

## QA\_15 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL ÍNDICE CCME-WQI, EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA

**Salcedo S.E. R.<sup>1</sup>, Garrido H. S.<sup>2</sup>, Martínez M. M.<sup>2</sup>, Estheller A. M.V.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Posgrado en Ingeniería Ambiental. Paseo Cuauhnahuac 8532, Progreso, 62550 Jiutepec, Mor. e-mail: edithsalcedos@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) Paseo Cuauhnahuac 8532, Progreso, 62550 Jiutepec, Mor.

<sup>3</sup>Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Facultad de Ingeniería, Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria, C.P. 50110, Toluca, Estado de México

### Introducción

El agua subterránea es un recurso muy extendido, pero oculto e inaccesible, y en contraste con el agua superficial, los cambios en su cantidad y calidad frecuentemente son muy lentos así como difíciles de revertir (Foster *et al.*, 2006). Por lo tanto, la evaluación de la calidad del agua se convierte en una actividad imprescindible, a la vez que vigilar periódicamente dicha calidad, ya que con base en esta información sobre la calidad del agua se pueden definir estrategias para la protección y remediación de acuíferos. Instrumentos útiles para este proceso de evaluación son los llamados índices; un índice es una de las herramientas más eficaces para transmitir información sobre la calidad del agua a las comunidades de usuarios, a los responsables del manejo y a las autoridades encargadas de la toma de decisiones, así como al público en general.

Para evaluar de manera integral dicha calidad se utilizó un índice desarrollado por Canadian Council of Ministers of the Environment-Water Quality Index (CCME-WQI); que proporciona un marco matemático para la evaluación de la calidad del agua en combinación con las condiciones marcadas como criterios ó límites de calidad. Este índice es flexible con respecto al tipo y número de variables a utilizar en la evaluación, ya que permite seleccionar las variables de interés dependiendo de las características y de los objetivos de aprovechamiento, conservación y cumplimiento con la normatividad (CCME, 2001).

Durante las últimas décadas, en los estados de Puebla y Tlaxcala ha habido un enorme aumento en la demanda de agua dulce debido al rápido crecimiento de la población y al ritmo acelerado de la industrialización (Geotecnología 1997; Flores-Márquez *et al.*, 2006; Garfias *et al.*, 2010). Por otro lado, esta rápida urbanización en la zona, ha afectado la disponibilidad y la calidad de las aguas subterráneas que es la única fuente de abastecimiento de la región lo que ha ocasionado la intensa explotación del sistema (CONAGUA, 2010). Hay que tener presente que conforme a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008), alrededor del 80% de las enfermedades en los seres humanos, son causadas por la contaminación del agua.

De acuerdo con lo descrito por Flores-Márquez *et al.*, 2006, el uso intensivo del agua subterránea en el Valle de Puebla, y principalmente en la propia Ciudad de Puebla, ha traído como consecuencia efectos negativos en el equilibrio del sistema acuífero. Uno

de los efectos es el descenso del nivel piezométrico, que se refleja en la disminución del volumen de agua en manantiales y corrientes superficiales del valle, pero el más significativo es la degradación de la calidad del agua dulce del acuífero superior debido a la mezcla con agua sulfhídrica.

### **Objetivos**

Evaluar la variación de la calidad del agua en la zona urbana del acuífero de Valle de Puebla.

Aplicar el índice desarrollado por Canadian Council of Ministers of the Environment-Water Quality Index (CCME-WQI).

### **Descripción de la zona de estudio**

El acuífero Valle de Puebla, se ubica en la región central de la República Mexicana en el estado de Puebla en el cinturón volcánico transmexicano; la parte que corresponde al estado de Puebla, se extiende desde el oriente de la ciudad capital del estado de Puebla, hasta sus límites con la Sierra Nevada y se encuentra delimitada por tres imponentes volcanes La Malinche; Iztaccíhuatl y Popocatepetl. La región se localiza entre los paralelos 18°54' y 19°30', y entre los meridianos 98°00' y 98°40' al oeste de Greenwich y tiene una altitud promedio de 2,160 m sobre el nivel del mar.

