

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VII.1. Generalidades del Modelo

El código seleccionado para la simulación de flujo de agua subterránea del acuífero de la Cuenca del Río Santa Cruz fue el programa MODFLOW, desarrollado por U.S. Geological Survey. Este software fue utilizado para simular condiciones de estado estable considerando datos promedio hasta 1989. Esta decisión fue tomada con base a las conclusiones del estudio elaborado por Técnicas Geológicas y Mineras S.A. para la Comisión Nacional del Agua (1989), que sugiere la condición de equilibrio en el acuífero para el período 1963-1989, ya que no se registraron cambios significativos en los niveles freáticos. Presentándose sólo variaciones estacionales que se atribuyen a los cambios climáticos de la región. La unidad de longitud del modelo fue metros y la unidad de tiempo fue día.

VII.1.1. Paquetes de simulación

Algunos de los paquetes utilizados en este trabajo de simulación fueron:

VII.1.1.1. Basic package. Establece la orientación del área activa del modelo, condiciones de frontera, niveles de agua iniciales, y la discretización del tiempo.

VII.1.1.2. Recharge package. Simula la distribución de recarga en un área (Se simuló principalmente recarga vertical por frente de montaña).

VII.1.1.3. The stream-routing package (STR). Este paquete no es un verdadero modelo de flujo de agua superficial. Es un programa que rastrea el flujo de una o más corrientes superficiales que interactúan con el agua subterránea. El programa permite que dos o más corrientes se conviertan en una sola, con flujo igual a la suma de los flujos tributarios y también permite diversificación de corrientes (Camp Dresser & McKnee Inc., 2001). Este paquete fue utilizado para simular el Río Santa Cruz.

VII.1.1.4. Evapotranspiration package (ET). Simula los efectos de la transpiración de las plantas y evaporación directa que remueven agua del régimen de agua subterránea saturada.

VII.1.1.5. Preconjugate solver (PCG). Fue utilizado para implementar el "Preconjugate gradient solver", un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones lineales simultáneas por iteración.

VII.1.2. Grid o mallado del modelo

El modelo está orientado de sureste a noroeste, paralelo al cauce del Río Santa Cruz. El área fue dividida en un mallado rectangular conformado por 55 columnas y 25 renglones. El ancho de cada celda corresponde a 500 m del dominio del modelo. Además se agregó una celda inactiva por cada extremo del dominio del modelo para delimitar el sistema. Por lo tanto, el dominio de modelación consiste de un rectángulo formado por 57 columnas y 27 renglones. Como fronteras del modelo se tienen al este y oeste la Sierra San Antonio y la Sierra El Pinito, respectivamente. Para que el modelo esté orientado en la dirección de flujo se tomó como coordenada de origen UTM 513,000 m Este 3,465,500 m N, con un ángulo de inclinación de 295°.

VII.2. Modelo Conceptual

VII.2.1. Condiciones del acuífero

Para representar el sistema hidrogeológico se utilizó un modelo de una sola capa. Esta decisión se debe a que este estudio sólo incluye la unidad compuesta por material aluvial y de conglomerado, materiales que constituyen el principal acuífero del sitio. Los espesores del material aluvial no sobrepasan los 50 metros. Por lo tanto, la asignación del valor de las propiedades en cada una de las celdas se realizó considerando el espesor del material aluvial en dicha celda. El acuífero es del tipo no confinado.

VII.2.2. Geometría del dominio del modelo

Los límites extremos, superior e inferior, que delimitan el dominio del modelo no tienen porqué definir un espesor constante. Para definir el espesor de la capa de estudio, se consideró como límite superior el valor de elevación topográfica para cada celda con respecto al nivel del mar, y como límite inferior el correspondiente a la elevación límite donde inicia la subyacente capa de material.

La Fig. 14 es una representación de la topografía del área de estudio, de acuerdo a INEGI (2004). Los valores considerados en el modelo fue con base en las cartas topográficas 1:50000 (H12B31, H12B41, H12B42), editadas por INEGI. Las Tablas A-15 y A-16, muestran los valores considerados para el modelo de elevación topográfica y de fondo de capa, respectivamente. La Fig. 15 muestra una representación del dominio del modelo y la Fig. 16 una sección transversal del mismo, donde se puede apreciar las elevaciones topográficas y las conductividades hidráulicas en la columna 12.

VII.2.3. Condiciones de frontera

Para la exactitud del modelo es muy importante la selección apropiada de las condiciones de frontera. Las celdas en la frontera definen las condiciones hidrogeológicas a lo largo de la frontera del modelo. Hay dos tipos de celdas, las inactivas y las activas. Las celdas inactivas del modelo pueden simular condiciones de no flujo. A menos que sea especificado por una condición de frontera, las celdas en los márgenes del dominio del modelo rectangular actuarán como de no flujo (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2002).

En este modelo hay dos tipos de celdas activas, las celdas de carga variable y las celdas de carga constante. Las celdas de carga variable comprenden la región simulada activa dentro del modelo. Las celdas de carga constante fijan una elevación del nivel de agua a una elevación constante específica.

