

# Temporal variability of the groundwater level in the Tecamachalco Valley aquifer, Puebla, Mexico, 1997-2016

## Variabilidad temporal del nivel de agua subterránea del acuífero del Valle de Tecamachalco, Puebla, México, 1997-2016

Lucía Hernández-Vivanco<sup>1\*</sup>; Luis Alberto Villarreal-Manzo<sup>1</sup>; Benito Ramírez-Valverde<sup>1</sup>; Ignacio Ocampo-Fletes<sup>1</sup>; José Luis Jaramillo-Villanueva<sup>1</sup>; Benjamín Ortiz-Espejel<sup>2</sup>; Alejandro Tochiuitl-Tepox<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados-Campus Puebla, Programa en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional. Carretera Federal México-Puebla km 125.5, Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, Puebla, C. P. 72760, MÉXICO.

<sup>2</sup>El Colegio de Puebla A.C. Tehuacán Sur núm. 91, col. La Paz, Puebla, C. P. 72160, MÉXICO.

\*Corresponding author: luhevi@hotmail.com, tel. 222 55 07 217.

### Abstract

**Introduction:** The groundwater of the Tecamachalco Valley aquifer (TVA) is the main source of supply for productive activities in the area, a condition that has generated its overexploitation.

**Objective:** To analyze the temporal variation in the static levels of the TVA from 1997 to 2016 in order to determine the level of groundwater depletion in the aquifer.

**Methodology:** Historical data from the monitoring network of the Tecamachalco Groundwater Technical Committee was used, and static levels of 89 wells were recorded. The Mann-Kendall test was applied to the piezometric data and spatial analysis was incorporated with the Kriging interpolation method.

**Results:** The water level in the evaluated period showed a downward trend. The static levels of the aquifer showed an average drop of 14 m; therefore, the depletion process is unsustainable if the same trend continues.

**Study limitations:** There are no statistics on groundwater extraction; the existing data are inconsistent, so a non-parametric statistical test was chosen to reflect the behavior (depletion and recovery) of the monitored wells.

**Originality:** There are few studies on the dynamics of TVA groundwater depletion. The combination of a statistical and a geographical method is a useful tool to show the behavior of water levels.

**Conclusions:** The TVA presents a critical situation that conditions the availability and use of groundwater, which directly affects agricultural activity in the area.

**Keywords:** depletion, use, static level, recovery, soundings.

### Resumen

**Introducción:** El agua subterránea del acuífero del Valle de Tecamachalco (AVT) es la principal fuente de abastecimiento para las actividades productivas en la zona, condición que ha generado su sobreexplotación.

**Objetivo:** Analizar la variación temporal de los niveles estáticos del AVT de 1997 a 2016 para determinar el nivel de abatimiento del agua subterránea del acuífero.

**Metodología:** Se utilizaron datos históricos de la red de monitoreo del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Tecamachalco, y se registraron niveles estáticos de 89 pozos. Se aplicó la prueba Mann-Kendall a los datos piezométricos y se incorporó el análisis espacial con el método de interpolación de Kriging.

**Resultados:** El nivel del agua en el periodo evaluado presentó una tendencia decreciente. Los niveles estáticos del acuífero presentaron un abatimiento promedio de 14 m; por ello, el proceso de agotamiento es insostenible de continuar con la misma tendencia.

**Limitaciones del estudio:** No hay estadísticas de la extracción de agua subterránea; los datos existentes son inconsistentes, por lo que se optó por una prueba estadística no paramétrica que refleje el comportamiento (abatimiento y recuperación) de los pozos monitoreados.

**Originalidad:** Existen pocos estudios sobre la dinámica de abatimiento de agua subterránea del AVT. La combinación de un método estadístico y uno geográfico es una herramienta útil para mostrar el comportamiento de los niveles de agua.

**Conclusiones:** El AVT presenta una situación crítica que condiciona la disponibilidad y el aprovechamiento del agua subterránea, lo que afecta directamente a la actividad agrícola de la zona.

**Palabras clave:** abatimiento, aprovechamiento, nivel estático, recuperación, sondeos.



## Introduction

Groundwater is the main water supply source, as between 94 and 98.7 % of the liquid fresh water on the planet is located underground (Lin et al., 2013). The rate of use of this type of water has accelerated (from 1990 to 2010 its consumption doubled), which has led to a drastic reduction in aquifer levels (Oswald-Spring & Sánchez-Cohen, 2011). In this regard, Famiglietti (2014) points out that approximately 30 to 40 % of the total water that supplies more than two billion people in the world, and more than half of the water used for irrigation, is of underground origin.

Groundwater is used for different purposes, including industrial, agricultural and domestic uses, which account for more than half of the annual water consumption for many countries (Shrestha, Bach, & Pandey, 2016) and worsen the situation of aquifers worldwide (Gorelick & Zheng, 2015; Mi, Xiao, Zhang, Yin, & Shen, 2016). As a result, the main aquifers are over-exploited; that is, their extraction level exceeds their recharge level. According to Custodio et al. (2016) and Konikow (2011), from 1900 to 2010 the world population increased by 340 % (1.3 % per year). During this same period, water extraction increased by 630 % (1.8 % per year), resulting in increased water scarcity.

Lack of data on the volume of available water creates uncertainty, as estimates vary considerably; even long-term estimates do not reflect reality. Given this situation and the nil reliability of the data, several studies have been carried out to more accurately demonstrate groundwater depletion, based on gravity measurements with GRACE satellites and satellite imagery (Custodio et al., 2016; Famiglietti, 2014; Forootan et al., 2014; Maliva, 2016; Sishodia, Shukla, Graham, Wani, & Garg, 2016; Van-Loon, Kumar, & Mishra, 2017). In this regard, Konikow (2015) highlights the need for local data from piezometric studies, as well as a comprehensive approach. Also, the hydraulic properties of aquifers, location of groundwater extraction points, recharge areas, and changes associated with aquifers should be considered (Custodio et al., 2016).

In Mexico, overexploitation of aquifers has been increasing since the 1970s, when 32 of the country's 653 aquifers were declared overexploited. In the 1980s, this figure increased to 80, while in 2001 it reached 97, in 2005 it hit 104, and by 2016 it was 105, from which almost 60 % of the groundwater was extracted (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2006, 2013, 2016).

