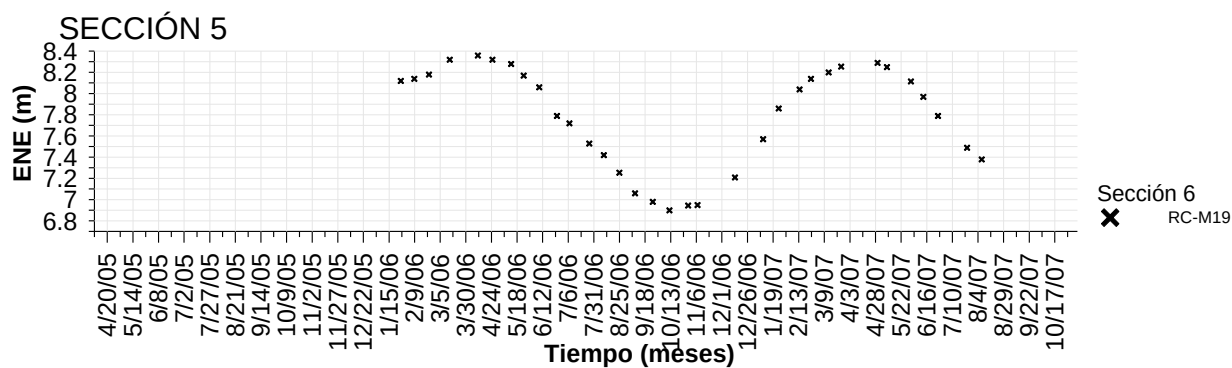


Figura 25. Elevación del nivel piezométrico en el piezómetro de la sección 5.

La Figura 25 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 5, la cual esta localizada al sur de la sección 4 y solo cuenta con 1 piezómetro en la margen izquierda del río. El piezómetro que integra esta sección es el RC-M19. Se perforo en enero del 2006. En la (Tabla 11) se observa el comportamiento durante los ciclos primavera-verano (2006-2007) y otoño-invierno (2006-2007).

Piezómetro	ENE máx.	ENE mín.	ENE máx.	ENE mín.
	Primavera- Verano2006	Verano- Invierno 2006	Primavera- Verano 2007	Verano- Invierno 2007
RC-M19	8.36	6.9	8.29	7.37

Tabla 11. Valores máximos y mínimos de la ENE del piezómetro que integra la sección 5.

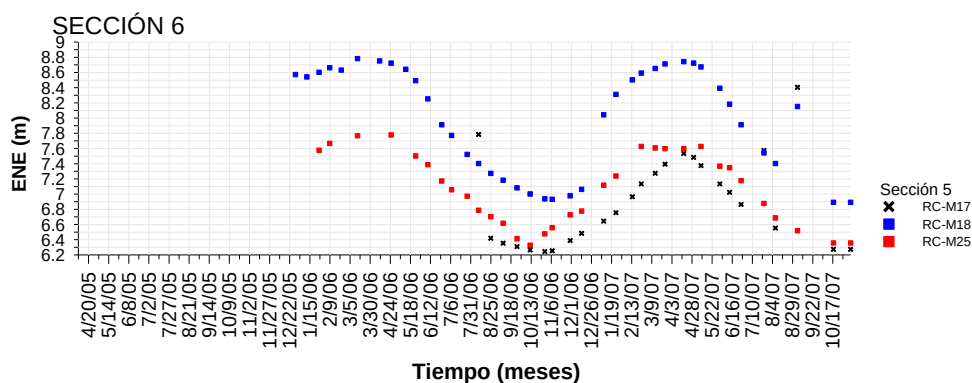


Figura 26. Elevación del nivel piezométrico en el piezómetro de la sección 6.

La Figura 26 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 6, la cual está ubicada al sur de la sección 5. Esta integrada por los piezómetros RC-M17, RC-M18 (margen derecha) y RC-M25 (margen izquierda). Se perforaron en enero del 2006. El piezómetro RC-M17 y RC-M18 se localizan a 610 m y a 21 m respectivamente del cauce de río. El piezómetro RC-M25 se localiza a 490 m aproximadamente del cauce del río. De acuerdo a la (Tabla 12) el comportamiento de la ENE fue muy similar en ambos ciclos de primavera-verano (2006-2007) y otoño-invierno (2006-2007).

Piezómetro	ENE máx.	ENE mín.	ENE máx.	ENE mín.
	Primavera- Verano2006	Otoño - Invierno 2006	Primavera- Verano 2007	Otoño - Invierno 2007
RC-M17	8.40	6.25	7.53	6.27
RC-M18	8.78	6.93	8.74	6.9
RC-M25	7.77	6.33	7.63	6.35

Tabla 12. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 3 piezómetros que integran la sección 6.

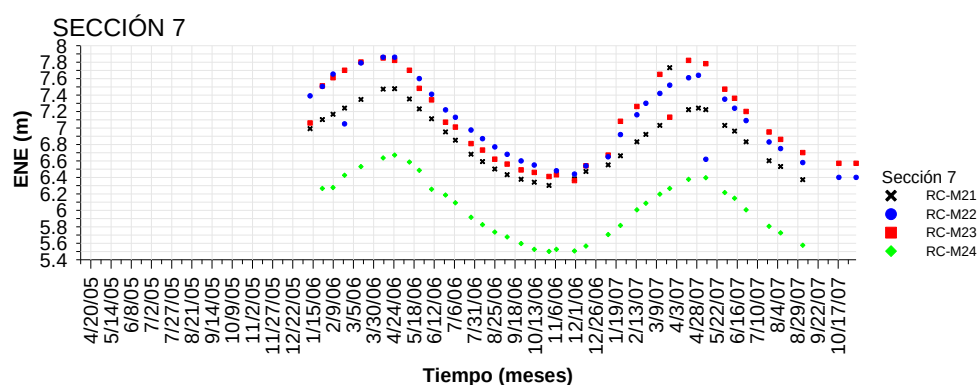


Figura 27. Elevación del nivel piezométrico en el piezómetro de la sección 7.

La Figura 27 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 7, la cual está ubicada sobre el vado Carranza. Está integrada por los piezómetros RC-M21, RC-M22 (margen derecha) y RC-M23, RC-M24 (margen izquierda). Se perforaron en enero del 2006. De acuerdo a la (Tabla 13), la ENE fue mayor en el ciclo primavera-verano 2006.

Piezómetro	ENE máx.	ENE mín.	ENE máx.	ENE mín.
	Primavera- Verano2006	Otoño - Invierno 2006	Primavera- Verano 2007	Otoño - Invierno 2007
RC-M21	7.47	6.3	7.24	6.37
RC-M22	7.86	6.44	7.64	6.4
RC-M23	7.85	6.36	7.82	6.57
RC-M24	6.67	5.5	6.4	5.57

Tabla 13. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 4 piezómetros que integran la sección 7.