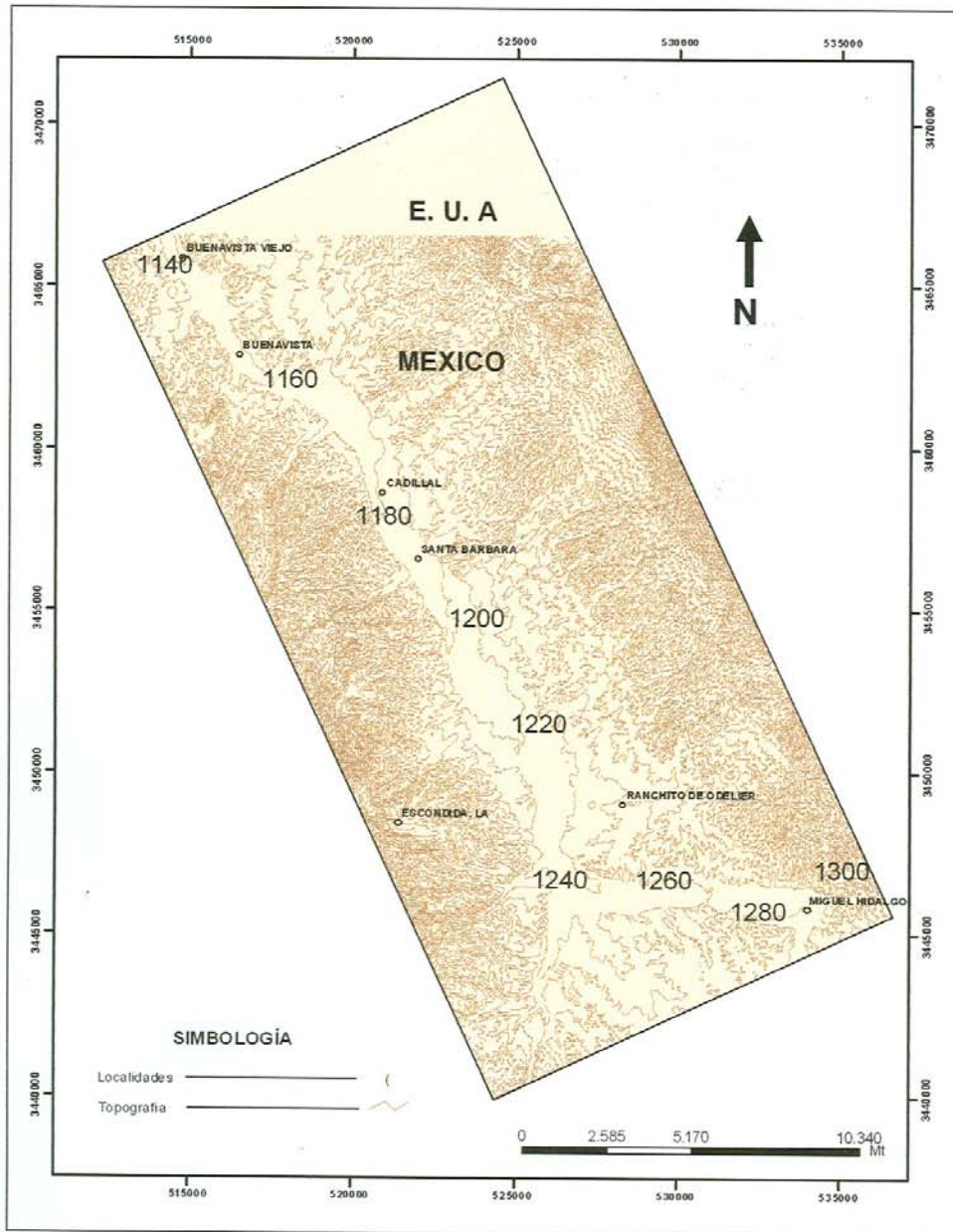


Figura 14. Topografía del área de estudio

Fuente: INEGI (2004)

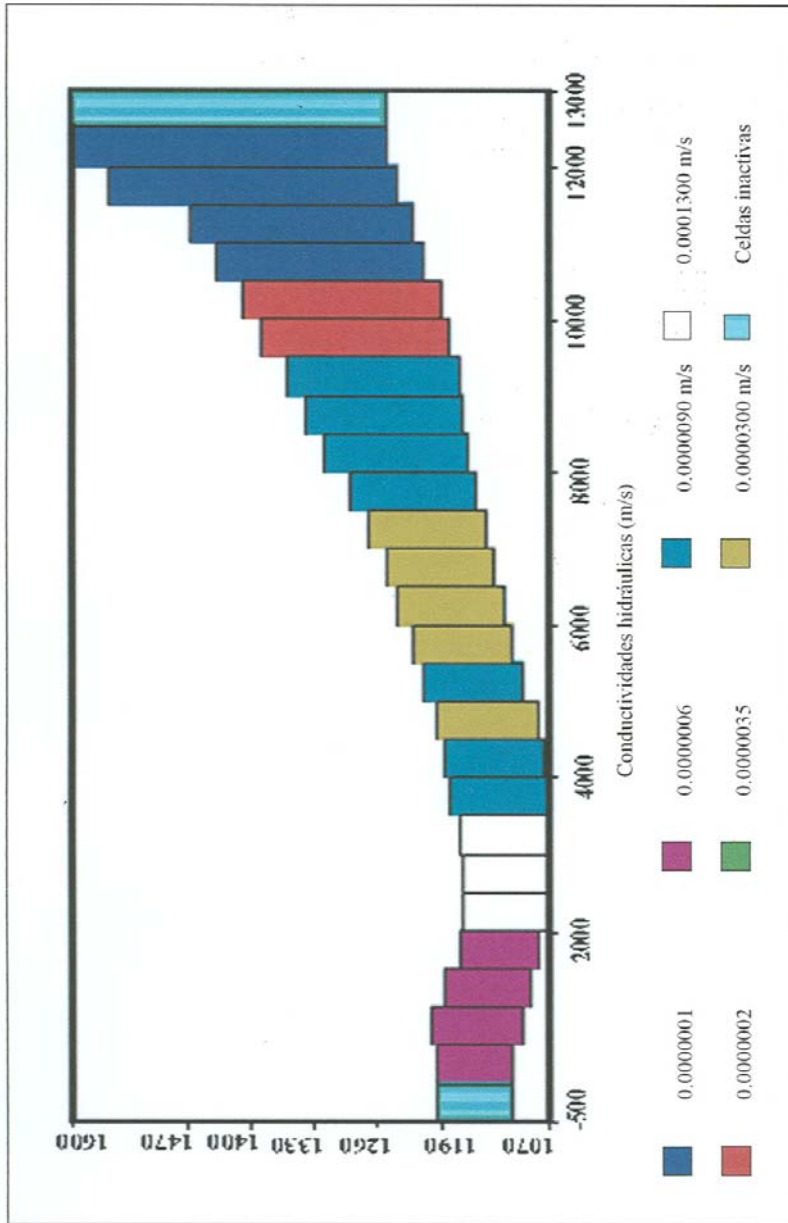


Figura 16. Geometría en sección transversal del dominio del modelo

VII.2.3.1. Carga hidráulica constante. Los valores de carga hidráulica constante se asignaron en las celdas en la frontera del modelo donde el flujo subterráneo entra o sale del dominio del modelo (entradas o salidas horizontales). El valor de carga hidráulica constante se consideró igual a la elevación topográfica en la entrada del río al dominio del modelo, localizada cerca de Miguel Hidalgo (1300 m.s.n.m.). Esta consideración es debida a la presencia de una constricción en el terreno en esta zona, provocando que el Río Santa Cruz drene al acuífero en su recorrido final por territorio mexicano. El valor de carga hidráulica constante que simula la salida horizontal del Río Santa Cruz hacia territorio de Estados Unidos se considero igual al valor de carga hidráulica inicial en esa área (1151.82 m.s.n.m.).

