



III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEH 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

IMPORTANCIA DE LAS REDES DE MONITOREO ÓPTIMAS EN LA GESTIÓN DE ACUÍFEROS

Pablo Gallardo Almanza^{1*}; Leticia Becerra Soriano²

¹Coordinación de Hidrología. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

gallardo@tlaloc.imta.mx - telf.: 777 329 3600 ext. 174 (*Autor de correspondencia)

²Estudiante de doctorado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México.

Resumen

El monitoreo y la detección temprana de flujos contaminantes incipientes en zonas de recarga de aguas subterráneas, en la zona no saturada y en el nivel freático del agua subterránea antes de que se diluyan en el acuífero, da tiempo suficiente para la aplicación de medidas de protección y de gestión antes de que pueda ocurrir contaminación masiva del agua subterránea. Esto enfatiza la importancia de los programas de monitoreo de sitios específicos. Al diseñar una red de monitoreo óptima es importante considerar el objetivo de la red, la cantidad de pozos con información piezométrica y, la frecuencia de las mediciones. El objetivo principal de una red de monitoreo de aguas subterráneas es medir las variaciones del nivel piezométrico del acuífero para determinar los gradientes y direcciones del flujo subterráneo con un mínimo de pozos de observación y así representar la piezometría de un acuífero con un costo mínimo de inversión. Para este análisis se tomó en cuenta una red piloto inicial existente de 84 aprovechamientos distribuidos en toda la zona del acuífero, y aplicando la metodología planteada, que es una combinación de métodos geoestadísticos, se llegó al diseño de la red de monitoreo piezométrica óptima, integrada por tan solo 14 pozos los cuales permitieron obtener buenas estimaciones de los niveles de la carga hidráulica.

Palabras clave adicionales: optimización, geoestadística, covarianza, nivel piezométrico



Introducción

Las redes de monitoreo siempre han estado presentes en los acuíferos, porque son indispensables para conocer el comportamiento piezométrico. Pero el diseño de redes de monitoreo óptimas, conlleva el uso de técnicas y enfoques geoestadísticos que nos ayudan a encontrar aquellos sitios óptimos que proporcionan valiosa información y mínima varianza.

La metodología que se mostrará para el diseño de la red de monitoreo óptima utiliza una combinación de métodos geoestadísticos, mediante los cuales se obtiene la matriz de covarianza de los datos de carga hidráulica (mediciones del nivel estático). Para ello se utiliza un filtro de Kalman que selecciona los puntos de muestreo con base en la reducción de la varianza, y en un método de optimización heurístico.

El monitoreo de aguas subterráneas puede ser entendido como un programa continuo, metodológico y técnico de observaciones estandarizadas, mediciones piezométricas y análisis fisicoquímicos y biológicos de las variables seleccionadas del agua subterránea. Una de las actividades de las redes de monitoreo es coleccionar, procesar y evaluar la calidad y cantidad de los datos de agua subterránea como línea base para evaluar el estado actual y tendencias de predicción en las aguas subterráneas en el tiempo y en el espacio debido a procesos naturales e impactos humanos; otra actividad importante es proporcionar datos e información para la planeación, políticas y gestión de la protección y conservación de los recursos de aguas subterráneas; para hacer frente a los problemas de calidad y cantidad de las aguas subterráneas en relación con el desarrollo económico y social, necesidades ecológicas, así como para identificar oportunamente y prevenir impactos de desastres en las fuentes de agua subterránea.

Los objetivos de una red de monitoreo piezométrica y de calidad del agua son muy específicos, desde mejorar el conocimiento del modelo conceptual del sistema acuífero; conocer la evolución de los niveles piezométricos, determinar magnitud y dirección de los gradientes hidráulicos; conocer la calidad del agua subterránea; detectar posibles impactos poniendo de manifiesto anomalías piezométricas y/o eventos de contaminación en el entorno de las obras civiles proyectadas, en especial en las proximidades de zonas de interés natural y núcleos urbanos; llevar un seguimiento de impactos adversos como la sobreexplotación de acuíferos; y generar información representativa y confiable de la calidad y cantidad del agua, para una buena gestión del recurso hídrico.