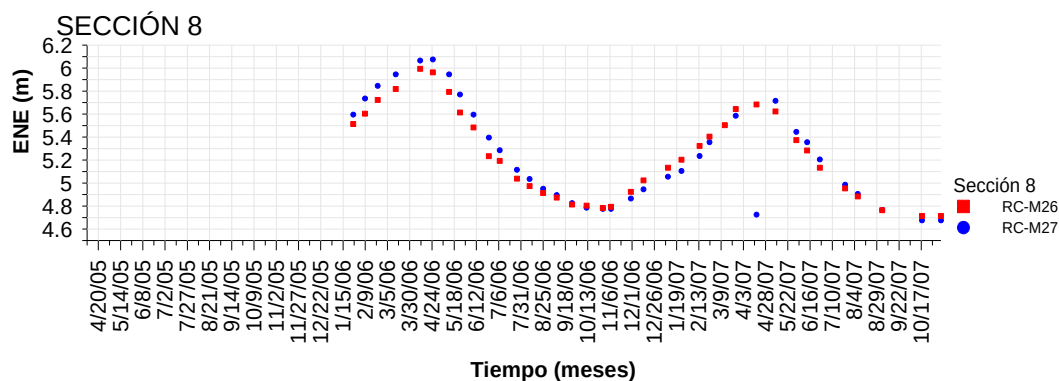


Figura 28. Elevación del nivel piezométrico en el piezómetro de la sección 8.

La Figura 28 representa el comportamiento de la ENE de los piezómetros de la sección 8. La ubicación de esta sección se encuentra aguas abajo del vado Carranza. Está integrada por los piezómetros RC-M26 y RC-M27 en la margen derecha. Fueron perforados en enero del 2006. De acuerdo a la información de la (Tabla 14), los niveles fueron mayores en el 2006.

Piezómetro	ENE máx.	ENE mín.	ENE máx.	ENE mín.
	Primavera- Verano2006	Otoño - Invierno 2006	Primavera- Verano 2007	Otoño - Invierno 2007
RC-M26	5.994	4.77	5.68	4.71
RC-M27	6.07	4.78	5.71	4.676

Tabla 14. Valores máximos y mínimos de la ENE en los 2 piezómetros que integran la sección 8.

4.2 Conductividad Hidráulica

La (Tabla 15) muestra la conductividad hidráulica como resultado de los ensayos slug test en los 15 piezómetros (Anexo I). Se muestra 3 valores diferentes de la conductividad hidráulica donde K1 y K2 corresponden a abatimiento y recuperación respectivamente, dentro de cada uno de los piezómetros estudiados. La K corresponde a la conductividad hidráulica promedio obtenida de la K1 y la K2, de esta manera K será utilizada como el valor de la conductividad hidráulica que se necesita para introducirlo al modelo como parámetro del acuífero y así desarrollar la modelización en el software Modflow. De acuerdo a la litología (Custodio y Llamas, 1983), se definen las arenas gruesas limpias y gravas como ambientes sedimentarios predominantes.

PIEZOMETRO	K1 m/día	K2 m/día	K m/día
RC-M1	94.176	176.256	128.837
RC-M2	168.48	245.376	203.325
RC-M4	117.504	28.6848	58.0567
RC-M5	65.8368	78.8832	72.0654
RC-M6	208.224	256.608	231.154
RC-M7	179.712	195.264	187.327
RC-M9	29.2896	151.2	66.5476
RC-M10	108	110.592	109.288
RC-M11	180.576	146.016	162.379
RC-M12	115.776	151.2	132.308
RC-M14	21.9456	2.35008	7.1815
RC-M15	149.472	2.2896	18.4995
RC-M16	17.8848	5.27904	9.71672
RC-M17	131.328	102.816	116.201
RC-M23	5.73696	10.6272	7.80819

Tabla 15. Valores de la Conductividad Hidráulica obtenida de los ensayos de bombeo en m/día.

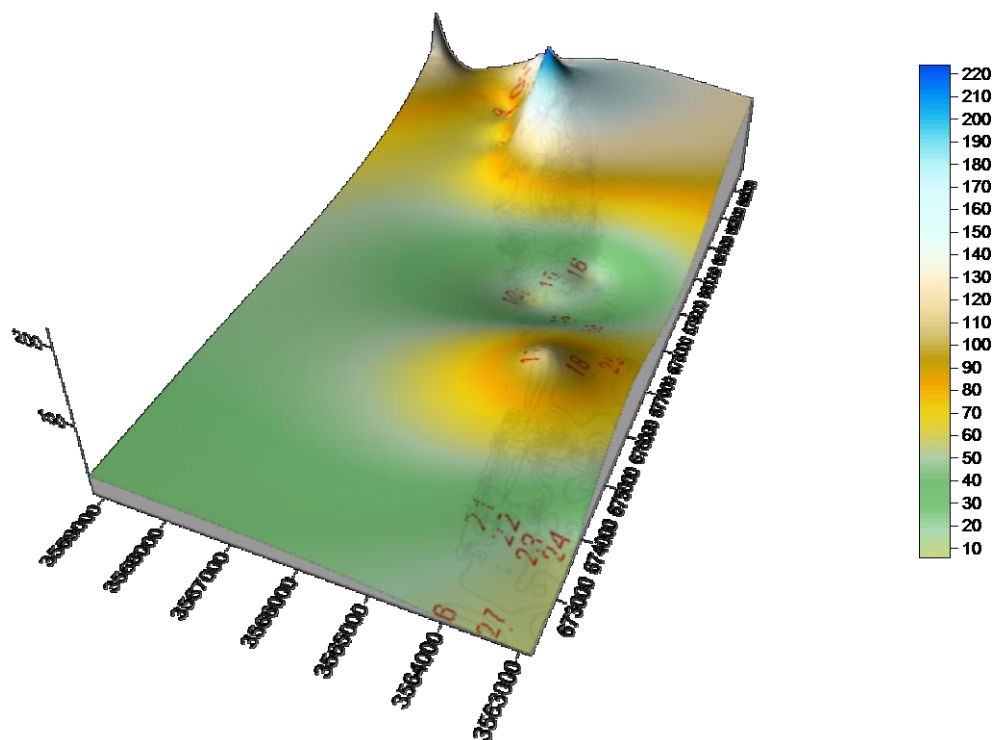


Figura 29. Superficie de la conductividad hidráulica observada. Variación de 7.17984 hasta 224.64 m/día.

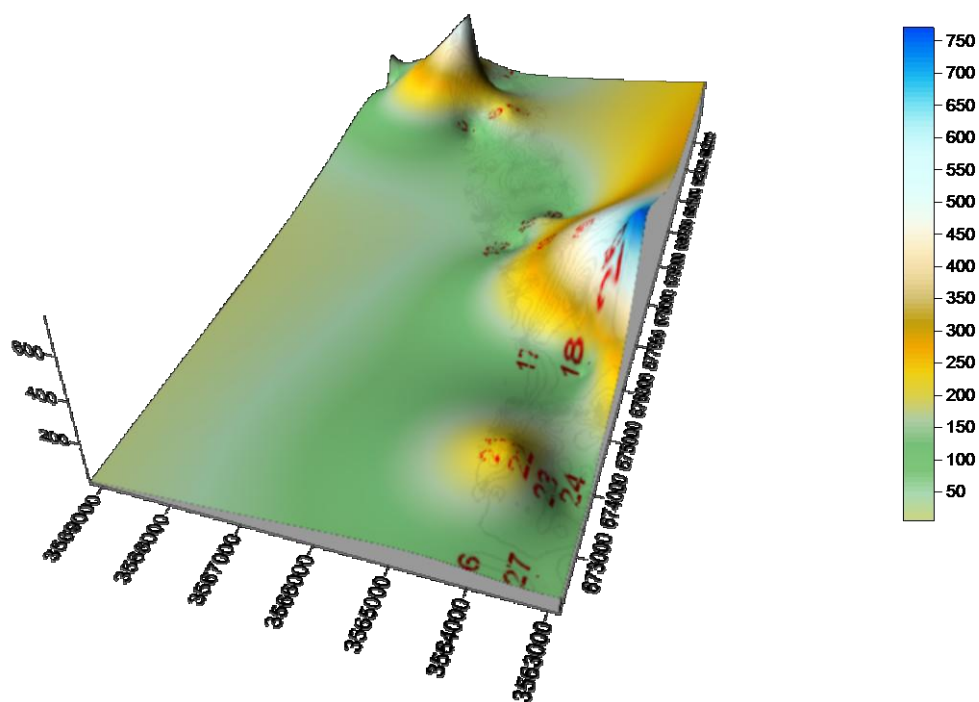


Figura 30. Superficie de la conductividad hidráulica calculada. Variación de 12.0960 hasta 777.6 m/día.