VII.2.3.2. Recarga. Se utilizó la condición de frontera de recarga para representar la infiltración natural vertical por precipitación como frente de montaña. En este modelo se consideró que la recarga en el valle es aproximadamente el 7.96% de la precipitación. Este porcentaje esta basado en un estudio realizado para la cuenca del Río San Pedro, por la similitud en sus condiciones hidrogeológicas y climatológicas (Consultores en Agua Subterránea S. A. Hidrogeólogos e Ingenieros, 2000). El valor de precipitación en el valle, que se uso para el calculo de recarga, fue el valor de precipitación total anual promedio de los registros en la estación San Lázaro para los años 1961-1981 (381 mm/año). Por lo tanto, el valor de recarga en el valle usado en el modelo fue de 30.33 mm/año. En las zonas montañosas la infiltración por precipitación es menor, debido a la baja permeabilidad del material, para este estudio se consideró que es el 3%.

En general, la precipitación total anual en las áreas montañosas de la cuenca del Río Santa Cruz es de 710 mm (Liverman y col., 1997). Por lo tanto, el valor de recarga para las zonas montañosas se consideró como 21.3 mm/año. La Fig. 17 muestra la distribución de recarga en el dominio del modelo.

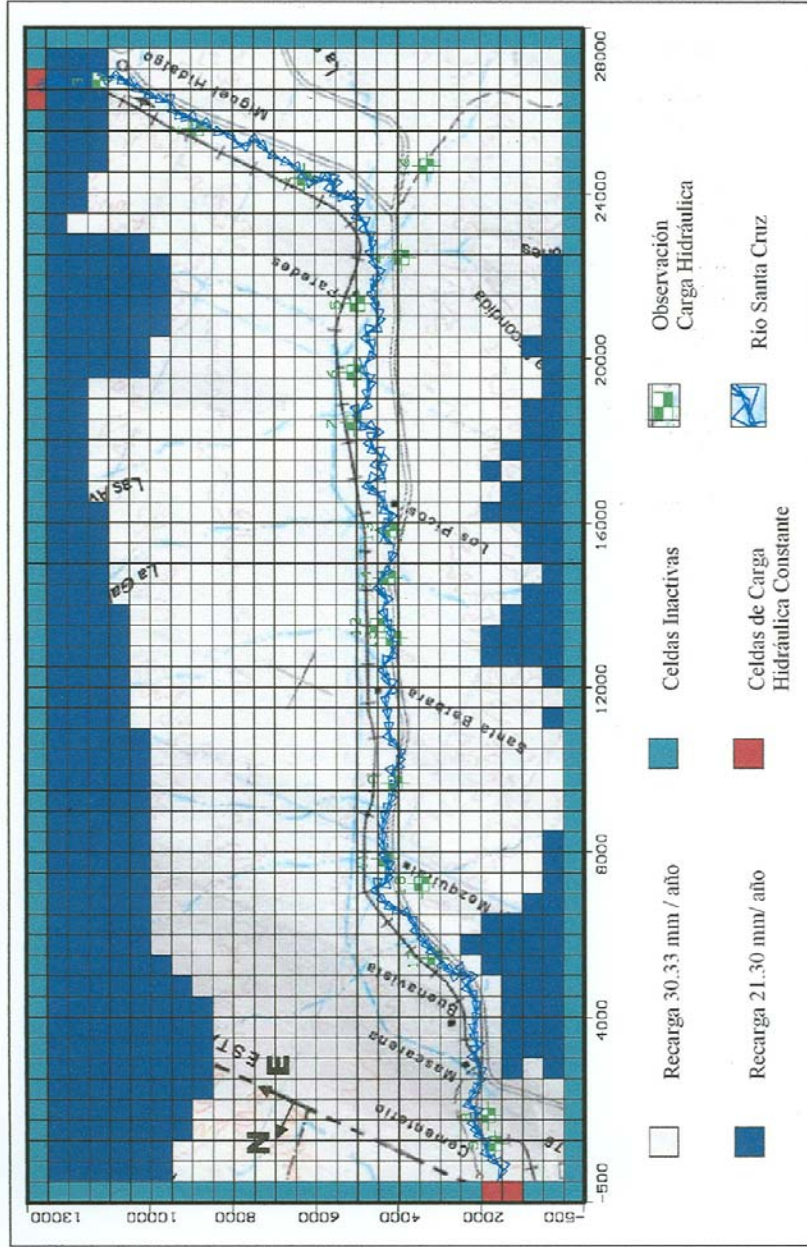


Figura 17. Distribución de recarga en el dominio del modelo

VII.2.3.3. Río (Stream). El Río Santa Cruz se simuló asignando un ancho de río promedio de 1.5m, un flujo de 10000 m³/día y un espesor del lecho del río de 13.71 m (Fig. 18), correspondiendo al valor de profundidad de material aluvión promedio mencionado en Cervera-Gómez (1995). Se trabajó con la suposición de que existe un tirante de 15 cm en promedio, a lo largo del cauce del río. Estas consideraciones se decidieron en base a las mediciones directas en el lecho del río, realizadas para el presente estudio. Se registraron el ancho del río (Tabla A-17) y el tirante del río (Tabla A-18) en cada uno de los puntos de monitoreo.

Las mediciones de flujo superficial llevadas a cabo en el periodo del 2000-2002 para el presente estudio, se muestran en la Tabla A-19. Se observa que en el punto de monitoreo localizado en San Lázaro, así como en el área recreativa Mascareñas, siempre hubo un flujo regular de agua. La condición perenne de flujo en estas estaciones de monitoreo es debida a que en este punto sucede un encajonamiento geológico, que caracteriza a la cuenca en esa área, ocasionando que el agua converja hacia el punto central dando lugar a su afloramiento en el cauce.

Por otro lado, se observa que el comportamiento del flujo superficial en los diferentes muestreos es en concordancia con el esquema de precipitación de la región (Tabla A-20). En verano se registra un período fuerte de lluvias y en invierno se presentan lluvias de menor intensidad. Por esta razón, los mayores flujos se encuentran en los meses de Septiembre y Diciembre.