El área del acuífero cubre una superficie aproximada de 2,151 km<sup>2</sup>, en el acuífero se pueden distinguir tres unidades hidrogeológicas denominadas acuífero superior, medio y profundo (figura 1) (Flores- Márquez *et al.*, 2006). El acuífero superior, comprende formaciones sedimentarias granulares y también formaciones rocosas fracturadas (constituida por rocas ígneas andesíticas y basálticas de edad Cuaternaria), provenientes de los derrames lávicos de los distintos conos volcánicos de las sierras (figura 1). Este funciona como libre, con conductividades hidráulicas altas (Flores- Márquez *et al.*, 2006). Subyaciendo al acuífero superior se encuentra un acuitardo que funciona como depósito entre el acuífero superior e inferior. Este acuitardo está conformado por andesitas, basaltos, tobas de origen ígneo y por conglomerados del Grupo Balsas y que por su fracturamiento manifiestan porosidad secundaria.

Bajo estos materiales, debido al tectonismo regional, se ubica el acuífero profundo compuesto por depósitos marinos del Cretácico Inferior de las Formaciones Tecomasuchil y Atzompa (formado por calizas), afectados por procesos de disolución que les confieren permeabilidad secundaria, y el Grupo Tecocoyunca cuyos depósitos están afectados por el fracturamiento tectónico que les confiere una permeabilidad secundaria (Flores- Márquez *et al.* 2006).

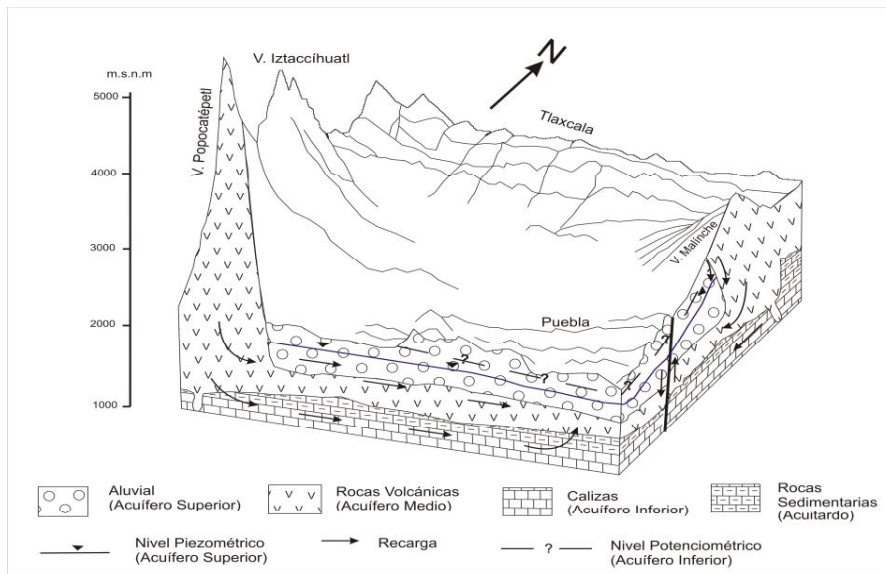


Figura 1. Modelo conceptual del acuífero del Valle de Puebla (Fuente: Salcedo *et al.* 2013)

**Metodología**

El cálculo de índice CCME-WQI se realizó tomando en cuenta, que el principal uso del agua extraída de los pozos en la zona urbana del acuífero es el de abastecimiento público, y por lo tanto, se consideraron los criterios para uso y consumo humano establecidos por la normatividad mexicana NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” modificada en el año 2000 (DOF, 2004). Se realizó el cálculo del índice CCME en la base de datos de los pozos (2011,2012 y 2013) proporcionada por el Consorcio Agua Puebla que tiene a cargo la concesión para la prestación del servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, saneamiento y disposición de aguas residuales en el Municipio de Puebla. Considerando la flexibilidad del índice se consideraron 13 parámetros (tabla 1).