The recovery of aquifers largely depends on the recharge derived from the amount of rain that infiltrates into the subsoil, but this only occurs when the soil water content exceeds its field capacity and the surplus

## Introducción

El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de agua; entre el 94 y 98.7 % del agua dulce líquida en el planeta es subterránea (Lin et al., 2013). El ritmo de aprovechamiento de este tipo de agua se ha acelerado (de 1990 a 2010 su consumo se duplicó), lo que ha generado una reducción drástica en el niveles de los acuíferos (Oswald-Spring & Sánchez-Cohen, 2011). Al respecto, Famiglietti (2014) señala que, aproximadamente, de 30 a 40 % del total de agua que abastece a más de dos mil millones de personas en el mundo, y más de la mitad del agua utilizada para el riego, es de origen subterráneo.

El agua subterránea se utiliza para diferentes propósitos, incluyendo el uso industrial, agrícola y doméstico, los cuales representan más de la mitad del consumo anual de agua para muchos países (Shrestha, Bach, & Pandey, 2016) y empeoran la situación de los acuíferos en todo el mundo (Gorelick & Zheng, 2015; Mi, Xiao, Zhang, Yin, & Shen, 2016). En consecuencia, los principales acuíferos están sobreexplotados; es decir, su nivel de extracción supera el nivel de recarga. De acuerdo con Custodio et al. (2016) y Konikow (2011), de 1900 a 2010 la población mundial incrementó 340 % (1.3 % anual). Durante este mismo período, la extracción de agua aumentó 630 % (1.8 % anual), lo que se traduce en una mayor escasez de agua.

La falta de datos sobre el volumen de agua disponible genera incertidumbre, ya que las estimaciones varían considerablemente; incluso las estimaciones a largo plazo no reflejan la realidad. Ante esta situación y la nula confiabilidad de los datos, se han realizado diversos estudios para demostrar de manera más precisa el agotamiento de las aguas subterráneas, esto a partir de mediciones de gravedad con satélites GRACE e imágenes satelitales (Custodio et al., 2016; Famiglietti, 2014; Forootan et al., 2014; Maliva, 2016; Sishodia, Shukla, Graham, Wani, & Garg, 2016; Van-Loon, Kumar, & Mishra, 2017). En este sentido, Konikow (2015) resalta que es necesario contar con datos a nivel local a partir de estudios piezométricos, además de un enfoque integral. También, se deben considerar las propiedades hidráulicas de los acuíferos, la ubicación de los puntos de extracción del agua subterránea, las zonas de recarga y los cambios asociados con los acuíferos (Custodio et al., 2016).

En México, la sobreexplotación de los acuíferos ha ido aumentando desde la década de los setenta; periodo en el que 32 acuíferos, de los 653 del país, se declararon sobreexplotados. En la década de los ochenta, dicha cifra incrementó a 80, mientras que en 2001 llegó a 97, en 2005 a 104 y para 2016 ya eran 105, de estos últimos se extraía casi el 60 % del agua subterránea (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2006, 2013, 2016).

becomes recharge (Gong, Pan, & Xu, 2012). Fishman, Siegfried, Raj, Modi, and Lall (2011) argue that water stress can occur in the short term due to a lack of rainfall, which increases the volume of extractions.

According to CONAGUA (2016), 38.9 % of the total volume of water granted under concession for consumptive uses is extracted from aquifers, that is, 33311 hm<sup>3</sup>·year<sup>-1</sup>. Of the total water allocated for agricultural use, 35.9 % is of underground origin, which supplies a third of the total irrigation area. On the other hand, 58.6 % of the total volume of water for public supply and 51.4 % of the water for industry are also of underground origin, and both had a significant increase from 2006 to 2015.

It is important to consider that the above data refer to the volume of water granted under concession; however, there is a lack of data on the volume of water that is actually extracted and the number of wells from which this water is extracted. Furthermore, according to Elsheikh, Zeielabdein, and Babikir (2009), Famiglietti (2014) and Kvarner and Snilsberg (2013), this situation is not exclusive to Mexico. Also, it should be taken into account that 58 % of the Mexican territory has arid, semi-arid and hyper-arid land (desert) ecosystems, which receive less than the national rainfall average (Oswald-Spring & Sánchez-Cohen, 2011), a condition that puts at risk the recharge of aquifers and, therefore, their recovery.

Several studies have pointed out the severity of aquifer depletion in Mexico and have addressed the depletion of groundwater from different disciplines, mainly in areas located in the center-north and north of the country. A notable case is found in San Luis Potosí, where 92 % of the total water used comes from underground sources and only 8 % is of surface origin (Contreras-Servín, & Galindo-Mendoza, 2008), while in Mexico City and its metropolitan area, 70 % of the water consumed is of underground origin (Durazo & Farvolden, 1989), slightly less than the percentage extracted in Aguascalientes (72 %) (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2013).

The study area corresponds to the Tecamachalco Valley aquifer (TVA) in Puebla, Mexico, which was declared partially overexploited in the 1950s, and in 1980, 95 % of its territory was declared closed (CONAGUA, 2003). Nevertheless, the aquifer continues to be the main source of supply, and 84 % of the total volume granted under concession is for agricultural use. Therefore, the objective was to analyze the temporal variation of the TVA's static levels during the period from 1997 to 2016 in order to determine the level of depletion from groundwater uses.

La recuperación de los acuíferos depende, en gran medida, de la recarga derivada de la cantidad de lluvia que se infiltra hacia el subsuelo, pero esto sólo ocurre cuando el contenido de agua del suelo excede su capacidad de campo y el excedente se convierte en recarga (Gong, Pan, & Xu, 2012). Fishman, Siegfried, Raj, Modi, y Lall (2011) sostienen que se puede presentar estrés hídrico a corto plazo debido a la escasez de precipitaciones, lo que hace que incrementen el volumen de las extracciones.

De acuerdo con la CONAGUA (2016), de los acuíferos se extrae el 38.9 % del volumen total de agua concesionada para usos consuntivos, es decir, 33311 hm<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>. Del total de agua concesionada para uso agrícola, el 35.9 % es de origen subterráneo, lo que abastece una tercera parte de la superficie total de riego. Por su parte, el 58.6 % del volumen total de agua para abastecimiento público y el 51.4 % del agua concesionada para la industria también son de origen subterráneo, y ambos han tenido un incremento significativo de 2006 a 2015.