VII.2.3.4. Evapotranspiración. Utilizando la fórmula de Turc, para una precipitación promedio anual de 381mm (Precipitación promedio anual para el período 1961-1981 de la Estación el Cajón) y una temperatura de 17.8 ° C (Temperatura promedio anual registrada en la Estación Nogales), resulta una evapotranspiración anual real de 374.03 mm.

$$ET \text{ real} = P / (0.9 + (P/I_T)^2)^{1/2}$$

Fórmula de Turc

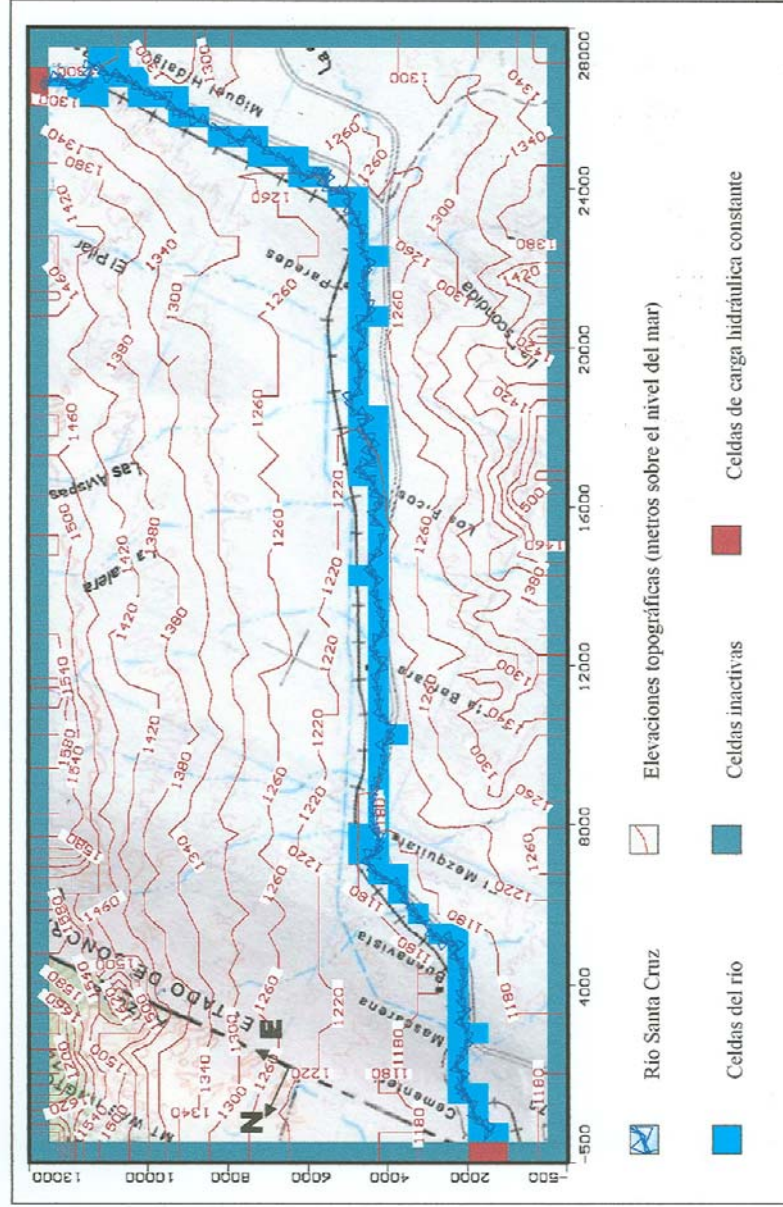


Figura 18. Simulación del río

En donde:

ET real = Evapotranspiración anual real (mm)

P = Precipitación anual (mm)

$I_T = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

T = Temperatura media del aire (°C)

Por esta razón, en el modelo se consideró el valor de evapotranspiración como 374.03 mm y la profundidad máxima de evaporación como 1.52 m.

VII.2.4. Condiciones iniciales

La asignación de valores piezometría inicial (Fig. 19) se llevó a cabo considerando 18 puntos (Tabla 13) de nivel piezométrico conocido Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. (1989).

La simulación efectuada es en estado estacionario, definida como la condición del acuífero en la que no hay cambios en el nivel de carga hidráulica con respecto al tiempo. Por lo tanto, se espera que los resultados de niveles de carga hidráulica calculados por el modelo, sean iguales a los iniciales.