3.4 Resumen del volumen del balance de agua obtenido

El balance en un acuífero es la suma de los diferentes factores en entrada (recarga) menos los de salida (descarga), de manera que esta diferencia debe ser igual a los cambios en el almacenamiento mas una componente de error. (Tabla 16).

BALANCE DE AGUA			
TERMINOS	ENTRADAS (RECARGAS)	SALIDAS (DESCARGAS)	ENTRADA - SALIDA
Carga Constate	519.2833	45589.02	-45069.7367
Río	46259.7	1205.566	45054.134
Total	46778.9833	46794.586	-15.6027
Discrepancia %		-0.03	

Tabla 16. Balance de Agua

4.3 DISCUSIÓN

El mapa de conductividades hidráulicas que resulta de la modelización de flujo en este trabajo se obtuvo utilizando parámetros definidos de los resultados de los ensayos de Bombeo.

La calibración en el modelo estacionario consistió en ajustar por medio de prueba y error la conductividad hidráulica del acuífero de manera que la superficie piezométrica obtenidas del modelo no tuvieran diferencias con la media de las mediciones realizadas en cada piezómetro.

La sección 1 muestra la línea piezométrica observada de 10.5 m y se ubico a 20 cm de la línea piezométrica de 10.5 m calculada. En la zona donde se localizan las secciones 2 y 3 se observa que entre las líneas piezométricas observadas y calculadas existe una separación de 35 y 30cm, considerando que ambas secciones muestran mayor separación de las líneas piezométricas, podría deberse a la alta conductividad hidráulica que hay en esta parte . En dirección aguas abajo se encuentran las 5 secciones restantes, existiendo una separación de entre 20 y 0 cm. De manera que se llego a un mejor ajuste en esta parte de río.

La modelización del Río Colorado, a partir de las fronteras de potencial constante de los trabajos de simulación numérica anteriormente mencionados, arrojaron resultados de los cuales los datos se ajustaron adecuadamente utilizando las fronteras de potencial constante del modelo de (Jael, 2007).

En la porción norte de la zona de estudio, se obtuvo un valor de conductividad observada de 128.83 m/día y una calculada de 12.096 m/día, de manera que surgió una disminución de la conductividad. Por otra parte la sección 2, tuvo cambios solo en uno de los 4 piezómetros que la conforman, esto fue un aumento en el

piezómetro RC-M9 de 60.48 m/día a 604.8 m/día. Los piezómetros que conforman la sección 3, no presentaron cambio alguno. Sin embargo la conductividad hidráulica en los piezómetros de la sección 4 en general aumentaron, se observa que los piezómetros RC-M13 y RC-M14 inicialmente tenían 7.17984m/día y después de la modelación el valor fue de 71.7984 m/día como esto indica que de acuerdo a la nueva conductividad hidráulica el material cambio de una mezcla de arena a arenas gruesas limpias de acuerdo a la literatura (Custodio, 1983), el piezómetro RC-M15 arrojó el valor de 18.4896 m/día y después de la modelación el valor fue de 184.896 m/día, como último piezómetro de esta sección el piezómetro RC-M16 tuvo una conductividad hidráulica de 9.6768m/día y después de la modelación fue de 96.768 m/día. La sección 5 no tiene valores de conductividad hidráulica arrojados de los ensayos Slug, sin embargo es necesario asignar una conductividad hidráulica a los 2 piezómetros que integran esta sección, de manera que el Modflow arrojó un valor de 345.6 m/día y 518.4 m/día respectivamente. La sección 6 esta integrada por los piezómetros RC/M17, RC/M18 los cuales no presentaron ningún cambio en la conductividad, sin embargo el piezómetro RC/M25, presentó un aumento de 77.76 m/día a 777.6 m/día. Y por último se realizó el ensayo en el piezómetro RC-23 de la sección 7, el cual tuvo inicialmente tenía una conductividad de 7.810 m/día y después de la modelización fue de 78.1056 m/día. De manera general los cambios de las conductividades hidráulicas surgidos después de la calibración no afectaron considerablemente en el tipo de material que se encuentra en la zona de estudio.

El balance de agua para el periodo En las tablas del anexo III se muestra las 244 zonas donde se observa la sensibilidad de las recargas y descargas que puede tener el río, determinando que la Zona 35 localizada en la parte Norte de la zona de

estudio muestra una mayor recarga, este comportamiento pudo deberse a la alta conductividad hidráulica en esta sección.

Las variaciones de la ENE que se observaron en la zona de estudio, obedecen a variación en la aplicación de agua para riego, observándose que en los meses en que se lleva a cabo un riego mas intenso (traslape de riegos primavera-verano y otoño-invierno) la ENE es mayor y sufre un decremento en los meses de escasa o nula aplicación de agua. Analizando la información de siembras, riegos y cosechas para cultivos establecidos en el Distrito de Riego 014 Río Colorado, Jefatura de operación se muestra en la (Figura 20). Los volúmenes de agua designados a los principales cultivos en esta zona, de manera muy relacionada al aporte de agua al acuífero como recarga en esta zona de estudio ya que las mediciones piezométricas a lo largo del período de muestreo mostraron variaciones del nivel freático que impactaron en el nivel del RC y su relación hidráulica.

De acuerdo a los valores de la elevación del nivel freático obtenido de campo para cada una de las 8 secciones en el río, nos permite observar que la dirección del agua en la parte Norte de la zona de estudio se dirige hacia adentro del río, es decir que en esta sección el río es ganador. Por el contrario en dirección sur hacia aguas abajo, el agua se dirige hacia afuera del río, de manera que el río es perdedor.

4.4 CONCLUSIONES:

- ❖ El mapa de conductividades arrojó una distribución de valores de conductividades diferentes a lo largo del área de estudio. Dicha conductividad varía de 6.912 hasta 224.64 m/día. Tuvo que ser modificado sustancialmente durante la calibración para reproducir los niveles piezométricos en la mayoría de los piezómetros observados. No obstante, es necesario determinar la conductividad en un mayor número de sitios para afinar el modelo.
- ❖ Este modelo ha considerado las variaciones de la conductividad hidráulica medida en el campo. Los resultados de la modelización arrojan valores de conductividad hidráulica más acordes con los que se esperan para los materiales presentes en el área modelada que van de 12.0960 a 777.6 m/día.
- ❖ No obstante las diferencias si son significativas y es preciso llevar a cabo una calibración del modelo regional con mayor detalle, o bien, los resultados muestran que es posible obtener las alturas piezométricas promedio medidas en la zona.
- ❖ La superficie piezométrica obtenida de la modelización es bastante similar a la obtenida de las mediciones de cada uno de los piezómetros ubicados en 8 secciones de la zona de estudio.
- ❖ El balance de agua para el dominio del modelo, indica un total de entradas de 46641.2 m³/seg. y salidas totales de 46656.88 m³/seg., habiendo una discrepancia de -15.6719 m³/seg. (Tabla 16).
- ❖ No se consideran las variaciones temporales del nivel freático en la modelización del nivel piezométrico ya que se trata del estado estacionario.