Es importante considerar que los datos anteriores se refieren al volumen concesionado; sin embargo, se carece de datos del volumen de agua que realmente se extrae y del número de pozos de los que se extrae dicha agua. Además, de acuerdo con Elsheikh, Zeielabdein, y Babikir (2009), Famiglietti (2014) y Kvarner y Snilsberg (2013), esta situación no es exclusiva de México. También, se debe tener en cuenta que 58 % del territorio mexicano presenta ecosistemas de tierras áridas, semiáridas e hiper-áridas (desiertos), los cuales están por debajo del promedio nacional de lluvias (Oswald-Spring & Sánchez-Cohen, 2011), condición que pone en riesgo la recarga de los acuíferos y, por ende, su recuperación.

En diversas investigaciones se ha señalado la gravedad del abatimiento de los acuíferos en México y se ha abordado el agotamiento del agua subterránea desde diferentes disciplinas, principalmente en zonas localizadas en el centro-norte y norte del territorio nacional. Un caso notable se encuentra en San Luis Potosí, en donde 92 % del total del agua utilizada proviene de fuentes subterráneas y únicamente el 8 % es de origen superficial (Contreras-Servín, & Galindo-Mendoza, 2008), mientras que en la Ciudad de México y su área metropolitana, el 70 % del agua que se consume es de origen subterráneo (Durazo & Farvolden, 1989), poco menos del porcentaje extraído en Aguascalientes (72 %) (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2013).

La zona de estudio corresponde al acuífero del Valle de Tecamachalco (AVT), Puebla, México, el cual fue declarado como sobreexplotado de manera parcial desde la década de los cincuenta, y en 1980 se decretó

## Materials and methods

### Study area

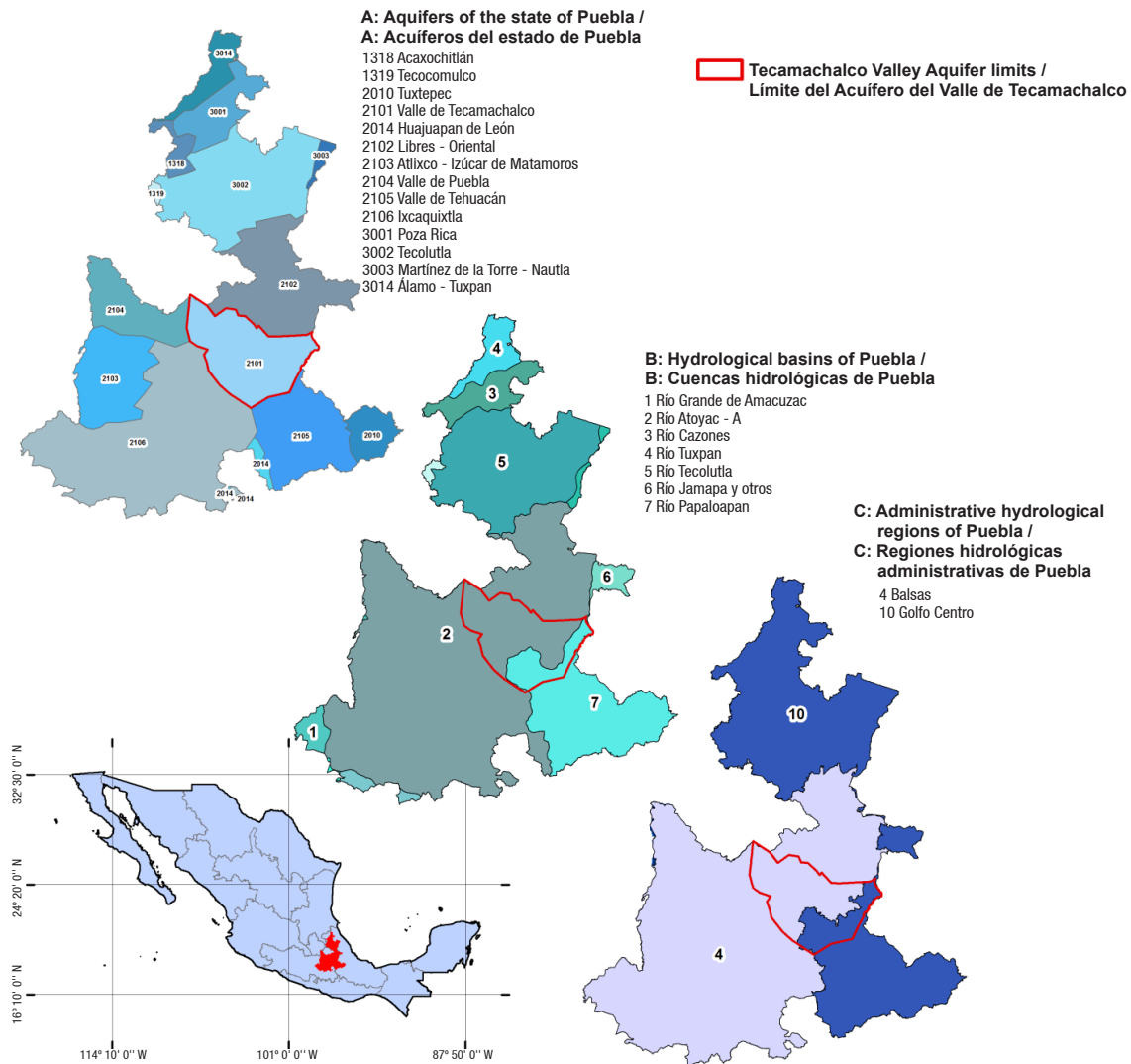
The TVA has an area of 3600 km<sup>2</sup> and is located in the central zone of the state of Puebla, Mexico. Geographically, it is limited by the parallels 18° 32' 20.1" and 19° 13' 45.8" and the meridians 97° 14' 31.7" and 98° 3' 6.2" (Figure 1). The TVA Management Plan states that 27 municipalities make up the aquifer, even though its geographical boundaries include other municipalities. Currently, this aquifer is overexploited, with a water deficit of 63.3625 Mm<sup>3</sup>.year<sup>-1</sup> (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018) and with an area population of 728878 inhabitants (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010) mainly engaged in agriculture.

en veda el 95 % de su territorio (CONAGUA, 2003). No obstante, el acuífero continúa siendo la principal fuente de abastecimiento, y el 84 % del volumen total concesionado es de uso agrícola. Por lo anterior, el objetivo fue analizar la variación temporal de los niveles estáticos del AVT durante el período de 1997 a 2016 para determinar el nivel de abatimiento de los aprovechamientos de agua subterránea.