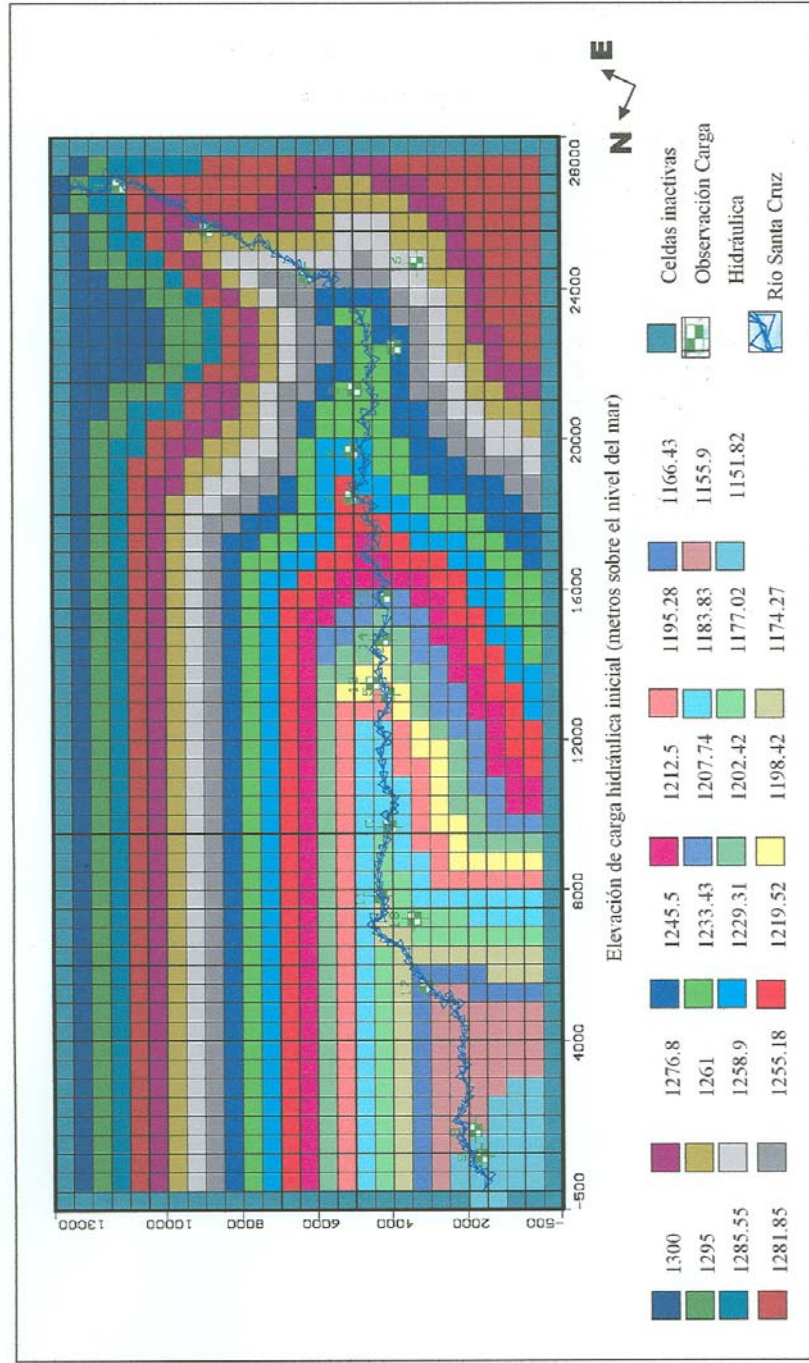


Figura 19. Carga hidráulica inicial

Tabla 13. Nivel piezométrico inicial

	Coordenadas UTM (m E)	Coordenadas UTM (m N)	Elevación Topográfica	Profundidad Piezométrica (m)	Elevación Piezométrica
			Modelo (msnm)		Modelo (msnm)
1	528939.84	3446050.28	1259	3.82	1255.18
2	531825.89	3446058.59	1280	3.20	1276.80
3	534434.12	3446009.82	1290	4.45	1285.55
4	526006.86	3446821.51	1250	4.50	1245.50
5	526490.39	3448263.44	1238	4.57	1233.43
6	525864.46	3449825.76	1234	4.69	1229.31
7	525372.23	3450892.8	1223	3.48	1219.52
8	515318.95	3464788.24	1159	3.1	1155.90
9	514911.14	3465338.71	1155	3.18	1151.82
10	520786.78	3458422.01	1188	4.17	1183.83
11	520201.51	3460215.65	1177	2.73	1174.27
12	522780.01	3455141.37	1200	1.58	1198.42
13	523470.18	3452901.73	1212	4.26	1207.74
14	523018	3453978.21	1204	1.58	1202.42
15	522300.98	3455238.85	1198	2.72	1195.28
16	526401.77	344535.18	1265	6.1	1258.90
17	518122.96	3461874.26	1170	3.57	1166.43
18	519146.23	3460352.21	1180	2.98	1177.02

VII.2.4. Monitoreo del nivel de agua subterránea

La Tabla A-21 muestra los aprovechamientos dentro del área de estudio, de acuerdo al censo realizado por la Comisión Nacional del Agua en octubre de 2002, y la Tabla A-22 muestra el registro llevado a cabo de las mediciones de campo efectuadas para el presente estudio. Es notorio que en los muestreos de temporadas más cálidas como junio, el nivel freático baja en casi todos los puntos de medición, lo cual puede deberse a la demanda de agua por parte de la población de Nogales y al hecho de que las recargas por precipitación no superan los volúmenes extraídos para las actividades tanto urbanas como agrícolas. Sin embargo, se observó una recuperación de los niveles de agua en todos los puntos de monitoreo en diciembre de 2000 y en septiembre de 2002, debido a la precipitación ocurrida en esos periodos (Tabla A-22), lo que sugiere la estrecha relación entre la ocurrencia de precipitación y los niveles freáticos.

Los puntos de monitoreo San Lázaro y El Silo muestran una mayor estabilidad en el comportamiento del nivel freático. En estos puntos la explotación es únicamente para fines ganaderos, por lo que los cambios observados pueden estar más asociados al concepto de recarga natural.

VII.2.5 Parámetros hidrogeológicos del acuífero

VII.2.5.1. Conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica media del acuífero, calculada como el cociente de la transmisividad y del espesor del mismo, resulta en el rango de 0.000086 a 0.00032 m/seg, que corresponde a clásticos de grano medio a fino (Seismocontrol, 1995). La Tabla A-23 muestra los valores de conductividad hidráulica y transmisividad estimados en estudios previos a través de pruebas de bombeo interpretadas por el método de Jacob. La Fig. 20 presenta los valores y la asignación de conductividad hidráulica en el modelo, la cual tiene concordancia con el estudio realizado por Técnicas Geológicas y Mineras (1989), y con la carta geológica 1:250000 Nogales H12-2 editada por INEGI (Fig. 9, antes mostrada).

VII.2.5.2 Coeficiente de almacenamiento. Un estimado del coeficiente de almacenamiento y del almacenamiento específico, que aunque no tienen efecto en la simulación de estado estacionario, resultan de gran importancia para la simulación del estado transiente. En la parte americana de la cuenca del Río Santa Cruz se llevaron a cabo estudios de micro-gravedad en porciones del Área de Manejo Activo en Santa Cruz para proporcionar estimaciones del cambio de almacenamiento volumétrico del agua subterránea, rendimiento específico y profundidad al lecho de roca (Nelson y Erwin, 2001), reportándose valores de almacenamiento específico para el aluvión joven, aluvión joven a 200 ft del aluvion viejo, aluvion joven en contacto con aluvion viejo, y aluvion joven a 200 ft del lecho de roca de 0.144, 0.121, 0.086 y 0.120, respectivamente.