Tabla 1. Parámetros y objetivos considerados para la evaluación del índice CCME-WQI para el uso de abastecimiento y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

No.	Parámetro	Límite	Unidades
1	pH	6.5-8.5	unidades
2	Sólidos Disueltos Totales	1000	mg/L
3	Turbidez	5	mg/L
4	Color	20	mg/L
5	Dureza Total	500	mg/L
6	Cloruros	250	mg/L
7	Fluoruros	0.15	mg/L
8	Fierro	0.3	mg/L
9	Manganeso	1.5	mg/L

No.	Parámetro	Límite	Unidades
10	N-Nitratos	10	mg/L
11	N-Nitritos	1	mg/L
12	SAAM	0.5	mg/L
13	Sulfatos	400	mg/L

**Descripción del método de cálculo**

El índice de calidad del agua se calcula mediante tres factores, que son los componentes del índice; el cálculo de F1 y F2 es relativamente sencillo; pero en el caso de F3 se requieren algunos pasos adicionales. A continuación se describen los pasos para el cálculo de los componentes y finalmente del índice.

F1 (Ámbito de aplicación) representa el porcentaje de variables (parámetros) que no cumplen con los objetivos por lo menos una vez durante el período de tiempo considerado (" variables que no cumplen "), relativo al número total de variables analizadas (CCME, 2001):

$$F_1 = \left( \frac{\text{Número de variables que no cumplen el objetivo}}{\text{Número Total de Variables}} \right) \times 100 \tag{Ecuación 1}$$

Donde las **variables** indican la calidad del agua para los objetivos definidos durante el período de tiempo que se calcula de índice.

**Factor 2: Frecuencia**

F2 (Frecuencia) representa el porcentaje de cada una de las pruebas (aprovechamiento) que no cumplen los objetivos ("pruebas que no cumplen") (CCME, 2001):

$$F_2 = \left( \frac{\text{Número de pruebas que no cumplen}}{\text{Número Total de Pruebas}} \right) \times 100 \tag{Ecuación 2}$$

**Factor 3: Amplitud**

F3 (amplitud) representa la suma total de cada una de las pruebas (aprovechamiento) que no cumple los objetivos. F3 se calcula en tres pasos (CCME, 2001).

(i) El número de veces que una concentración individual es mayor (ecuación 3) que o menor (ecuación 2) que el objetivo. Se denomina "Desviación anómala" y se expresa de dos maneras:

$$\text{desviación anómala}_i = \left( \frac{\text{Número de pruebas que no cumplen}}{\text{Objetivo}_j} \right) - 1 \tag{Ecuación 3}$$

$$\text{desviación anómala}_i = \left( \frac{\text{Objetivo}_j}{\text{Número de pruebas que no cumplen}} \right) - 1 \tag{Ecuación 4}$$

(ii) La suma total de los datos de las pruebas individuales que están fuera del rango, y que son calculados al sumar las desviaciones anómalas de las pruebas individuales para los objetivos de la evaluación, se divide entre el número total de pruebas (tanto las que cumplen los objetivos como los que no los cumplen). Esta variable se denomina suma normalizada o suma de la desviación anómala, o NSE, y se calcula como (CCME, 2001):

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n \text{desviación anómala}}{\text{no. total de pruebas}} \quad \text{Ecuación 5}$$

(iii)  $F_3$  se calcula por medio de una función asintótica de escalas normalizadas y la suma de la desviación anómala de objetivos (NSE), para obtener un rango entre 0 y 100 (CCME, 2001).

$$F_3 = \frac{NSE}{0.01 NSE + 0.01} \quad \text{Ecuación 6}$$

El índice CCME WQI se calcula como:

$$CCMEWQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad \text{Ecuación 7}$$

Una vez que el valor del índice se calcula, la calidad del agua se puede clasificar conforme a la siguiente escala (CCME, 2001):

Excelente: (CCME WQI Valor 95-100)

Buena: (CCME WQI Valor 80-94)

Regular: (CCME WQI Valor 65-79)

Contaminada: (CCME WQI Valor 45-64) - agua contaminada.