## Materiales y métodos

### Zona de estudio

El AVT tiene una superficie de 3600 km<sup>2</sup> y se ubica en la zona centro del estado de Puebla, México. Geográficamente, está limitado por los paralelos 18° 32' 20.1" y 19° 13' 45.8" y los meridianos 97° 14' 31.7"



**Figure 1.** Location of the Tecamachalco Valley aquifer according to its hydrological condition. Source: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2012) and GeoComunes (2015), with some modifications.

**Figura 1.** Ubicación del acuífero del Valle de Tecamachalco de acuerdo con su condición hidrológica. Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2012) y GeoComunes (2015), con algunas modificaciones.

The TVA encompasses the IV Balsas and X Golfo Centro administrative hydrological regions. The former covers about 90 % of the aquifer and contains the Esperanza, Palmar de Bravo and Tepeaca-Tecamachalco valleys. The latter includes the municipalities of Esperanza, Cañada Morelos, Tlacotepec de Benito Juárez and Yehualtepec (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH], 1989).

Because of its surface waters, the TVA belongs to Hydrological Region No. 28 (Papaloapan River Basin and Salado River sub-basin), which extends from the Esperanza Valley and the south-western portion of the Tepeaca-Tecamachalco Valley, and to the second Unit of the Valsequillo 030 Irrigation District, until Tehuacán. The first unit of this Irrigation District, like the Palmar de Bravo Valley, is located within the Balsas River Hydrological Region No. 18 (CONAGUA, 2015).

Physiographically, the aquifer area is located at the eastern end of the Trans-Mexican Volcanic Belt and part of the Sierra Madre del Sur. Three main geomorphological units have been identified in the study region: intermountain plains (valleys), mountain ranges and volcanic cones, with elevations ranging from 2000 m above sea level in the lower parts of Tepeaca-Tecamachalco, to 2400 m above sea level towards the volcanoes. Folds characterize the limestone rocks, which in turn constitute an elongated mountain range with a northwest-southeast orientation, in the Sierra de Soltepec and Cuesta Blanca (both located in the northern portion of the study area), and divided by the Esperanza and Palmar de Bravo valleys. The Sierra el Monumento delimits the Palmar de Bravo and Tepeaca-Tecamachalco valleys (Comisión Nacional del Agua [CNA], 1999).

The climate in the municipalities of Palmar de Bravo, Esperanza and Cañada Morelos is type BS1Kw(w), semi-dry climate, semi-dry temperate subtype with temperatures between 12 and 18 °C, and average rainfall between 400 and 600 mm·year<sup>-1</sup>. Towards the center of the aquifer, in Tecamachalco and Quecholac, the climate is type C(wo)(w), temperate sub-humid (groups the less humid subtypes) with average annual temperature from 16 to 18 °C and rainfall of approximately 600 mm·year<sup>-1</sup>. In the municipalities of Tepeaca, Acajete and Acatzingo, the climate types are C(w1)(w) and C(w2)(w), temperate sub-humid (the former groups the medium-humidity subtypes, and the latter groups the more humid subtypes), with average rainfall of between 600 and 700 mm·year<sup>-1</sup>. The Pico de Orizaba and La Malinche volcano areas are the coldest, with average temperatures of 12 to 14 °C and average rainfall of 602 to 850 mm·year<sup>-1</sup> (INEGI, 2009a, 2009b, 2009c).

y 98° 3' 6.2" (Figura 1). En el Plan de Manejo del AVT se establece que son 27 municipios los que conforman el acuífero, aun cuando sus límites geográficos abarcan otros municipios. Actualmente, dicho acuífero se encuentra sobreexplotado, con un déficit de agua de 63.3625 Mm<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup> (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018) y con una población de 728878 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010) dedicados principalmente a la agricultura.

El AVT comprende las regiones hidrológicas administrativas IV Balsas y X Golfo Centro. La primera abarca cerca de 90 % del acuífero y en ella se encuentran los valles de Esperanza, Palmar de Bravo y Tepeaca-Tecamachalco. En la segunda se encuentran los municipios de Esperanza, Cañada Morelos, Tlacotepec de Benito Juárez y Yehualtepec (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH], 1989).

Por sus aguas superficiales, el AVT pertenece a la Región Hidrológica núm. 28 Cuenca del río Papaloapan y subcuenca del río Salado, la cual abarca desde el Valle de Esperanza y la porción sur-occidental del Valle de Tepeaca-Tecamachalco, y a la segunda Unidad del Distrito de Riego 030 Valsequillo, hasta Tehuacán. La primera unidad de este Distrito de Riego, al igual que el Valle del Palmar de Bravo, se encuentra dentro de la Región Hidrológica del río Balsas núm. 18 (CONAGUA, 2015).

Fisiográficamente, la zona del acuífero se encuentra enclavada en el extremo oriente de la faja Volcánica Transmexicana y parte de la Sierra Madre del Sur. En la región de estudio, se han identificado tres unidades geomorfológicas principales: planicies intermontanas (valles), serranías y conos volcánicos, con elevaciones que van de los 2000 msnm en las partes más bajas de Tepeaca-Tecamachalco, hasta los 2400 msnm hacia los volcanes. Los plegamientos caracterizan a las rocas calcáreas, que a su vez constituyen una sierra de forma alargada de orientación noroeste-sureste, en la Sierra de Soltepec y Cuesta Blanca (ambas localizadas en la porción septentrional de la zona de estudio), y dividida por los valles de Esperanza y Palmar de Bravo. Por su parte, la Sierra el Monumento delimita los valles de Palmar de Bravo y el de Tepeaca-Tecamachalco (Comisión Nacional del Agua [CNA], 1999).

El clima en los municipios de Palmar de Bravo, Esperanza y Cañada Morelos es del tipo BS1Kw(w), clima semiseco, subtipo semiseco templado con temperaturas entre 12 y 18 °C, y precipitación promedio de 400 a 600 mm·año<sup>-1</sup>. Hacia el centro del acuífero, en Tecamachalco y Quecholac, el clima es del tipo C(wo)(w), templado subhúmedo (agrupa a los subtipos menos húmedos) con temperatura promedio anual

## Data

Information on the volume of water granted under concession from 1445 TVA groundwater wells, which are in the Public Registry of Water Rights (REPD), was used. The data analyzed pertain to the period from 1997 to 2016, were generated by CONAGUA and include the location and different consumptive uses of water such as: agricultural, public-urban, industrial, services, multiple uses, livestock and domestic.