- ❖ Con este modelo es posible llevar a cabo la simulación en estado transitorio considerando las variaciones en la elevación del nivel freático como recarga al acuífero de forma espacial utilizando el paquete de recarga.
- ❖ Los resultados del modelo junto con el modelo digital de elevación, que no fue obtenido en este trabajo, permitirán proponer políticas de restauración y conservación del hábitat en la zona riparia considerando la profundidad del nivel freático más adecuada para el tipo de planta que vaya a ser plantada.

5. REFERENCIAS

- Aquifer Test (2000). The intuitive Aquifer Test Análisis Package. Waterloo hydrogeologic
- Ariel Construcciones, S.A. (1968) "Estudio Hidrogeológico preliminar de los Acuíferos del Valle de Mexicali, BC. Y Mesa Arenosa de San Luís Sonora". Contrato de Estudio S/N clave AS-1.
- Custodio E. y Llamas M (1983). Hidrológica Subterránea segunda edición.
- Díaz Cabrera P. (2001). Simulación Numérica del acuífero superior del Valle de Mexicali, Baja California, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación científica y de educación superior de Ensenada.
- Freeze A y Cherry J (1979). Groundwater
- Fundación Proyecto WET Internacional (2005) Descubre una Cuenca el Río Colorado. Serie Descubre una Cuenca.
- García, G., López, A. y Navarro, J. (2004). El impacto del revestimiento del canal "Todo americano" sobre la calidad del agua del acuífero y el rendimiento de los cultivos del Valle de Mexicali. En V. Sánchez (Coord.), El revestimiento del canal todo americano. ¿Competencia o cooperación por el agua en la frontera México Estados Unidos? (pp. 77-105) Tijuana, COLEF-Plaza y Valdés (Colec. México Norte).
- Global Water (2000). Manual del Usuario. Global Water WL14 Water Level Logger. 2000. User's Manual

Gobierno del Estado de Baja California 2007-2013.

http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/recursos/hidrologia.jsp

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática.1995. “Estudio Hidrológico del Estado de Baja California”.

Jael Feirstein, E (2007). Simulation of groundwater conditions in the Colorado River Delta, Mexico. Tesis de Maestría. Department of hydrology and water resources. University of Arizona.

McDonald y Harbaugh, 2006 U.S. Geological Survey “*modular finite-difference groundwater flow model*” Modflow

Pérez González D. (2006) “Interacción hidrodinámica del acuífero del Valle de Mexicali en el tramo ffcc. – vado col. carranza” Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali B.C.

Pitt J, Luecke D, Cohen J, M.Glenn y, Valdés C. 2000. Natural Resources Journal. Water Issues in the U.S. Mexico Borderlands. Vol. 40 pp 819-864.

Ramírez-Hernández, J. (1997) “Estudio de las Relaciones Hidrogeológicas del Acuífero Superior del Valle de Mexicali con Aguas Geotérmicas Superficiales”. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares, España.

Roman, Calleros J. y Ramírez-Hernández J., (2003) Interdependent Border Water Supply Issues: The Imperial and Mexicali Valleys. CHAPTER 2 SCERP MONOGRAPH SERIES NO. 8. The U.S.-MEXICAN Border Environment: Binational Water Management Planning. San Diego State University Press. Page 95-144

Secretaria de Fomento Agropecuario (2008). Principales productos agrícolas. Zonas productoras en el Valle de Mexicali.
http://www.sfa.gob.mx/principales_productos.aspx

Villanueva M. Manuel e Iglesias L. Alfredo 1984. "Pozos y Acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.

Waterloo hydrogeologic Inc.. AquiferTest. The intuitive Aquifer test Analysis Package

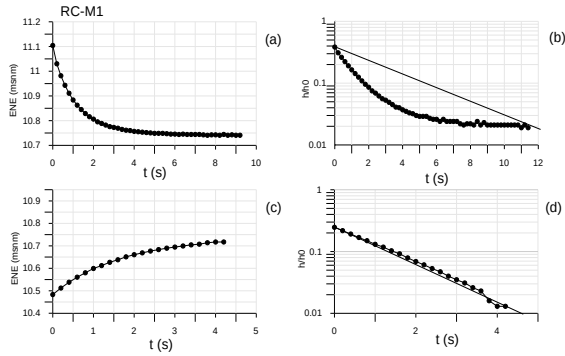
Waterloo hydrogeologic Inc (2006). Visual MODFLOW v.4.2 User's Manual. For Professional Applications in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling

Zamora-Arroyo, F., J. Pitt, S. Cornelius, E. P. Glenn, O. Hinojosa-Huerta, M. Moreno, J. García, P. Nagler, M. De La Garza e I. Parra (2005), Prioridades de conservación en el Delta del Río Colorado, México y Estados Unidos. Realizado por Sonoran Institute, Environmental Defense, Universidad de Arizona, centro de investigación en Alimentación y Desarrollo, Probatu Sonora y por World Wildlife Fund.

ANEXO I

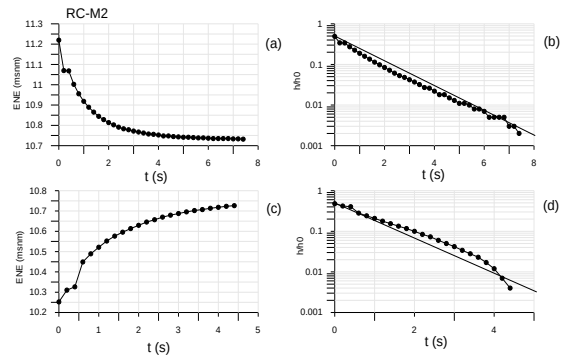
ANALISIS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO CON EL METODO HVORSLEV

PIEZOMETRO RC-M1



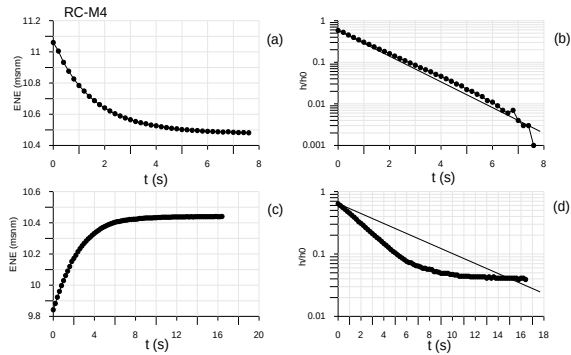
Conductividad Hidráulica
128.8374365 m/día