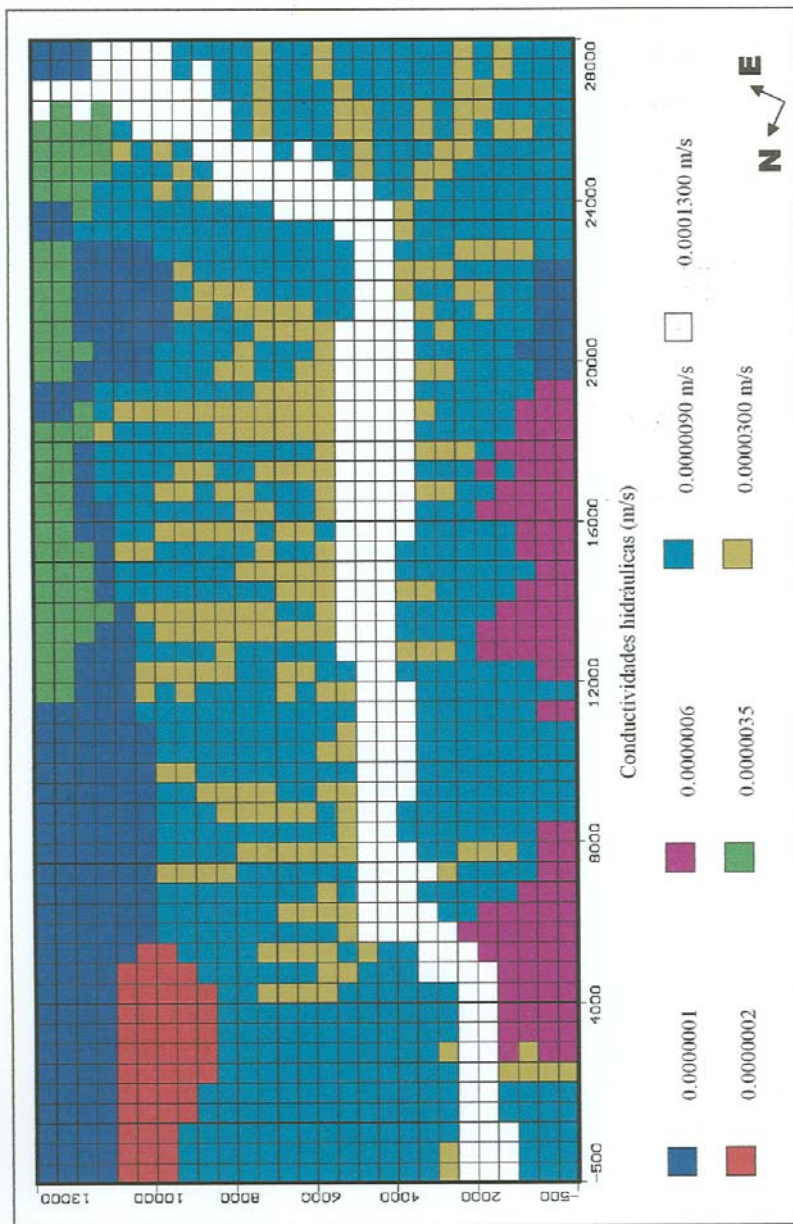


Figura 20. Conductividad hidráulica en el modelo

VII.3. Análisis de Sensibilidad

Para lograr un buen ajuste del modelo propuesto se requiere realizar un análisis de sensibilidad para establecer los parámetros que originan las mayores variaciones del porcentaje de error. Es decir, cuáles son los parámetros que producen un cambio más significativo en el resultado de carga hidráulica al variar entre un rango posible de valores. De esta manera, es posible determinar los factores que deben ajustarse con mayor sensibilidad. Por esta razón, el análisis de sensibilidad es el inicio del proceso de calibración. Para este estudio, el análisis de sensibilidad se realizó a través del método de prueba y error. Se observó que el modelo es moderadamente sensible a los cambios en la condición de frontera de carga hidráulica constante y a la conductividad hidráulica. Además es muy sensible a cambios en la profundidad máxima de evapotranspiración, sobre todo en los términos de flujo en el balance. En general, el modelo es más sensible en los términos del balance que en los niveles de carga hidráulica. Un aumento en la conductividad en dirección Z en el lecho del río aumentará el flujo de infiltración por el río.

VII.4. Correlación de carga hidráulica observada y calculada

La Fig. 21 muestra los resultados del análisis de correlación de las mediciones de nivel de carga hidráulica observadas en campo con los calculados por Visual MODFLOW. En la simulación de estado estacionario se obtuvo coeficiente de correlación de 0.998579, con un error estándar de la estimación de 0.5299065 m y una desviación estándar normalizada del 2.775585%, con un intervalo de confianza del 95%.