The Tecamachalco Technical Groundwater Committee (COTAS in Spanish) has been monitoring a network of wells since 1997, which has varied from 60 to 71 wells, since sometimes it is not possible to survey all of them or, in some cases, they have been replaced because they no longer operate. These observation wells are used for urban, agricultural, and livestock purposes, and are inspected from September to December.

To define the TVA sub-basins, an Aster 2011 version 2 elevation model was generated, at a spatial resolution of 15 m<sup>2</sup>, with a 60 km<sup>2</sup> intake located in column 2482 and row 1246.

The piezometric data from the 2016 groundwater extraction wells were obtained in the field in order to extend the monitoring network to the sub-basins where no data are available. To this end, 154 wells were surveyed, 75 % of which are for agricultural use. Due to the deteriorating conditions of the pumping equipment and the lack of conditioning to carry out the probing, data on static levels were only recorded for 89 wells.

## Data analysis and processing

Data handling and processing were done in the XLSTAT statistical program and the Geographic Information System (GIS). The sub-basins were delimited with the GIS spatial analysis Hydrology tool. Based on a digital elevation model (DEM) and contour lines, a drainage point of the basin was determined, for which the perimeter was defined according to the water dividing line, taking the contour or relief lines as a reference. In addition, the basins are delimited by the watershed (an imaginary line that joins the points of maximum relative height value between two adjacent slopes, but of opposite exposure), from the highest part of the basin to its point of emission in the lowest hypsometric zone. The lines that delimit the sub-basins are known as secondary watersheds.

The Mann-Kendall (MK) statistical test (Sang, Wang, & Liu, 2014; Sishodia et al., 2016) was used to test the importance of groundwater trends and hydrological processes. This non-parametric test has been used

de 16 a 18 °C y precipitación de aproximadamente 600 mm·año<sup>-1</sup>. En los municipios de Tepeaca, Acajete y Acatzingo, los tipos de clima son C(w1)(w) y C(w2)(w), templados subhúmedos (el primero agrupa los subtipos de humedad media, y el segundo agrupa los subtipos más húmedos), con precipitación media entre 600 y 700 mm·año<sup>-1</sup>. Las zonas del Pico de Orizaba y del volcán La Malinche son las más frías, con temperatura media de 12 a 14 °C y precipitación media de 602 a 850 mm·año<sup>-1</sup> (INEGI, 2009a, 2009b, 2009c).

## Datos

Se utilizó información del volumen concesionado de 1445 pozos de agua subterránea del AVT, el cual se encuentran en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD). Los datos analizados pertenecen al periodo de 1997 a 2016, fueron generados por la CONAGUA e incluyen la ubicación y los diferentes usos consuntivos del agua como: agrícola, público-urbano, industrial, servicios, usos múltiples, pecuarios y domésticos.

El Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Tecamachalco monitorea una red de pozos desde 1997, la cual ha variado de 60 a 71 pozos, ya que en ocasiones no es posible sondearlos todos o, en algunos casos, se han sustituido porque han dejado de operar. Los usos de estos pozos de observación son urbano, agrícola y pecuario, y los sondeos se realizan de septiembre a diciembre.

Para definir las subcuencas del AVT, se generó un modelo de elevación Aster 2011 versión 2, a una resolución espacial de 15 m<sup>2</sup>, con una toma de 60 km<sup>2</sup> ubicados en la columna 2482 y la fila 1246.

Los datos piezométricos de los pozos de extracción de agua subterránea de 2016 se obtuvieron en campo con el fin de ampliar la red de monitoreo hacia la subcuencas donde no se cuenta con datos. Para tal efecto, se sondearon 154 pozos, de los cuales el 75 % son de uso agrícola. Por las condiciones de deterioro de los equipos de bombeo y la falta de acondicionamiento para realizar el sondeo, solo se registraron datos de niveles estáticos de 89 pozos.

## Análisis y procesamiento de datos

El manejo y procesamiento de los datos se realizó en el programa estadístico XLSTAT y el Sistema de Información Geográfica (SIG). Las subcuencas se delimitaron con la herramienta *Hydrology* del análisis espacial del SIG. A partir de un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) y curvas de nivel, se determinó un punto de desfogue o drenaje de la cuenca, para lo cual se definió el perímetro de acuerdo con la línea divisoria de aguas, tomando como referencia las curvas de nivel o relieve.

when data are not normally distributed, but requires the data to be independent (Milan & Trajkovic, 2013). It is also used when there are missing or uncorrelated data (Hamed, 2008; Hasanuzzaman, Song, Han, Zhang, & Hussain, 2017). The purpose of this test is to statistically assess whether there is an upward or downward trend, monotonous or monotonic, of the variable of interest, meaning that the variable increases or decreases constantly over time. In addition, it is useful to identify seasons where changes are significant or of great magnitude, and to quantify these findings (Kisi & Ay, 2014; Zhang, Odeh, & Han, 2009).

This method compares the last measured values with the previous measured value by calculating the MK ( $S$ ) statistic. In this way,  $n(n-1)/2$  possible pairs of data are compared for  $n$  observations (Equation 1). The significance level for the trend of this test is 0.05.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \quad (1)$$

Where  $S$  indicates the increasing trend (positive values) or decreasing trend (negative values) over time,  $y_j$  and  $y_i$  are the annual values of the data in the time series and the values of  $\text{sgn}(y_j - y_i)$  indicate the following:

$$\text{sgn}(y_j - y_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } (y_j - y_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (y_j - y_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (y_j - y_i) < 0 \end{cases}$$

The MK test was used with the Thiel-Sen slope (Yue, Pilon, & Cavadias, 2002), commonly referred to as Sen's slope, and serves to measure the magnitude of the trend. This slope is the median of the slopes obtained from all pairs of data compared and is calculated from the following equation:

$$\beta_1 = \text{median}(y_j - y_i / x_j - x_i) \quad (2)$$

where  $j > i, j = 1$  and  $i = 1 \dots n - 1$ ,  $n$  is the total number of observations.

On the other hand, to analyze the behavior of the piezometric levels derived from the TVA groundwater well sounding program and the Tecamachalco COTAS monitoring network, the Kriging geostatistical spatial interpolation method (Equation 3), where the spatial variation of  $Z$  values can be deduced from the surrounding values according to the homogeneous functions, was used. The distance or direction between the sampling points reflects a spatial correlation that can be used to explain the variation in the area; to do so, a mathematical function is fitted to a specific number of points, or to all the points, within a given radius, thereby obtaining the output value for each location (Coaguila-Núñez, Tangerino-Hernández, Freitas-da Silva,

Además, las cuencas están delimitadas por el parteaguas (línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes, pero de exposición opuesta), desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión en la zona hipsométricamente más baja. Las líneas que delimitan las subcuencas se conocen como parteaguas secundarios.