PIEZOMETRO RC-M2



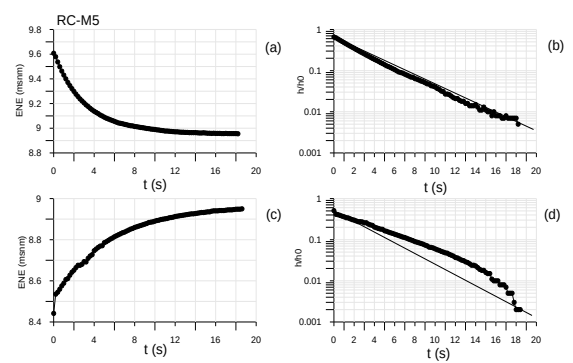
Conductividad Hidráulica
203.04m/día

PIEZOMETRO RC-M4



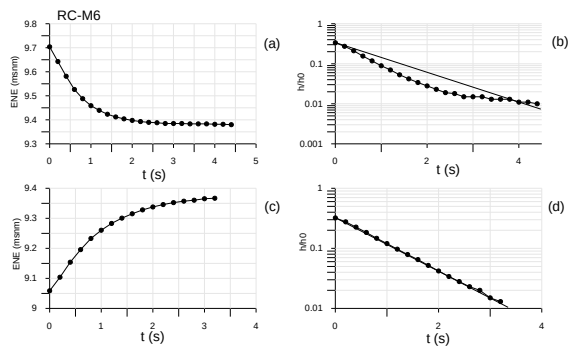
Conductividad Hidráulica
58.0608m/día

PIEZOMETRO RC-M5

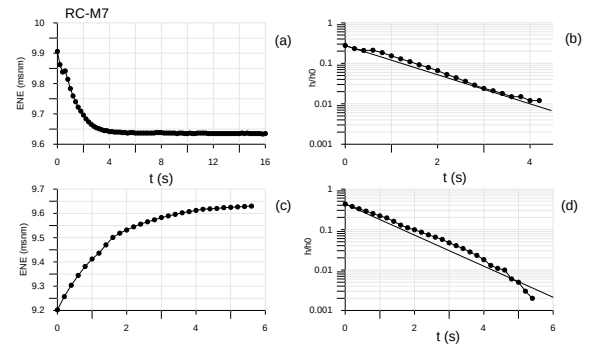


Conductividad Hidráulica
72.0576 m/día

PIEZOMETRO RC-M6



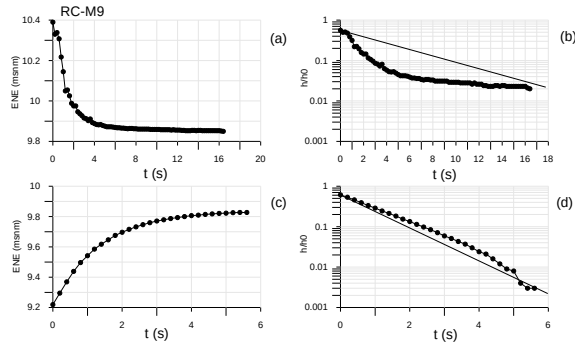
PIEZOMETRO RC-M7



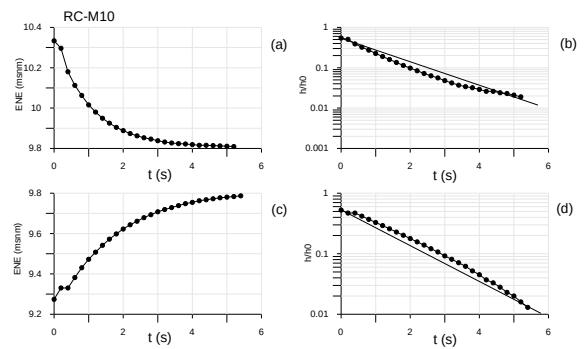
Conductividad Hidráulica
231.154 m/día

Conductividad Hidráulica
187.327 m/día

PIEZOMETRO RC-M9



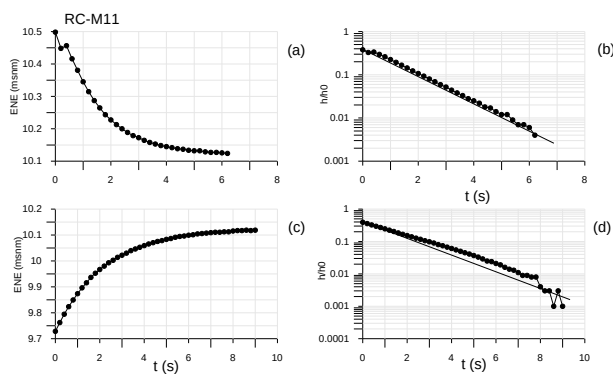
PIEZOMETRO RC-M10



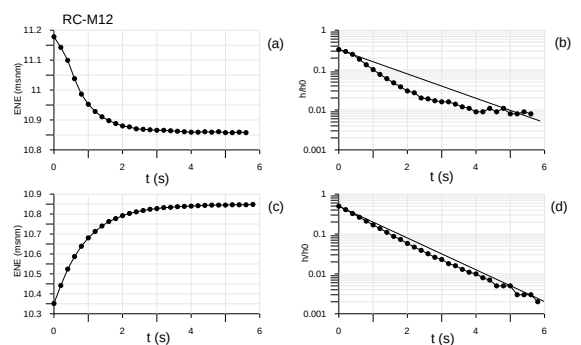
Conductividad Hidráulica
66.5476 m/día

Conductividad Hidráulica
109.288 m/día

PIEZOMETRO RC-M11



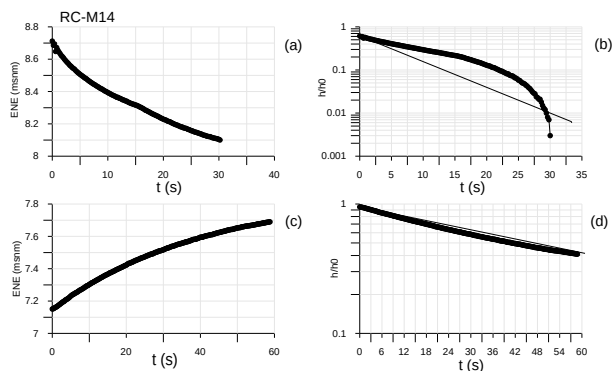
PIEZOMETRO RC-M12



Conductividad Hidráulica
162.379 m/día

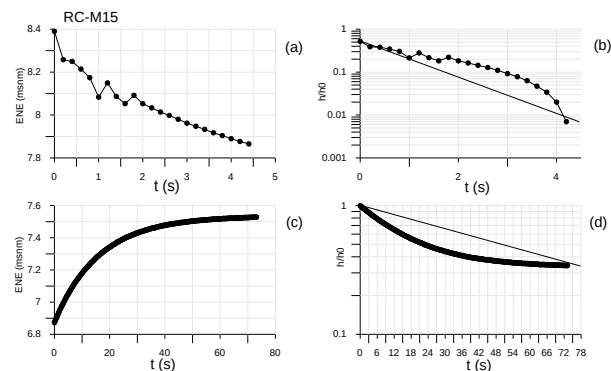
Conductividad Hidráulica
132.308 m/día

PIEZOMETRO RC-M14



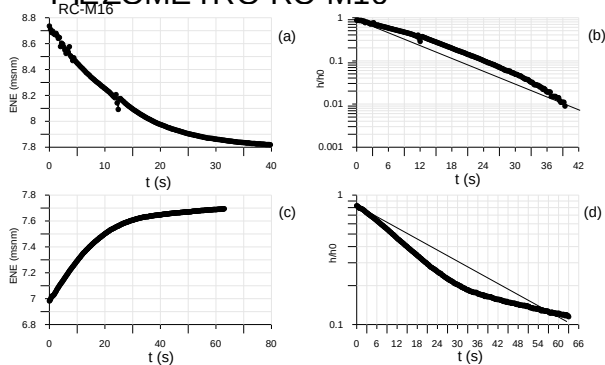
Conductividad Hidráulica
7.1815 m/día

PIEZOMETRO RC-M15



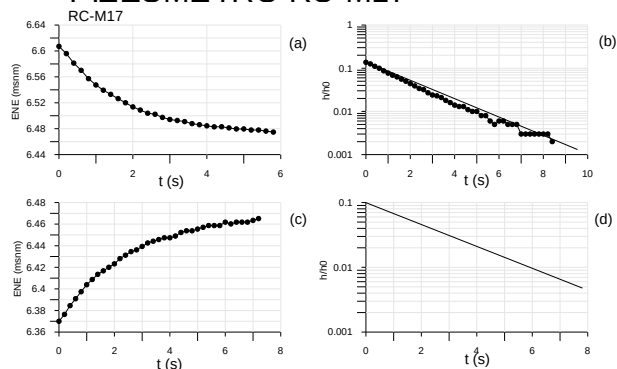
Conductividad Hidráulica
18.4995 m/día

PIEZOMETRO RC-M16



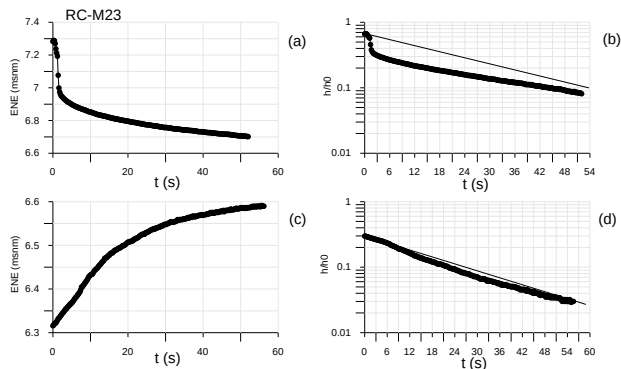
Conductividad Hidráulica
9.71672 m/día

PIEZOMETRO RC-M17



Conductividad Hidráulica
116.201 m/día

PIEZOMETRO RC-M23



Conductividad Hidráulica
7.80819 m/día

Figura 31. Análisis de los ensayos de bombeo con el Método Hvorslev

ANEXO II

Potencial Constante (m)	Columna	Fila
4.314296	1	1
4.342867	2	1
4.371438	3	1
4.400009	4	1
4.42858	5	1
4.457151	6	1
4.485722	7	1
4.514293	8	1
4.542864	9	1
4.571435	10	1
4.600006	11	1
4.628577	12	1
4.657148	13	1
4.685719	14	1
4.71429	15	1
4.742861	16	1
4.771432	17	1
4.800003	18	1
4.828574	19	1
4.857145	20	1
4.885716	21	1
4.914287	22	1
4.942858	23	1
4.971429	24	1
5	25	1
5.028571429	26	1
5.057142857	27	1
5.085714286	28	1
5.114285714	29	1
5.142857143	30	1
5.171428571	31	1
5.2	32	1
5.228571429	33	1
5.257142857	34	1
5.285714286	35	1
5.314285714	36	1
5.342857143	37	1
5.371428571	38	1
5.4	39	1
5.428571429	40	1
5.457142857	41	1
5.485714286	42	1
5.514285714	43	1
5.542857143	44	1
5.571428571	45	1
5.6	46	1
5.628571429	47	1
5.657142857	48	1
5.685714286	49	1
5.714285714	50	1

Potencial Constante (m)	Columna	Fila
5.742857143	51	1
5.771428571	52	1
5.8	53	1
5.828571429	54	1
5.857142857	55	1
5.885714286	56	1
5.914285714	57	1
5.942857143	58	1
5.971428571	59	1
6	60	1
6.03030303	61	1
6.060606061	62	1
6.090909091	63	1
6.121212121	64	1
6.151515152	65	1
6.181818182	66	1
6.212121212	67	1
6.242424242	68	1
6.272727273	69	1
6.303030303	70	1
6.333333333	71	1