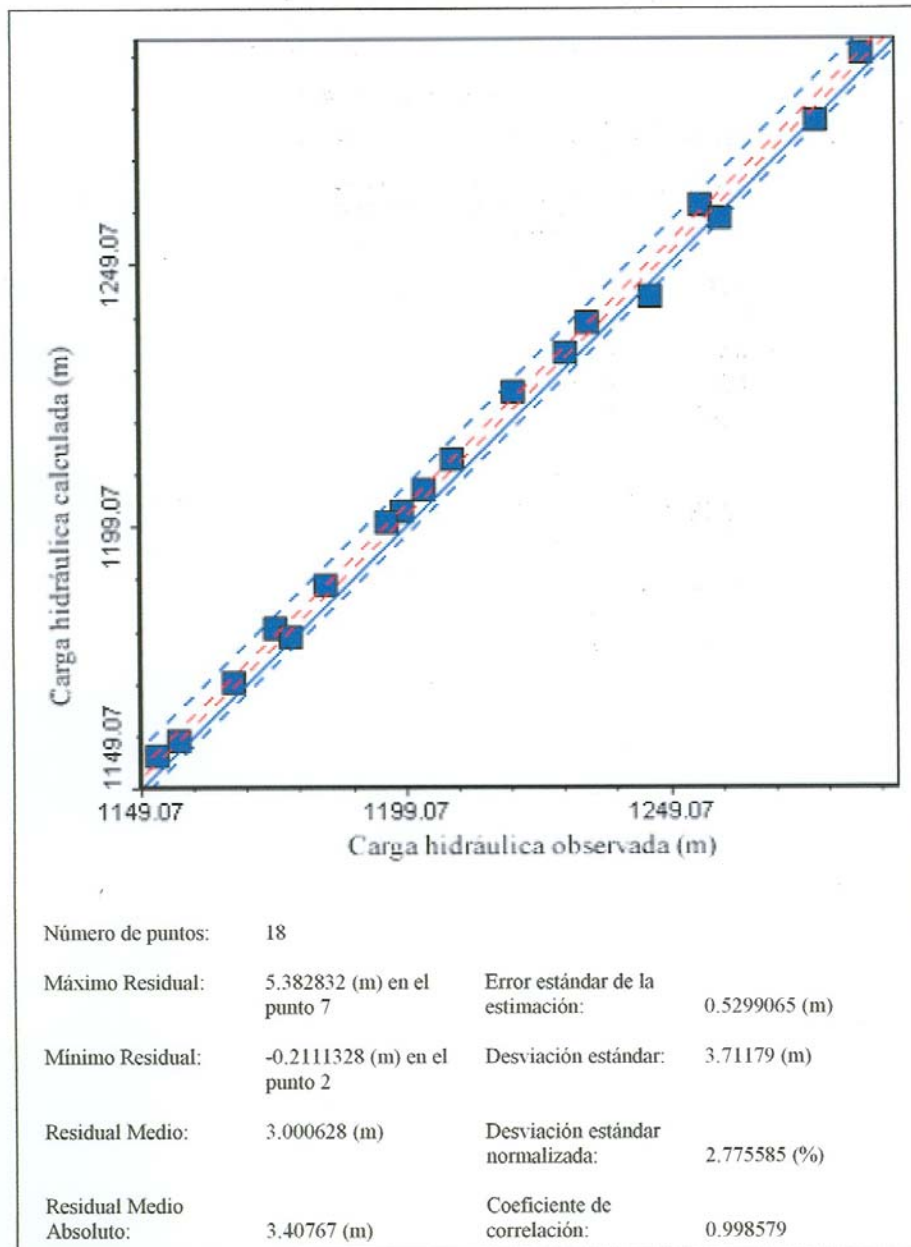


Figura 21. Correlación de carga hidráulica observada contra calculada

VII.5. Dirección Preferencial del Flujo Subterráneo

La Fig. 22 es una representación de las curvas de nivel freático, resultado de la simulación. La dirección de flujo de agua subterránea está orientada de manera perpendicular de una equipotencial alta hacia una más baja (Fig. 23). Es decir, el flujo se dirige hacia el lecho del río, indicando que el acuífero está alimentando al río. Además de la existencia de encajonamientos geológicos naturales de la región, esto explica la presencia continua de agua en ciertos puntos, aún en ausencia de lluvias. También se detecta un flujo preferente hacia la frontera con Estados Unidos y en concordancia con la topografía. Como resultado de la simulación, se observa la presencia de niveles de agua por encima del nivel topográfico, que está en concordancia con los puntos de monitoreo en los que se observó la existencia perenne de agua (Fig. 24).