Se utilizó la prueba estadística de Mann-Kendall (MK) (Sang, Wang, & Liu, 2014; Sishodia et al., 2016) para probar la importancia de las tendencias del agua subterránea y de los procesos hidrológicos. Esta prueba no paramétrica se ha utilizado cuando los datos no se distribuyen normalmente, pero requiere que los datos sean independientes (Milan & Trajkovic, 2013). También se utiliza cuando existen datos faltantes o datos no correlacionados (Hamed, 2008; Hasanuzzaman, Song, Han, Zhang, & Hussain, 2017). El propósito de esta prueba es evaluar estadísticamente si existe una tendencia ascendente o descendente, monótona o monotónica, de la variable de interés, lo que significa que la variable aumenta o disminuye constantemente a través del tiempo. Además, es útil para identificar estaciones donde los cambios son significativos o de gran magnitud, y a cuantificar estos hallazgos (Kisi & Ay, 2014; Zhang, Odeh, & Han, 2009).

Este método compara los últimos valores medidos con el valor anterior medido calculando el estadístico de MK ( $S$ ). De esta manera, se comparan  $n(n-1)/2$  pares posibles de datos para  $n$  observaciones (Ecuación 1). El nivel de significancia para la tendencia de esta prueba es de 0.05.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \quad (1)$$

Donde  $S$  indica la tendencia creciente (valores positivos) o decreciente (valores negativos) con el tiempo,  $y_j$  y  $y_i$  son los valores anuales de los datos en la serie de tiempo y los valores de  $\text{sgn}(y_j - y_i)$  indican lo siguiente:

$$\text{sgn}(y_j - y_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } (y_j - y_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (y_j - y_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (y_j - y_i) < 0 \end{cases}$$

La prueba MK se utilizó con la pendiente Thiel-Sen (Yue, Pilon, & Cavadias, 2002), referida comúnmente como pendiente Sen, y sirve para medir la magnitud de la tendencia. Dicha pendiente es la mediana de las pendientes obtenidas de todos los pares de datos comparados y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\beta_1 = \text{mediana}(y_j - y_i / x_j - x_i) \quad (2)$$

donde  $j > i, j = 1$  y  $i = 1 \dots n - 1$ ,  $n$  es el número total de observaciones.

& Gonçalves-Feitosa, 2013). This method is very useful in surface and underground hydrology studies, as well as soil and geological studies, even though it does not allow the treatment of topographical discontinuities that involve abrupt changes and slope breaks.

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (3)$$

Where  $Z(S_i)$  is the value measured at location  $i$ ,  $\lambda_i$  is an unknown weighting for the value measured at location  $i$ ,  $S_0$  is the location of the prediction and  $N$  is the amount of measured values.

Finally, a schematic simplification of the aquifer representing its real conditions was made to show the dynamics of the groundwater level from 1997 to 2016.

## Results

### Background on TVA groundwater levels

The TVA has been declared partially closed since the 1950s; however, there are no historical data that clearly show the dynamics of groundwater depletion or availability in this aquifer (CONAGUA-COTAS, 2002). According to the first geohydrological studies carried out in the 1970s by CONAGUA (2002), groundwater flow follows a path from northeast to southeast, and its main recharge areas come from Malinche, the Sierra de Cuesta Blanca, the Sierra de Soltepec and the Sierra del Monumento. In 1973, in the Palmar de Bravo and Esperanza region, 144 groundwater use points were analyzed, with a total extraction of  $30.6 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ , of which  $22.6 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  of 108 points corresponded to Palmar de Bravo, and  $8 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  of 36 points were estimated in Esperanza.

In 1974, 501 extraction points (wells, waterwheels and filtering galleries) were recorded in the Palmar de Bravo and Esperanza valleys, and static level depths of between 5 and 90 m were observed in the plains, and of 140 m in the most rugged topographic areas. At that time,  $52 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  were extracted in the Palmar de Bravo Valley:  $17 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  from the filtering galleries and  $35 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  from the aquifer. In the Esperanza Valley, an extraction of  $11 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  was estimated:  $2 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  came from filtering galleries and  $9 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$  from the aquifer (CONAGUA, 2002). The depth of the static groundwater level in 1979, from Cuacnopalan to Acatzingo de Hidalgo, varied from 10 to 30 m, except for Quecholac, where these depths ranged from 40 to 50 m (CONAGUA, 2002); to the west of Cañada Morelos, this level was between 60 and 80 m.

At the end of the 1980s, the static level depth in the Esperanza Valley was between 20 and 50 m, to 10 m north of San Antonio Soledad and to 80 m in the

Por otro lado, para analizar el comportamiento de los niveles piezométricos derivados del sondeo de pozos de agua subterránea del AVT y de la red de monitoreo del COTAS Tecamachalco, se utilizó el método geoestadístico de interpolación espacial Kriging (Ecuación 3), donde la variación espacial de los valores de  $Z$  se puede deducir de los valores circundantes de acuerdo con las funciones homogéneas. La distancia o la dirección entre los puntos de muestreo refleja una correlación espacial que se puede utilizar para explicar la variación en la superficie; para ello, se ajusta una función matemática a una cantidad específica de puntos, o a todos los puntos, dentro de un radio determinado, con lo que se obtiene el valor de salida para cada ubicación (Coaguila-Núñez, Tangerino-Hernández, Freitas-da Silva, & Gonçalves-Feitosa, 2013). Este método es muy útil en estudios de hidrología superficial y subterránea, estudios de suelo y geológicos, aun cuando no permite el tratamiento de discontinuidades topográficas que supongan cambios bruscos y rupturas de pendiente.

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (3)$$

Donde  $Z(S_i)$  es el valor medido en la ubicación  $i$ ,  $\lambda_i$  es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$ ,  $S_0$  es la ubicación de la predicción y  $N$  es la cantidad de valores medidos.

Finalmente, se realizó una simplificación esquemática del acuífero que representa sus condiciones reales para evidenciar la dinámica del nivel de agua subterránea de 1997 a 2016.