6.363636364	72	1
6.393939394	73	1
6.424242424	74	1
6.454545455	75	1
6.484848485	76	1
6.515151515	77	1
6.545454545	78	1
6.575757576	79	1
6.606060606	80	1
6.636363636	81	1
6.666666667	82	1
6.696969697	83	1
6.727272727	84	1
6.757575758	85	1
6.787878788	86	1
6.818181818	87	1
6.848484848	88	1
6.878787879	89	1
6.909090909	90	1
6.939393939	91	1
6.96969697	92	1
7	93	1
7.032258065	94	1
7.064516129	95	1
7.096774194	96	1
7.129032258	97	1
7.161290323	98	1
7.193548387	99	1
7.225806452	100	1

Potencial Constante (m)	Columna	Fila
7.258064516	101	1
7.290322581	102	1
7.322580645	103	1
7.35483871	104	1
7.387096774	105	1
7.419354839	106	1
7.451612903	107	1
7.483870968	108	1
7.516129032	109	1
7.548387097	110	1
7.580645161	111	1
7.612903226	112	1
7.64516129	113	1
7.677419355	114	1
7.709677419	115	1
7.741935484	116	1
7.774193548	117	1
7.806451613	118	1
7.838709677	119	1
7.870967742	120	1
7.903225806	121	1
7.935483871	122	1
7.967741935	123	1
8	124	1
8.03030303	125	1
8.060606061	126	1
8.090909091	127	1
8.121212121	128	1
8.151515152	129	1
8.181818182	130	1
8.212121212	131	1
8.242424242	132	1
8.272727273	133	1
8.303030303	134	1
8.333333333	135	1
8.363636364	136	1
8.393939394	137	1
8.424242424	138	1
8.454545455	139	1
8.484848485	140	1
8.515151515	141	1
8.545454545	142	1
8.575757576	143	1
8.606060606	144	1
8.636363636	145	1
8.666666667	146	1
8.696969697	147	1
8.727272727	148	1
8.757575758	149	1
8.787878788	150	1

Potencial Constante (m)	Columna	Fila
8.818181818	151	1
8.848484848	152	1
8.878787879	153	1
8.909090909	154	1
8.939393939	155	1
8.96969697	156	1
9	157	1
9.030303	158	1
9.060606	159	1
9.090909	160	1

Potencial Constante (m)	Colum na	Fila
4.314296	1	60
4	1	59
3.965517241	1	58
3.931034483	1	57
3.896551724	1	56
3.862068966	1	55
3.827586207	1	54
3.793103448	1	53
3.75862069	1	52
3.724137931	1	51
3.689655172	1	50
3.655172414	1	49
3.620689655	1	48
3.586206897	1	47
3.551724138	1	46
3.517241379	1	45
3.482758621	1	44
3.448275862	1	43
3.413793103	1	42
3.379310345	1	41
3.344827586	1	40
3.310344828	1	39
3.275862069	1	38
3.24137931	1	37
3.206896552	1	36
3.172413793	1	35
3.137931034	1	34
3.103448276	1	33
3.068965517	1	32
3.034482759	1	31
3	1	30
2.96552	1	29
2.93104	1	28
2.89656	1	27
2.86208	1	26
2.8276	1	25
2.79312	1	24
2.75864	1	23
2.72416	1	22
2.68968	1	21
2.6552	1	20
2.62072	1	19
2.58624	1	18
2.55176	1	17
2.51728	1	16
2.4828	1	15
2.44832	1	14
2.41384	1	13
2.37936	1	12
2.34488	1	11

Potencial Constante (m)	Colum na	Fila
2.3104	1	10
2.27592	1	9
2.24144	1	8
2.20696	1	7
2.17248	1	6
2.138	1	5
2.10352	1	4
2.06904	1	3
2.03456	1	2
2.00008	1	1