El diseño de redes de monitoreo de agua consiste en la selección de sitios de monitoreo y la frecuencia del monitoreo. En el caso específico del agua subterránea. Herrera (2009) indica tres métodos para diseñar redes (figura 1):

- a) Métodos hidrogeológicos
- b) Métodos geoestadísticos
- c) Modelos estocásticos de flujo y transporte



DISEÑO DE REDES DE MONITOREO



Figura 1. Métodos para el diseño de redes de monitoreo.

Las redes de monitoreo pueden funcionar como sistemas de alerta y prevención contra la sobreexplotación y contaminación de cuerpos de agua. Existen redes de monitoreo a corto, mediano y largo plazo. Por ejemplo, el monitoreo de niveles de agua subterránea por períodos largos de tiempo, permite estimar la disponibilidad del agua subterránea, así como conocer la evolución de los niveles.

Materiales y métodos

Diseño de la red de monitoreo

Los métodos de optimización para el diseño de redes de monitoreo son utilizados cuando la búsqueda manual de los mejores sitios es muy compleja, cuando el censo de aprovechamientos es muy grande y cuando los costos de medición de las variables son muy altos. Es necesario utilizar una metodología que consiste en tres sencillos pasos, figura 2.

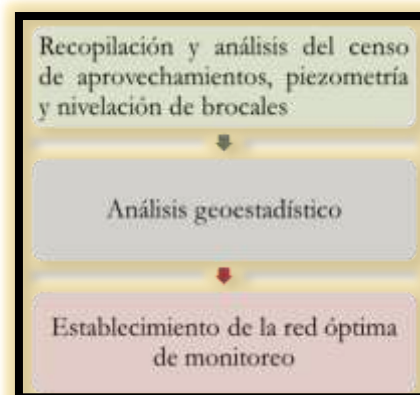


Figura 2. Secuencia metodológica.



A continuación, se desarrolla la metodología con la aplicación de diseño en un acuífero del norte del país.

Análisis de la información

La recopilación y análisis de estudios técnicos realizados permitió obtener información del censo de aprovechamientos del 2002 que fue de 986 y la información histórica de las mediciones piezométricas en 89 pozos (MORO, 2004). Para este acuífero se contó con muy poca información disponible y dado que no se tenía el censo actualizado se optó por utilizar la piezometría del año 2004 (Tabla 1), para el análisis geoestadístico, tomando estos datos como la red piloto que sirvió de base para el diseño de la red óptima.

Tabla 1. Registro histórico de la piezometría.

Año de registro	Número de pozos medidos
1982	50
1988	46
1999	52
2002	89
2004	84

Análisis geoestadístico

El análisis geoestadístico consiste de tres pasos (figura 3) que son: análisis exploratorio de los datos, análisis estructural y las predicciones (kriging o simulaciones).