## Resultados

### Antecedentes de los niveles de agua subterránea del AVT

El AVT fue declarado en veda de manera parcial desde la década de los cincuenta; sin embargo, no se cuenta con los datos históricos que denoten claramente la dinámica del abatimiento o disponibilidad de agua subterránea de este acuífero (CONAGUA-COTAS, 2002). De acuerdo con los primeros estudios geohidrológicos realizados en la década de los setenta por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la CONAGUA (2002), el flujo de agua subterránea sigue una trayectoria de noreste a sureste, y sus principales zonas de recarga provienen de la Malinche, la Sierra de Cuesta Blanca, la Sierra de Soltepec y la Sierra del Monumento. En 1973, en la región de Palmar de Bravo y Esperanza, se analizaron 144 puntos de aprovechamiento de agua subterránea, con una extracción total de  $30.6 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ; de los cuales,  $22.6 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  de 108 puntos correspondieron a Palmar de Bravo, y  $8 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  de 36 puntos se estimaron en Esperanza.



northern zone of the Esperanza municipality. On the same date, the depth of static groundwater levels in the area between Cuacnopalan and Acatzingo increased to 25 and 50 m, with a local maximum of 70 m at the foot of the Sierra Soltepec and towards the town of General Felipe Ángeles, while in Quecholac the depths were 30 m. In the Tepeaca-Tecamachalco area, and up to the area surrounding Tlacotepec de Benito Juárez, the groundwater depth varied between 10 and 50 m, with the exception of the area located to the north of Santiago Acatlán and towards the slopes of the La Malinche volcano, where depths greater than 70 m were found, with a maximum of 130 m in San Agustín Tlaxco, a situation caused by the topography of the terrain. South of Tepanco de López, in the third irrigation unit, depths were 5 to 30 m, which suggested that this part of the aquifer was close to balance or with low overexploitation.

The estimated extraction of groundwater from the TVA was 228  $\text{hm}^3\cdot\text{year}^{-1}$  in 1988, 283  $\text{hm}^3\cdot\text{year}^{-1}$  in 1999 and 343  $\text{hm}^3\cdot\text{year}^{-1}$  in 2002. The average depth of static water levels in 109 wells, reported in 1996, was 33.7 m, and the dynamic level was 48.9 m. According to the 114 pilot wells of the same year, the average static level was 36.4 m and the average instantaneous flow rate was 31  $\text{L}\cdot\text{s}^{-2}$ , resulting in a specific capacity of 2  $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  (CONAGUA, 2003). In the same year, Amozoc-Acatzingo, Tepeaca-Hueyotlipan and Atoyatempan-Primera Unidad had an average static level of 47.1 m, based on data from 163 wells, and an average dynamic level of 58 m, pertaining to 249 wells.

For the period between 1974 and 1988, Tecamachalco had a static level drop of -20 m (CONAGUA, 2003), similar to that of the Palmar de Bravo Valley with drops of -10 to -20 m (approximately  $-1.2\text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$ ). In Tepeaca there were drops of -10 to -30 m, and in Acatzingo de Hidalgo there was a 2 m recovery of the static level. In the 1990s, the TVA groundwater level was monitored through a network of wells, in which the Tecamachalco COTAS conducted an annual survey. The data obtained are analyzed in detail below.

#### TVA groundwater level dynamics from 1997 to 2016

CONAGUA's REPDA was created in 1992 from the National Water Act, and in 1994 the TVA sounding program began. In that year, 14 wells were registered with a volume of water granted under concession of 1592 288  $\text{m}^3$ . For 2016, the number of wells increased to 1445, which were mainly for public and agricultural use; this increase was reflected in the volume of water granted under concession, which reached 212490006.5  $\text{m}^3$ ; that is, there was a 26 % annual increase (Figure 2). Additionally, Figure 2 shows the consumptive uses of water from the wells; these wells correspond only

En 1974 se censaron 501 puntos de aprovechamiento (pozos, norias y galerías filtrantes) en el valle de Palmar de Bravo y de Esperanza, y se observaron profundidades del nivel estático entre 5 y 90 m en las planicies, y de 140 m en las zonas topográficas más accidentadas. Para esa fecha, en el Valle de Palmar de Bravo se extraían 52  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ : 17  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$  provenían de las galerías filtrantes y 35  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$  del acuífero. Por su parte, en el Valle de Esperanza se estimó una extracción de 11  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ : 2  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$  provenían de galerías filtrantes y 9  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$  del acuífero (CONAGUA, 2002). La profundidad del nivel estático de agua subterránea en 1979, desde Cuacnopalan hasta Acatzingo de Hidalgo, varió de 10 a 30 m, a excepción de Quecholac, donde dichas profundidades oscilaron entre 40 y 50 m (CONAGUA, 2002); al poniente de Cañada Morelos, dicho nivel se encontraba entre los 60 y 80 m.

A finales de la década de los ochenta, la profundidad del nivel estático en el Valle de Esperanza se encontraba entre los 20 y 50 m, a 10 m al norte de San Antonio Soledad y a 80 m en la zona norte del municipio de Esperanza. En esta misma fecha, la profundidad de los niveles estáticos de agua subterránea, en el área comprendida entre Cuacnopalan y Acatzingo, incrementó a 25 y 50 m, con un máximo local de 70 m al pie de la Sierra Soltepec y hacia el poblado de General Felipe Ángeles, mientras que en Quecholac las profundidades fueron de 30 m. En la zona de Tepeaca-Tecamachalco, y hasta las inmediaciones de Tlacotepec de Benito Juárez, las profundidades del agua subterránea variaban entre 10 y 50 m, con excepción del área ubicada hacia el norte de Santiago Acatlán y hacia las faldas del volcán de La Malinche, donde se encontraron profundidades mayores a 70 m, con un máximo de 130 m en San Agustín Tlaxco, situación provocada por la topografía del terreno. Al sur de Tepanco de López, en la tercera unidad de riego, las profundidades fueron de 5 a 30 m, lo que sugirió que esa parte del acuífero se encontraba cercana al equilibrio o con una baja sobreexplotación.

La extracción de agua subterránea del AVT estimada en 1988 fue de 228  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ , en 1999 de 283  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$  y en 2002 de 343  $\text{hm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ . Por su parte, la profundidad promedio de los niveles estáticos del agua de 109 pozos, reportados en 1996, era de 33.7 m, y el nivel dinámico de 48.9 m. De acuerdo con los 114 pozos piloto del mismo año, el promedio de los niveles estáticos fue de 36.4 m y el gasto promedio instantáneo de 31  $\text{L}\cdot\text{s}^{-2}$ , lo que resultó en una capacidad específica de 2  $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  (CONAGUA, 2003). En ese mismo año, Amozoc-Acatzingo, Tepeaca-Hueyotlipan y Atoyatempan-Primera Unidad presentaron un nivel estático promedio de 47.1 m, con base en dato de 163 pozos, y un nivel dinámico promedio de 58 m, perteneciente a 249 pozos.