Muy Contaminada: (CCME WQI Valor 0-44) - agua de muy baja calidad.

## Resultados

Los resultados obtenidos en relación con la estimación del índice de calidad del agua se presentan en la figura 1. Con base en estos resultados se comprueba que la calidad del agua de los pozos evaluados con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 se ha modificado y han disminuido la cantidad de pozos con calidad excelente, ya en los años evaluados presentan mayor concentración de sólidos disueltos totales, sulfatos, calcio y magnesio.

El agua del acuífero profundo presenta altas concentraciones de sulfatos, calcio y magnesio que se refleja en la calidad del agua con los altos valores del SDT y Dureza, cuyo origen se asocia con la disolución de minerales sulfatados (yeso, anhidrita) y carbonatados (calcita) que se encontrarían en los materiales geológicos que conforman el acuífero profundo.

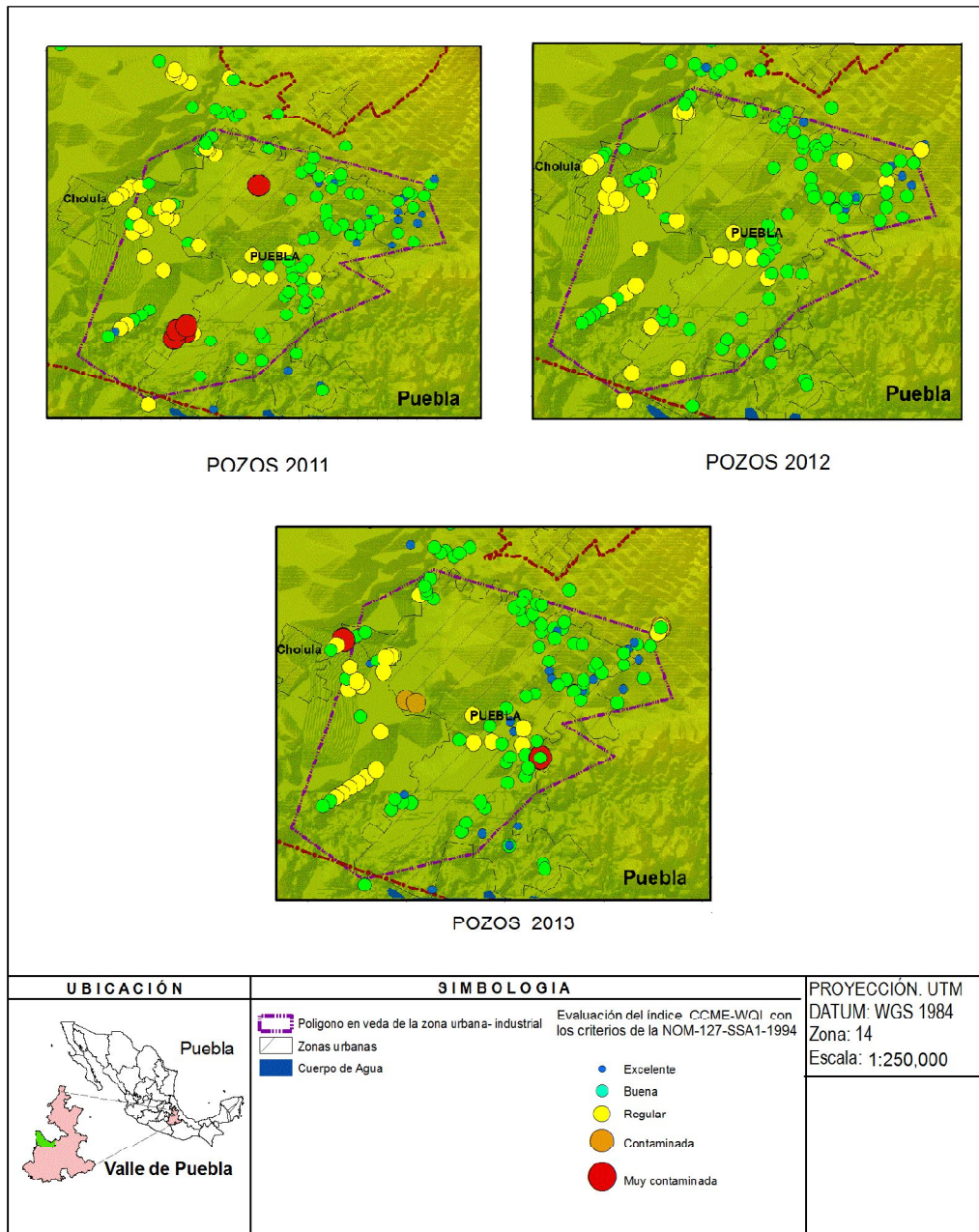


Figura 2. Índice de Calidad del agua CCME WQI

**Conclusiones**

La evaluación del índice demostró que a lo largo del tiempo ha existido un cambio paulatino en la calidad del agua de la zona urbana, en algunos pozos del sistema de abastecimiento se manifiesta el cambio de calidad disminuyendo los pozos con calidad excelente y aumentando los que tienen menor calidad, debido al aumento de las concentraciones de sólidos disueltos totales, sulfatos, calcio y magnesio.

La presente evaluación de calidad del agua corrobora lo descrito por distintos autores (Flores-Márquez *et al.*, 2006; Garfias *et al.*, 2010), que señalan que la calidad del agua subterránea en ciertas zonas de la ciudad de Puebla está siendo afectada de forma negativa, debido al agotamiento del acuífero superior, que se refleja en el descenso de los niveles piezométricos; descenso que favorece que el agua del acuífero profundo se desplace hacia el acuífero superior, mezclándose con el agua de dicho acuífero.