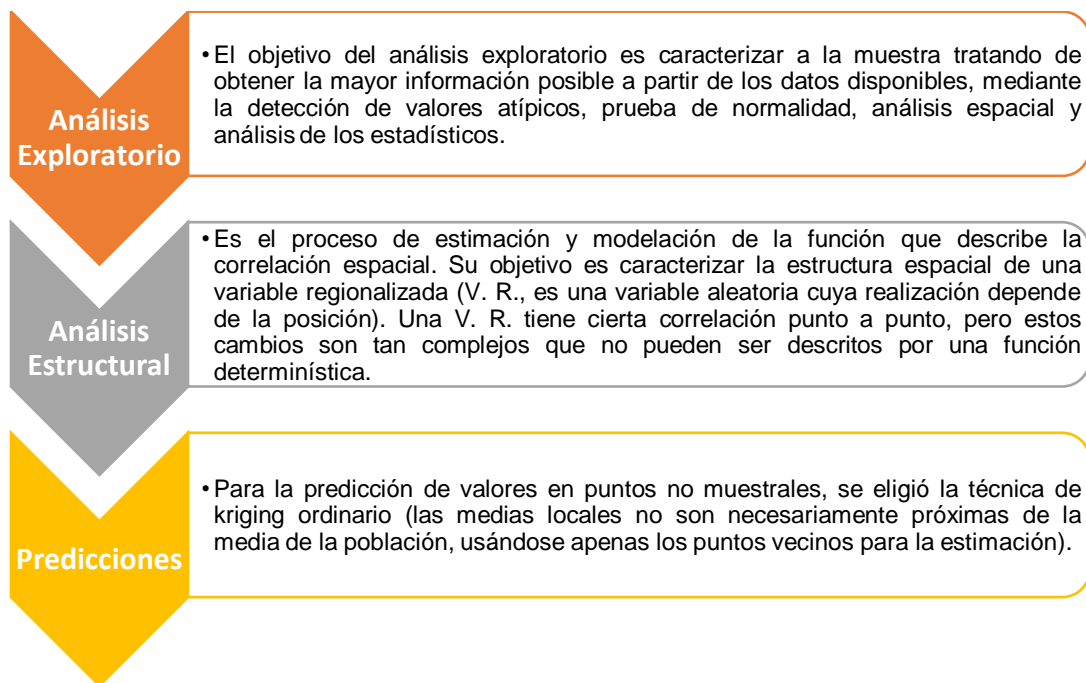


Figura 3. Metodología del análisis geoestadístico.



Además, se realizó la validación cruzada que permite establecer si el modelo del semivariograma obtenido es representativo de la variabilidad espacial de los datos. El método consiste en sacar un elemento de la muestra y estimar el valor en ese punto con kriging ordinario empleando el modelo de semivariograma obtenido.

Análisis y discusión de resultados

Establecimiento de la red de monitoreo

La red piloto inicial quedó integrada por 84 aprovechamientos distribuidos en la zona de estudio. Su distribución espacial se puede observar en la figura 4.