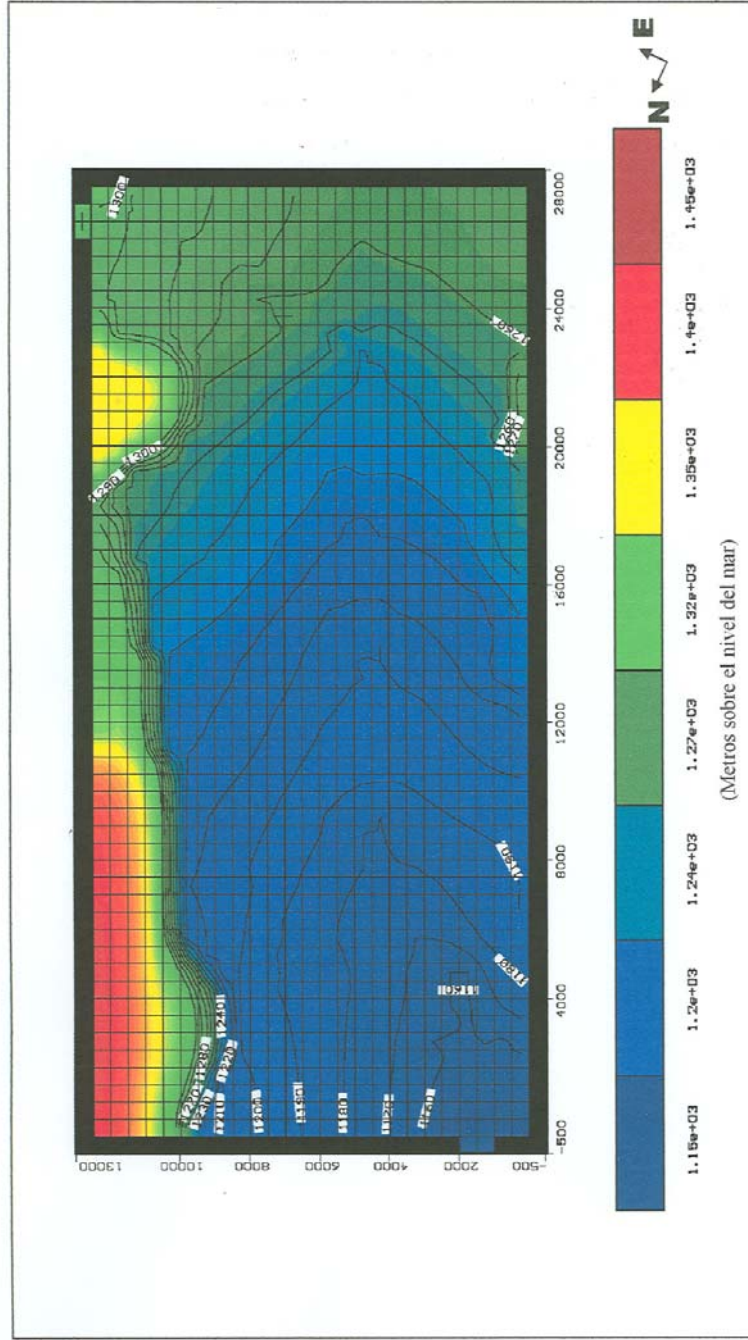


Figura 22. Equipotenciales

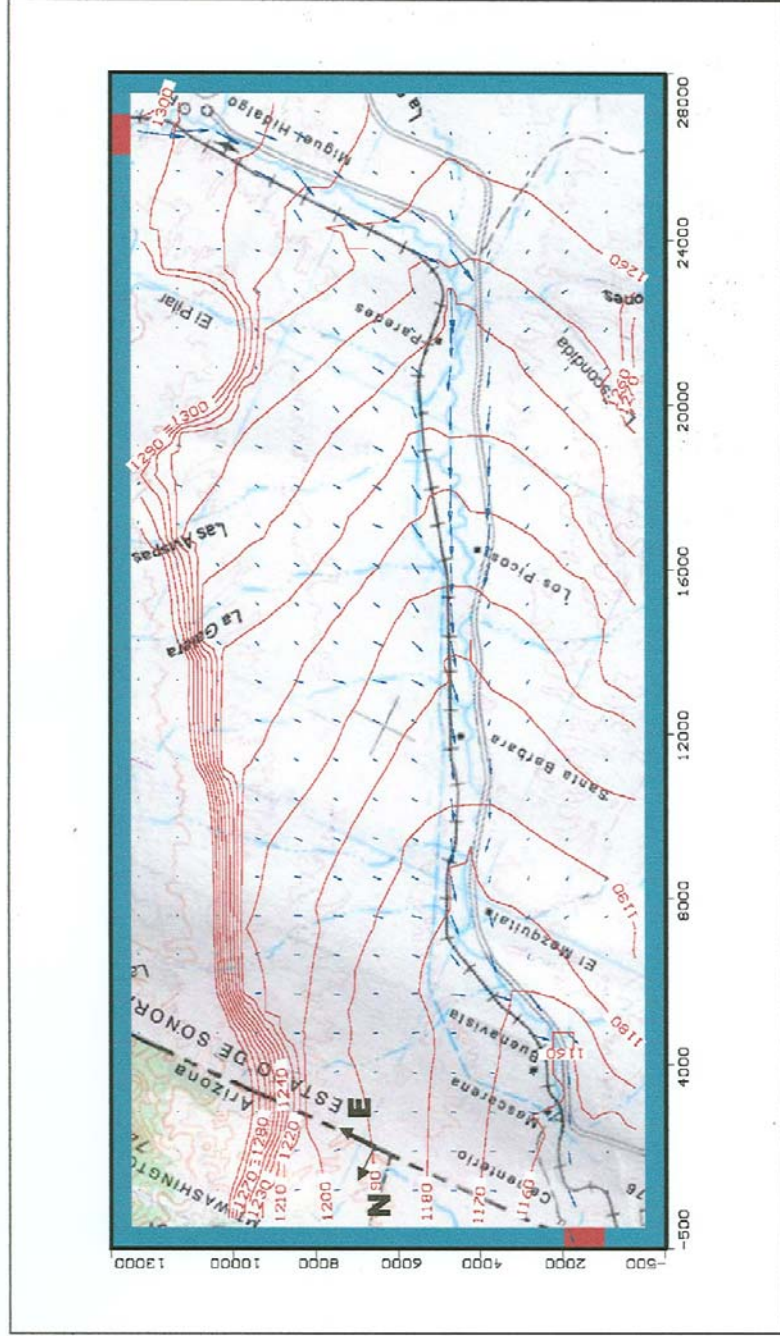


Figura 23. Dirección de flujo

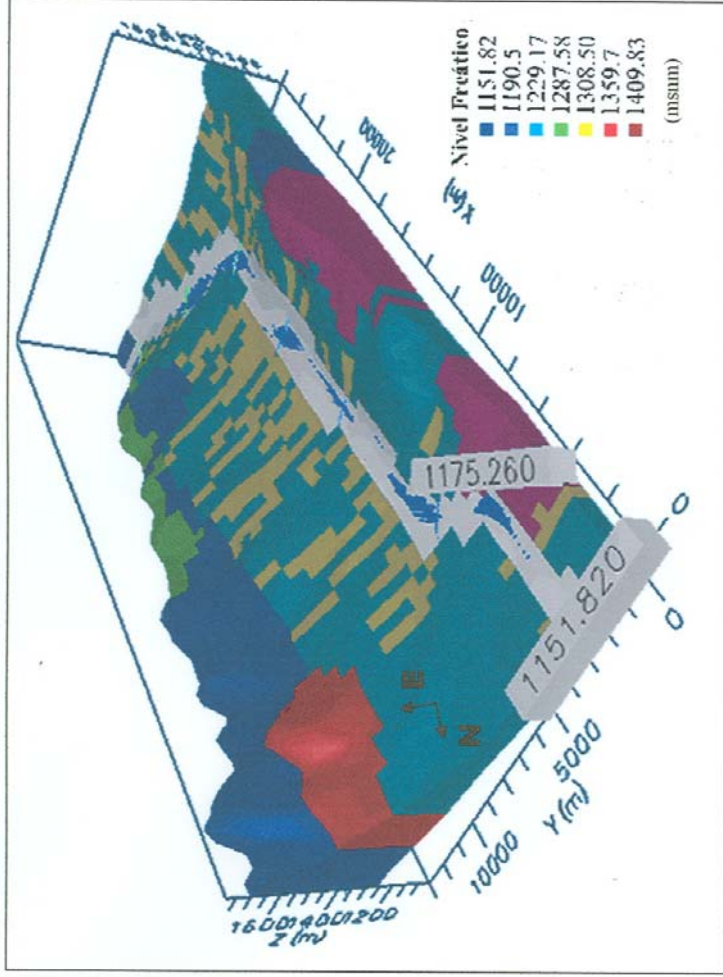


Figura 24. Nivel freático

VII.6. Balance Hídrico

Las entradas al sistema de flujo provienen principalmente de las siguientes fuentes:

1. Aportaciones laterales subterráneas proveniente de la localidad de Santa Cruz, valor que se considera es semejante al flujo subterráneo proveniente del Valle San Rafael (USA).
2. Recarga vertical por precipitación.
3. Aportaciones verticales superficiales provenientes del cauce del Río Santa Cruz. Se consideraron los volúmenes aforados en la estación Lochiel (antes de llegar a territorio mexicano).

Las salidas al sistema de flujo incluyen:

1. Salidas laterales subterráneas en la región de Mascareñas.
2. Evapotranspiración
3. Drenado del acuífero hacia el Río Santa Cruz en su tramo final en territorio mexicano.

El balance hídrico volumétrico también sirve para verificar la aceptabilidad de la solución del modelo. Para que una solución del modelo en estado estacionario sea aceptable, la diferencia entre las entradas totales y las salidas totales deben de ser muy pequeñas. La solución de la simulación de este estudio tuvo un por ciento de discrepancia entre las entradas totales y las salidas totales de menos de 0.01 %, por lo que se considera aceptable.

Para verificar la aceptabilidad de la solución del modelo se compararon los valores de cada uno de los términos del balance hídrico obtenidos por el modelo, con valores estimados en estudios previos. Los resultados de esta comparación se encuentran resumidos en la Tabla 14.

Tabla 14. Balance hídrico

Entradas de Flujo	Modelo (m ³ /d)	Modelo (Mm ³ /a)	Estimado (Mm ³ /a)	Referencia
Aportaciones laterales subterráneas	3160.1941	1.15	1.07	Técnicas Geológicas y Mineras, S.A (1989)
Recarga vertical por precipitación	26560.3105	9.69	20.82	Técnicas Geológicas y Mineras, S.A (1989) (11.42 Mm ³ /a para la zona Miguel Hidalgo-Santa Bárbara + 9.40 Mm ³ /a para la zona Buenavista- Mascareñas)
			10.94	Cervera y col (1995) (potencial de almacenamiento para la cuenca mexicana)
Aportaciones verticales superficiales provenientes del cauce del Río Santa Cruz	11903.0908	4.34	3.74	Cervera y col. (1995) (Flujo Base Promedio)
Salidas de Flujo				
Salidas laterales subterráneas (Mascareñas)	4224.7964	1.54	1.66	Técnicas Geológicas y Mineras, S.A (1989)
Evapotranspiración	25478.7676	9.30	Evapotranspiración/ Precipitación=93.13%	Cervera y col. (1995)
Drenado del acuífero hacia el Río Santa Cruz	11920.8135	4.35	5.04	Cervera y col (1995)
			2.71	Técnicas Geológicas y Mineras, S.A (1989)