Potencial Constante (m)	Colum na	Fila
9.090909091	160	1
9.08677686	160	2
9.082644628	160	3
9.078512397	160	4
9.074380165	160	5
9.070247934	160	6
9.066115702	160	7
9.061983471	160	8
9.05785124	160	9
9.053719008	160	10
9.049586777	160	11
9.045454545	160	12
9.041322314	160	13
9.037190083	160	14
9.033057851	160	15
9.02892562	160	16
9.024793388	160	17
9.020661157	160	18
9.016528926	160	19
9.012396694	160	20
9.008264463	160	21
9.004132231	160	22
9	160	23
8.955789474	160	24
8.933684211	160	25
8.911578947	160	26
8.889473684	160	27
8.867368421	160	28
8.845263158	160	29
8.823157895	160	30
8.801052632	160	31
8.778947368	160	32
8.756842105	160	33
8.734736842	160	34
8.712631579	160	35
8.690526316	160	36
8.668421053	160	37
8.646315789	160	38
8.624210526	160	39
8.602105263	160	40
8.58	160	41
8.557894737	160	42
8.535789474	160	43
8.513684211	160	44
8.491578947	160	45
8.469473684	160	46
8.447368421	160	47
8.425263158	160	48
8.403157895	160	49
8.381052632	160	50

Potencial Constante (m)	Colum na	Fila
8.358947368	160	51
8.336842105	160	52
8.314736842	160	53
8.292631579	160	54
8.270526316	160	55
8.248421053	160	56
8.226315789	160	57
8.204210526	160	58
8.182105263	160	59
8.16	160	60

Tabla 17. Potencial constante prescrita para los límites de frontera

ANEXO III

Balance de Flujo Para cada Celda de Río

No.Zona	Entrada (m ³ /seg)	Salida (m3/seg)
Zona 2	0.00013032	0.00013032
Zona 3	0.00057617	0.00057617
Zona 4	0.0013591	0.0013591
Zona 5	0.0013328	0.0013328
Zona 6	0.0016499	0.0016499
Zona 7	0.00118	0.00118
Zona 8	0.0014346	0.0014346
Zona 9	0.0018586	0.0018586
Zona 10	0.0019312	0.0019312
Zona 11	0.0026436	0.0026436
Zona 12	0.00244	0.00244
Zona 13	0.0024378	0.0024378
Zona 14	0.0033855	0.0033855
Zona 15	0.0029955	0.0029955
Zona 16	0.00424	0.00424
Zona 17	0.0013683	0.0013683
Zona 18	0.0015355	0.0015355
Zona 19	0.0016058	0.0016058
Zona 20	0.0018159	0.0018159
Zona 21	0.0023239	0.0023239
Zona 22	0.0013417	0.0013417
Zona 23	0.002334	0.002334
Zona 24	0.0026632	0.0026632
Zona 25	0.0057629	0.0057629
Zona 26	0.00068329	0.00068329
Zona 27	0.0030006	0.0030006
Zona 28	0.0026763	0.0026763
Zona 29	0.0035826	0.0035826
Zona 30	0.0030416	0.0030416
Zona 31	0.0046632	0.0046632
Zona 32	0.009388	0.009388
Zona 33	0.0043282	0.0043282
Zona 34	0.0086463	0.0086463
Zona 35	0.029641	0.029641
Zona 36	0.0048106	0.0048106
Zona 37	0.011943	0.011942
Zona 38	0.0028338	0.002833
Zona 39	0.004844	0.0048438
Zona 40	0.0032119	0.0032113
Zona 41	0.0073101	0.00731
Zona 42	0.002833	0.0028323
Zona 43	0.0067241	0.0067268
Zona 44	0.012371	0.012372
Zona 45	0.0064726	0.0064729
Zona 46	0.0048921	0.0048916
Zona 47	0.0025673	0.0025686
Zona 48	0.0028799	0.0028803
Zona 49	0.0025849	0.002585

Balance de Flujo Para cada Celda de Río

No.Zona	Entrada (m ³ /seg)	Salida (m3/seg)
Zona 50	0.0022771	0.0022779
Zona 51	0.0028051	0.0028047
Zona 52	0.0016894	0.0016882
Zona 53	0.0030617	0.0030618
Zona 54	0.0024197	0.0024221
Zona 55	0.0012166	0.0012204
Zona 56	0.0034792	0.0034791
Zona 57	0.0033596	0.0033597
Zona 58	0.0019216	0.0019236
Zona 59	0.0016552	0.0016557
Zona 60	0.004324	0.0043241
Zona 61	0.003521	0.0035211
Zona 62	0.0019668	0.0019649
Zona 63	0.0036868	0.0036867
Zona 64	0.0027834	0.0027834
Zona 65	0.0027202	0.0027202
Zona 66	0.0034771	0.0034774
Zona 67	0.0023949	0.0023948
Zona 68	0.003346	0.0033473
Zona 69	0.0020671	0.0020688
Zona 70	0.0032997	0.0032995
Zona 71	0.0016557	0.0016531
Zona 72	0.0065772	0.0065775
Zona 73	0.0027831	0.0027814
Zona 74	0.0013476	0.0013491
Zona 75	0.002079	0.0020791
Zona 76	0.0027179	0.0027193
Zona 77	0.0045278	0.0045268
Zona 78	0.0025865	0.0025883
Zona 79	0.0047922	0.0047921
Zona 80	0.0028297	0.0028283
Zona 81	0.0050409	0.0050398
Zona 82	0.00313	0.0031309
Zona 83	0.0060598	0.0060587
Zona 84	0.005297	0.0052954
Zona 85	0.0045278	0.0045273
Zona 86	0.0041046	0.0041051
Zona 87	0.0039625	0.0039609
Zona 88	0.0036226	0.0036223
Zona 89	0.0033134	0.0033136
Zona 90	0.0029811	0.0029828
Zona 91	0.0034155	0.0034164
Zona 92	0.0015483	0.0015489
Zona 93	0.0023913	0.0023925
Zona 94	0.002014	0.0020143
Zona 95	0.0021117	0.0021117
Zona 96	0.0023969	0.0023959
Zona 97	0.0033199	0.0033218

Balance de Flujo Para cada Celda de Río

No.Zona	Entrada (m³/seg)	Salida (m³/seg)
Zona 98	0.0026593	0.0026589
Zona 99	0.0026388	0.0026387
Zona 100	0.0027049	0.0027054
Zona 101	0.0027146	0.0027138
Zona 102	0.0038918	0.0038918
Zona 103	0.0035093	0.0035093
Zona 104	0.0038525	0.0038526
Zona 105	0.0055827	0.0055828
Zona 106	0.0044874	0.0044875
Zona 107	0.0039451	0.0039452
Zona 108	0.003161	0.003161
Zona 109	0.0028076	0.0028077
Zona 110	0.0019268	0.0019269
Zona 111	0.0022598	0.0022598
Zona 112	0.0025405	0.0025405
Zona 113	0.0024006	0.0024006
Zona 114	0.0017207	0.0017207
Zona 115	0.0038074	0.0038074
Zona 116	0.0035233	0.0035233
Zona 117	0.0035826	0.0035826
Zona 118	0.0030598	0.0030598
Zona 119	0.0024345	0.0024345
Zona 120	0.0013738	0.0013738
Zona 121	0.0011473	0.0011473
Zona 122	0.0024454	0.0024454
Zona 123	0.0013314	0.0013314
Zona 124	0.0029037	0.0029037
Zona 125	0.0033745	0.0033745
Zona 126	0.0024238	0.0024238
Zona 127	0.0013769	0.0013769
Zona 128	0.0014248	0.0014248
Zona 129	0.0011054	0.0011054
Zona 130	0.0020727	0.0020727
Zona 131	0.0020753	0.0020753
Zona 132	0.0027832	0.0027832
Zona 133	0.0018984	0.0018984
Zona 134	0.0021882	0.0021882
Zona 135	0.0014421	0.0014421
Zona 136	0.0032906	0.0032906
Zona 137	0.0041504	0.0041504
Zona 138	0.0056494	0.0056494
Zona 139	0.0056006	0.0056006
Zona 140	0.0058998	0.0058998
Zona 141	0.006273	0.006273
Zona 142	0.0074951	0.0074951
Zona 143	0.0084638	0.0084638
Zona 144	0.007648	0.007648
Zona 145	0.0045371	0.0045371