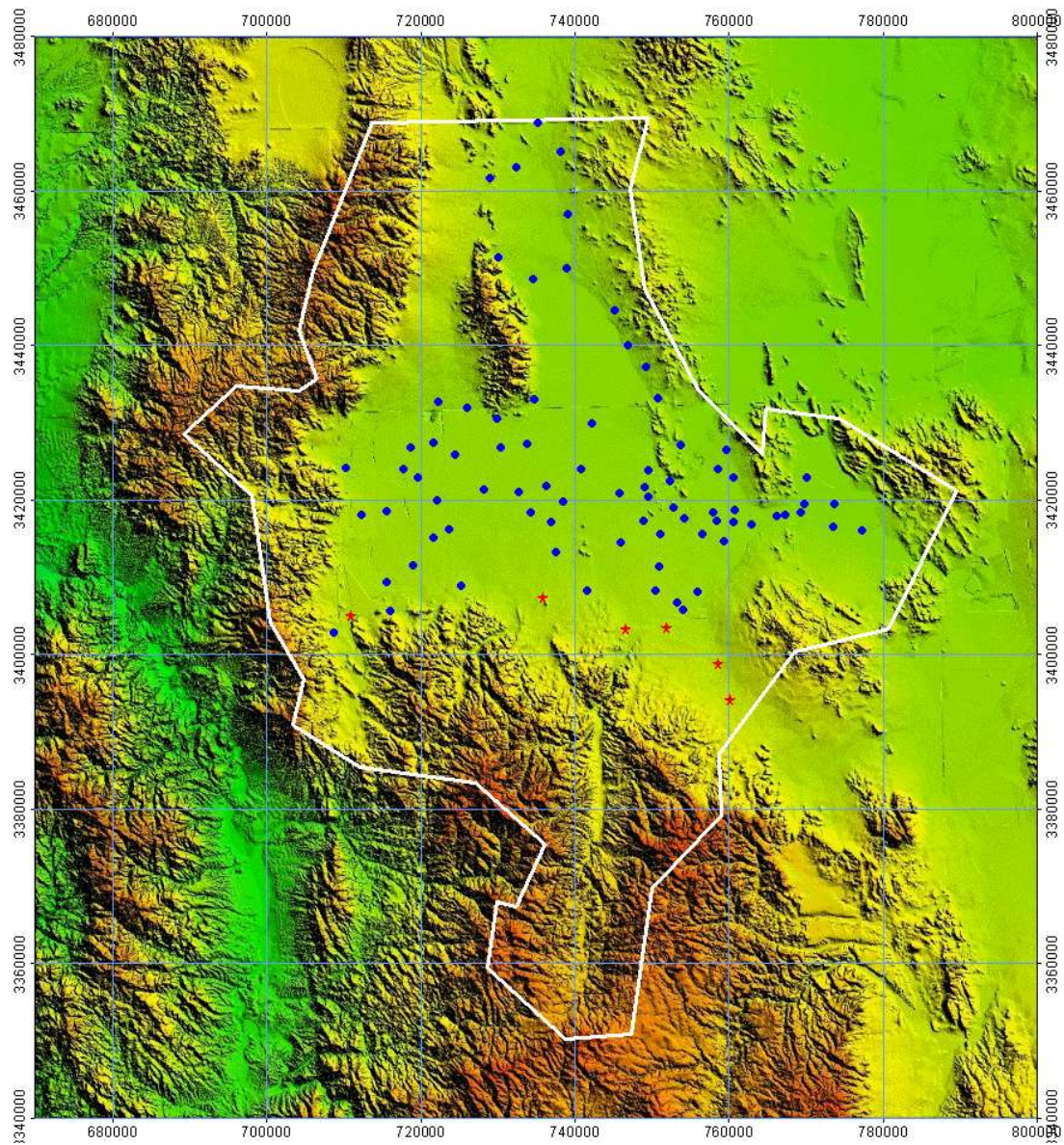


Figura 4. Distribución espacial de los aprovechamientos.



Se detectaron 6 valores atípicos distribucionales (símbolo en color rojo, localizados en la parte sur del acuífero), quedando solamente 78 sitios de la red inicial, a estos datos se les aplicó el análisis estructural. El modelo que mejor se ajustó a los datos fue un modelo esférico con pepita o nugget (figura 5). En la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros del modelo obtenido y del criterio de información de Akaike, este último es una medida de la bondad de ajuste del modelo y la complejidad del modelo.