## Referencias

1. CCME (2001). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report, Canadian Council of Ministers of the environment winnipeg, MB, Canada. [en línea]. <http://www.ccme.ca/sourcetotap/wqi.html>.
2. DOF (2004). Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2004 Salud ambiental Agua para uso y consumo humano Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaria de Salud. Diario Oficial de la Federación (DOF). 18 de septiembre 2004.
3. Foster S., Garduño H., Nanni N., Tuinhof A. (2006). *Gestión Sustentable del agua Subterránea Instrumentos Económicos para la Gestión del Agua Subterránea usar incentivos para mejorar la sustentabilidad*. Notas informativas 2002-2006. Banco Mundial. Programa Asociado: Groudwater Management Advisor Team Washington D C EEUU. 1-8.
4. Flores-Márquez E. L., Jiménez-Suárez G., Martínez-Serrano R. G., Chavéz R. E., Silva-Pérez D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeol J* 14(7):1216-1230.
5. Gárfias J., Arroyo N., Aravena R. (2010). Hydrochemistry and origins of mineralized waters in the Puebla aquifer system, Mexico. *Environ. Earth Sc.* 59(8):1789-1805.
6. Geotecnología S A (1997). Actualización del estudio geohidrológico de los acuíferos de Valle de Puebla, Sistema Operador de Agua potable and Alcantarillado de Puebla (SOAPAP), México.
7. Salcedo E. R., Esteller M. V., Garrido H. S. Martínez M. M. (2013). Groundwater optimization model for sustainable management of the Valley of Puebla aquifer, Mexico. *Environ Earth Sci* (2013) 70:337–351.