Balance de Flujo Para cada Celda de Río

No.Zona	Entrada (m³/seg)	Salida (m³/seg)
Zona 146	0.0076101	0.0076101
Zona 147	0.0098201	0.0098201
Zona 148	0.010564	0.010564
Zona 149	0.0057796	0.0057796
Zona 150	0.0055644	0.0055644
Zona 151	0.012361	0.012361
Zona 152	0.012331	0.012331
Zona 153	0.013363	0.013363
Zona 154	0.0059197	0.0059197
Zona 155	0.0088241	0.0088241
Zona 156	0.011381	0.011381
Zona 157	0.019146	0.019146
Zona 158	0.017189	0.017189
Zona 159	0.0092585	0.0092585
Zona 160	0.0038677	0.0038677
Zona 161	0.0079277	0.0079277
Zona 162	0.015718	0.015718
Zona 163	0.0086219	0.0086219
Zona 164	0.0058168	0.0058168
Zona 165	0.0081509	0.0081509
Zona 166	0.0035188	0.0035188
Zona 167	0.0042403	0.0042403
Zona 168	0.0039703	0.0039703
Zona 170	0.00415	0.00415
Zona 171	0.0044238	0.0044238
Zona 172	0.0048837	0.0048837
Zona 173	0.004814	0.004814
Zona 174	0.0039613	0.0039613
Zona 175	0.0023387	0.0023387
Zona 176	0.0034678	0.0034678
Zona 177	0.0031175	0.0031175
Zona 178	0.0019453	0.0019453
Zona 179	0.0027335	0.0027335
Zona 180	0.002897	0.002897
Zona 181	0.0010003	0.0010003
Zona 182	0.0025376	0.0025376
Zona 183	0.0026382	0.0026382
Zona 184	0.0010462	0.0010462
Zona 185	0.0020364	0.0020364
Zona 186	0.0013029	0.0013029
Zona 187	0.0028224	0.0028224
Zona 188	0.00097008	0.00097008
Zona 189	0.0026192	0.0026192
Zona 190	0.0007841	0.0007841
Zona 191	0.0019193	0.0019193
Zona 192	0.0022775	0.0022775
Zona 193	0.0019762	0.0019762
Zona 194	0.0011276	0.0011276

Balance de Flujo Para cada Celda de Río

No.Zona	Entrada (m ³ /seg)	Salida (m ³ /seg)
Zona 195	0.0027699	0.0027699
Zona 196	0.0010523	0.0010523
Zona 197	0.0013497	0.0013497
Zona 198	0.0016459	0.0016459
Zona 199	0.0018572	0.0018572
Zona 200	0.00097439	0.00097439
Zona 201	0.0021502	0.0021502
Zona 202	0.0019468	0.0019468
Zona 203	0.0015636	0.0015636
Zona 204	0.0011319	0.0011319
Zona 205	0.00092724	0.00092724
Zona 206	0.00088352	0.00088352
Zona 207	0.00080713	0.00080713
Zona 208	0.00073033	0.00073033
Zona 209	0.00065267	0.00065267
Zona 210	0.00060465	0.00060465
Zona 211	0.00057961	0.00057961
Zona 212	0.00056192	0.00056192
Zona 213	0.00055151	0.00055151
Zona 214	0.00054674	0.00054674
Zona 215	0.0005625	0.0005625
Zona 216	0.00056084	0.00056084
Zona 217	0.00056043	0.00056043
Zona 218	0.00057088	0.00057088
Zona 219	0.0005701	0.0005701
Zona 220	0.00057024	0.00057024
Zona 221	0.00057358	0.00057358
Zona 222	0.0005767	0.0005767
Zona 223	0.00057826	0.00057826
Zona 224	0.00057997	0.00057997
Zona 225	0.00058417	0.00058417
Zona 226	0.00058071	0.00058071
Zona 227	0.00058339	0.00058339
Zona 228	0.00058717	0.00058717
Zona 229	0.000592	0.000592
Zona 230	0.00057288	0.00057288
Zona 231	0.00056986	0.00056986
Zona 232	0.00056038	0.00056038
Zona 233	0.00057509	0.00057509
Zona 234	0.00065454	0.00065454
Zona 235	0.0010332	0.0010332
Zona 236	0.00044254	0.00044254
Zona 237	0.0013138	0.0013138
Zona 238	0.0025329	0.0025329
Zona 239	0.0025414	0.0025414
Zona 240	0.0026554	0.0026554
Zona 241	0.0026564	0.0026564
Zona 242	0.0037222	0.0037222

Balance de Flujo Para cada Celda de Río

No.Zona	Entrada (m ³ /seg)	Salida (m ³ /seg)
Zona 243	0.0044479	0.0044479
Zona 244	0.0052002	0.0052002

 Max. Entrada hacia el Río

Tabla 18. Clasificación del Balance de flujo para el Río

ANEXO IV

N o . P i e z ó m e t r o	C o l u m n a	F i l a
R C - M 1	1 4 1	1 2
R C - M 2	1 4 3	1 3
R C - M 3	1 4 6	1 4
R C - M 4	1 4 7	1 5
R C - M 5	1 1 7	2 6
R C - M 6	1 1 6	3 3
R C - M 7	1 1 6	3 6
R C - M 8	1 1 6	3 8
R C - M 9	1 2 9	2 7
R C - M 10	1 3 0	3 0
R C - M 11	1 3 3	3 3
R C - M 12	1 3 4	3 7
R C - M 13	7 9	2 6
R C - M 14	8 0	2 8
R C - M 15	8 4	3 3
R C - M 16	8 6	3 8
R C - M 17	5 2	2 7
R C - M 18	5 1	3 4
R C - M 19	7 1	3 3
R C - M 20	6 6	3 8
R C - M 21	3 3	1 9
R C - M 22	3 1	2 2
R C - M 23	2 9	2 5
R C - M 24	2 9	2 9
R C - M 25	5 3	3 9
R C - M 26	1 9	1 4
R C - M 27	1 8	2 0

Tabla 18. Celdas ocupadas por los piezómetros.

No. Piezómetro	Columna	Fila
1	141	12
2	143	13
4	147	15
5	117	26
6	116	33
7	116	36
9	129	27
10	130	30
11	133	33
12	134	37
14	80	28
15	84	33
16	86	38
17	52	27
23	29	25

Tabla 19. Celdas ocupadas por los piezómetros donde se realizaron los ensayos de bombeo.