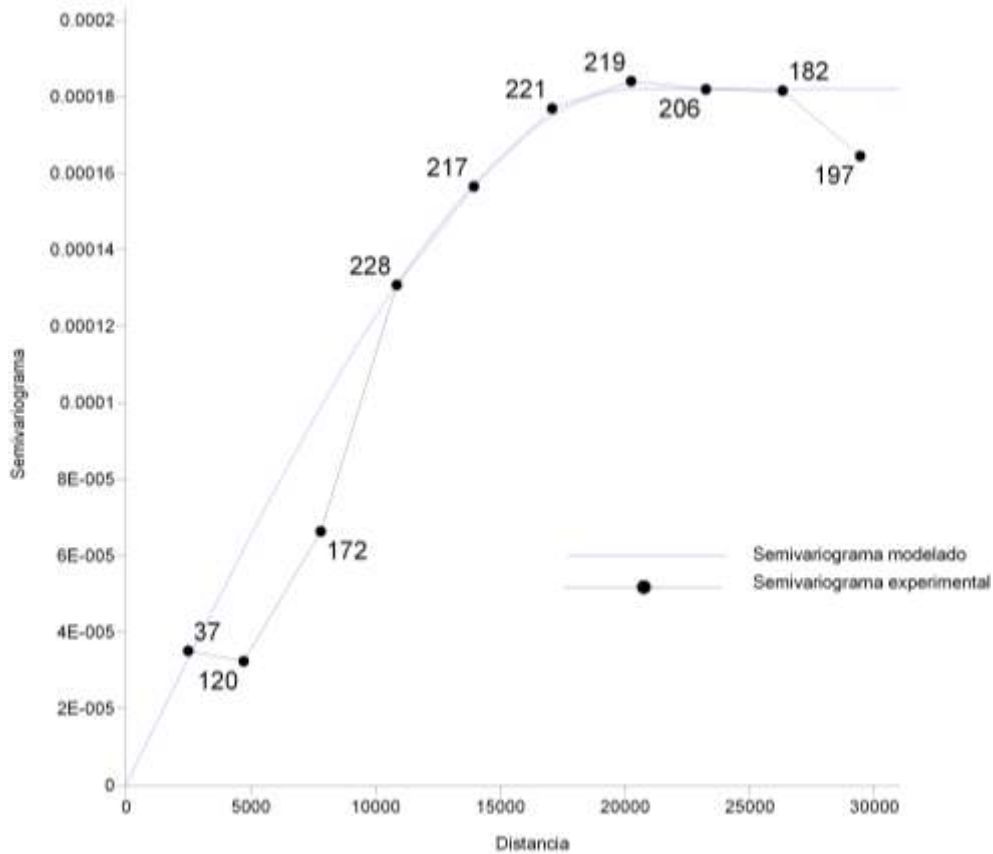


Figura 5. Semivariograma con ajuste de modelo esférico.

Tabla 2. Modelación de la función correlación espacial de la carga hidráulica.

Modelo	Pepita	Meseta	Alcance	Criterio de Akaike
Esférico	0.0	0.000182	20 500	-1 629.17

En la figura 6, se muestra la gráfica de la reducción relativa de la varianza total. En esta gráfica se determinó el punto en el que se presenta el valor mínimo de la función como el número posible de pozos a incluir en la red de monitoreo. Como se aprecia en la figura 6 y en la tabla 3, dos alternativas posibles serían: una de 14 y otra de 25 pozos que conformen la red de monitoreo.

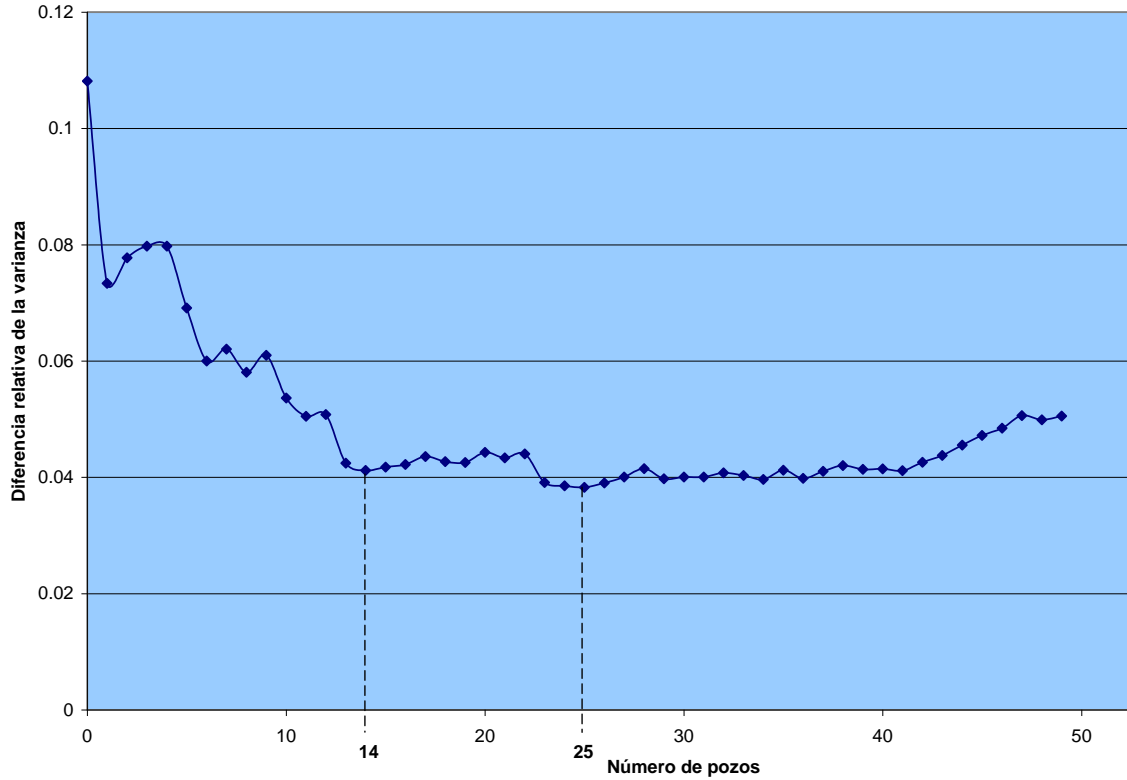


Figura 6. Varianza relativa de los pozos.

Tabla 3. Estadísticos de las alternativas de la red de monitoreo óptima.

Kriging Ordinario	Carga hidráulica con 78 pozos	Carga hidráulica con 14 pozos	Carga hidráulica con 25 pozos
Valor estimado mínimo	1 342.13	1 350.10	1 350.02
Valor estimado máximo	1 420.63	1 416.01	1 415.82
Varianza	125.80	79.06	84.41
Coefficiente de variación	0.008	0.006	0.007
Coefficiente de asimetría	0.69	0.69	0.75
Desviación estándar	11.21	8.89	9.19

Al iniciar el análisis exploratorio se tenían 84 sitios de medición (IMTA, 2007), mediante la metodología y técnicas geoestadísticas aplicadas se logra el diseño de una red de monitoreo óptima de 14 sitios que proporcionan suficiente información para realizar una buena estimación de las mediciones del nivel estático del acuífero. En la figura 7 se muestra la distribución uniforme de la red de monitoreo óptima y en la tabla 4, se presenta la relación de pozos verificados en campo.

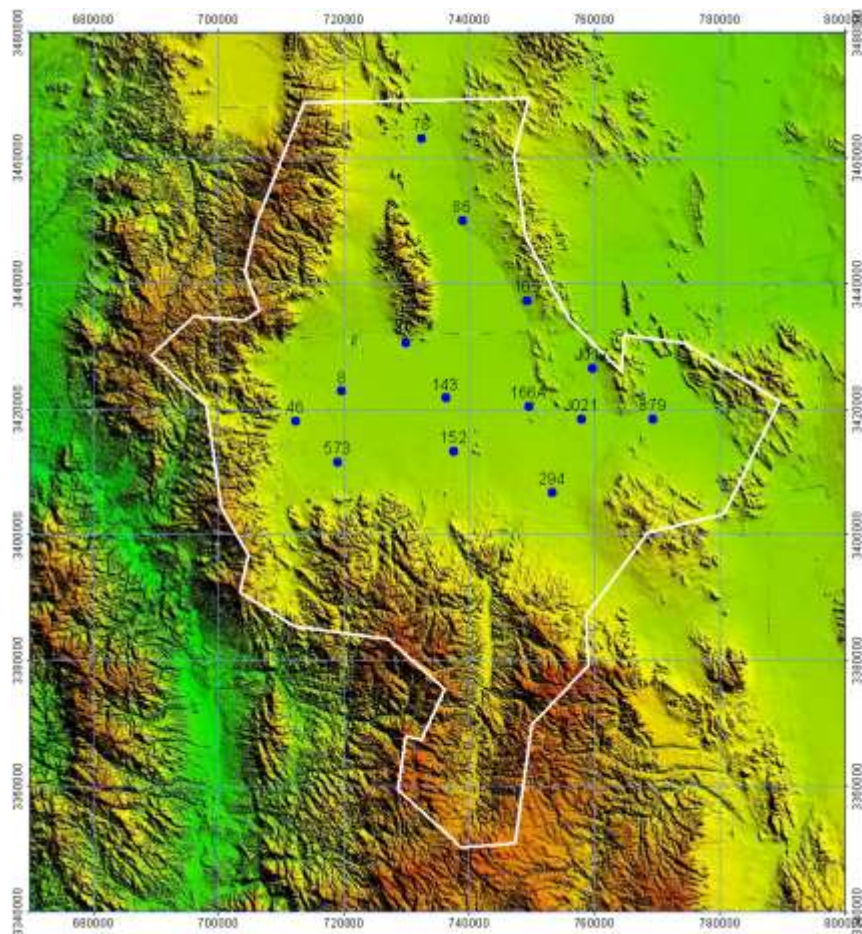


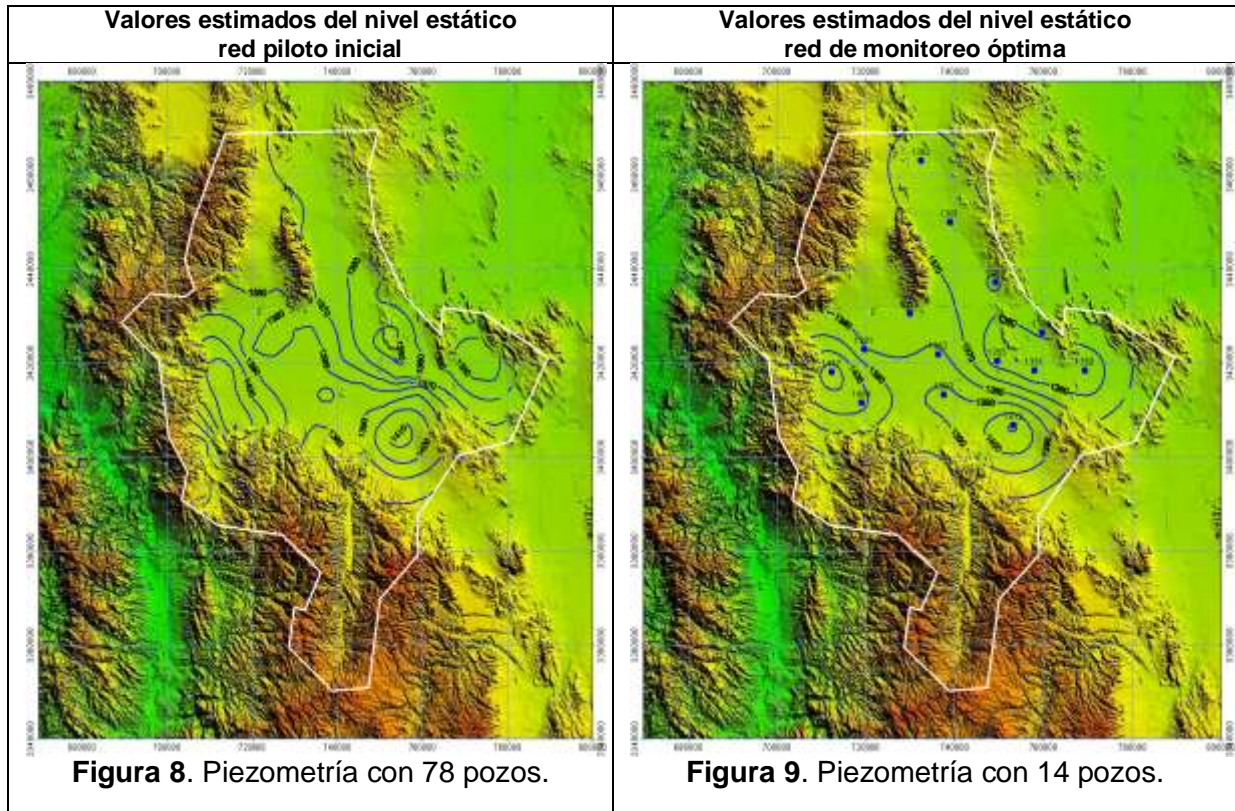
Figura 7. Red de monitoreo óptima.

Tabla 4. Verificación de pozos que conforman la red de monitoreo óptima.

Núm. en red	Núm. en campo	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Brocal (m)	PNE (m)	ENE (m)	Fecha	Observaciones
1	379	769383	3418207	1365	14.83	1350.17	22/11/2006	Pozo La Búfala
2	487	759615	3426449	1378	16.25	1361.75	22/11/2006	Sector Chapana 1
3	105	749211	3437217	1401	42.80	1358.20	22/11/2006	Después del rancho de José Luis Bustillos Delgado
4	86	738849	3449933	1380	20.17	1359.83	22/11/2006	Cerca del Km. 45 carretera Janos Agua Prieta
5	75	728940	3461702	1451	89.49	1361.51	22/11/2006	Papalote junto al rancho El Berrendo
6	332	757597	3418353	1392	43.12	1348.88	23/11/2006	
7	294	753306	3406519	1436	23.91	1412.09	23/11/2006	Sector de los Cuevas
8	152	737585	3413085	1428	35.23	1392.77	23/11/2006	
9	573	718777	3410692	1434	28.40	1405.60	23/11/2006	Rancho Agua Blanca
10	46	712390	3417935	1450	38.25	1411.75	23/11/2006	Hilario Gabilondo Terrazas
11	8	719627	3422856	1409	62.91	1346.09	23/11/2006	Nivel Dinámico
12	166A	749315	3420459	1393	51.97	1341.03	24/11/2006	
13	143A	735280	3421144	1401	23.21	1377.79	24/11/2006	Pozo 2
14	17	729816	3430495	1398	34.54	1363.46	24/11/2006	Rancho Sierra de Enmedio



En la figura 8 y la figura 9 se realiza el comparativo de los contornos de la piezometría generados mediante los datos de la red piloto y los contornos que resultan utilizando la red de monitoreo óptima con tan solo 14 pozos. Se concluye que la red de monitoreo óptima representa en muy buena medida el comportamiento de los niveles piezométricos en el acuífero, la implementación de dicha red nos genera reducción en los costos de monitoreo, en las campañas de medición se pueden reducir los tiempos en la obtención de datos en una red pequeña.



Conclusiones

Con base en la información disponible de geología, piezometría y topografía, fue posible definir la zona de relleno geológico que forma el acuífero, y su red piloto de monitoreo. La red de monitoreo óptima que se diseñó quedó integrada por 14 pozos, los cuales quedaron bien distribuidos en todo el valle del acuífero. Se optimizó a tan solo 14 pozos dado que financieramente es más económica realizar la medición piezométrica, reduciendo de manera importante los gastos hasta en un 85% en las campañas de medición.

Realizar mediciones piezométricas al menos dos veces al año sobre la red de monitoreo recomendada, lo cual podría efectuarse al final de la temporada de secas y de lluvias.

Conservar una red óptima de monitoreo que sea plenamente representativa desde el punto de vista estadístico para la evaluación de la calidad y cantidad del agua



subterránea. Por lo cual habrá que realizar rediseños de la red espacialmente adecuándola a las necesidades del objetivo de la red, la cual evoluciona junto con factores socioeconómicos, como lo son el incremento poblacional y el cambio de uso de suelo.

Referencias bibliográficas

Herrera Zamarrón, Graciela 2009. Modelación matemática y computacional aplicada al diseño óptimo de redes de monitoreo del agua subterránea. Instituto de geofísica, UNAM. México.

IMTA 2007. Establecer la red de monitoreo piezométrico y delimitar el acuífero de Janos, Chihuahua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México. 88p.

MORO INGENIERÍA S. C. 2004. Actualización piezométrica de los acuíferos denominados: Janos, Buenaventura y Tabalaopa, Chihuahua. Para la Gerencia Regional Río Bravo. México. 40p.