Para el periodo comprendido entre 1974 y 1988, en Tecamachalco se encontró un abatimiento de

to those registered in the REPDA, not to the total number of wells that are currently in the area without registration, in process, or clandestinely operated.

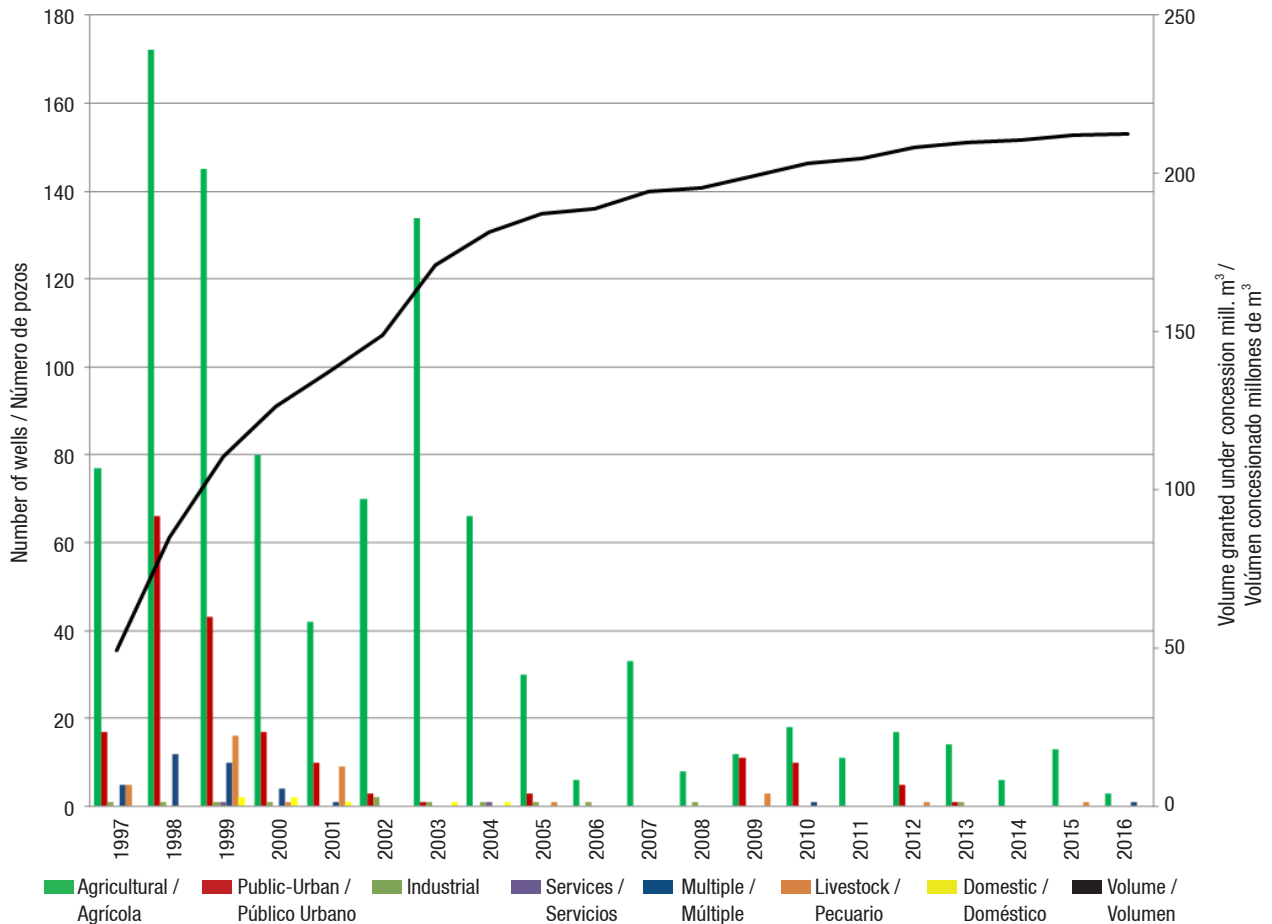
The spatial distribution of the monitoring network has enabled showing changes or trends in groundwater level fluctuations in the study area, which was divided into sub-basins to facilitate analysis. As can be seen in Figure 3, more monitoring wells were found in the Tepeaca sub-basin.

From 1997 to 2016, the depth of the static levels of the monitoring network increased, which implied a greater depletion of the wells, with an annual growth rate of 1.45 %. The sub-basin with the smallest increase in static level depth was Tlacotepec (with 0.7 %), followed by Tepeaca (with 1.3 %), Tecamachalco and Xochitlán (both with a 1.9 % rate) (Figure 4). The average depletion in that period was 14 m for the set of wells.

los niveles estáticos de -20 m (CONAGUA, 2003), similar al presentado en el Valle de Palmar de Bravo con abatimientos de -10 a -20 m (aproximadamente  $-1.2 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$ ). En Tepeaca se observaron abatimientos de -10 a -30 m, y en Acatzingo de Hidalgo se presentó una recuperación del nivel estático de 2 m. En la década de los noventa, se monitoreó el nivel del agua subterránea del AVT a través de una red de pozos, en el cual, el COTAS Tecamachalco realizó un sondeo anual. Los datos obtenidos analizan detalladamente a continuación.

#### Dinámica del nivel de agua subterránea del AVT de 1997 a 2016

El REPDA de la CONAGUA se creó en 1992 a partir de la Ley de Aguas Nacionales, y en 1994 inició el sondeo en el AVT. En ese año, se tenían registrados 14 pozos con un volumen concesionado de  $1592288 \text{ m}^3$ . Para 2016, el número de pozos incrementó a 1445, los



**Figure 2. Dynamics of the volume of groundwater in the Tecamachalco Valley aquifer under concession, and number of wells from 1997 to 2016. Data obtained from the Public Registry of Water Rights and the National Water Commission in that period.**

**Figura 2. Dinámica del volumen de agua subterránea del acuífero del Valle de Tecamachalco concesionada, y número de pozos de 1997 a 2016. Datos obtenidos del Registro Público de Derechos de Agua y la Comisión Nacional del Agua en ese periodo.**

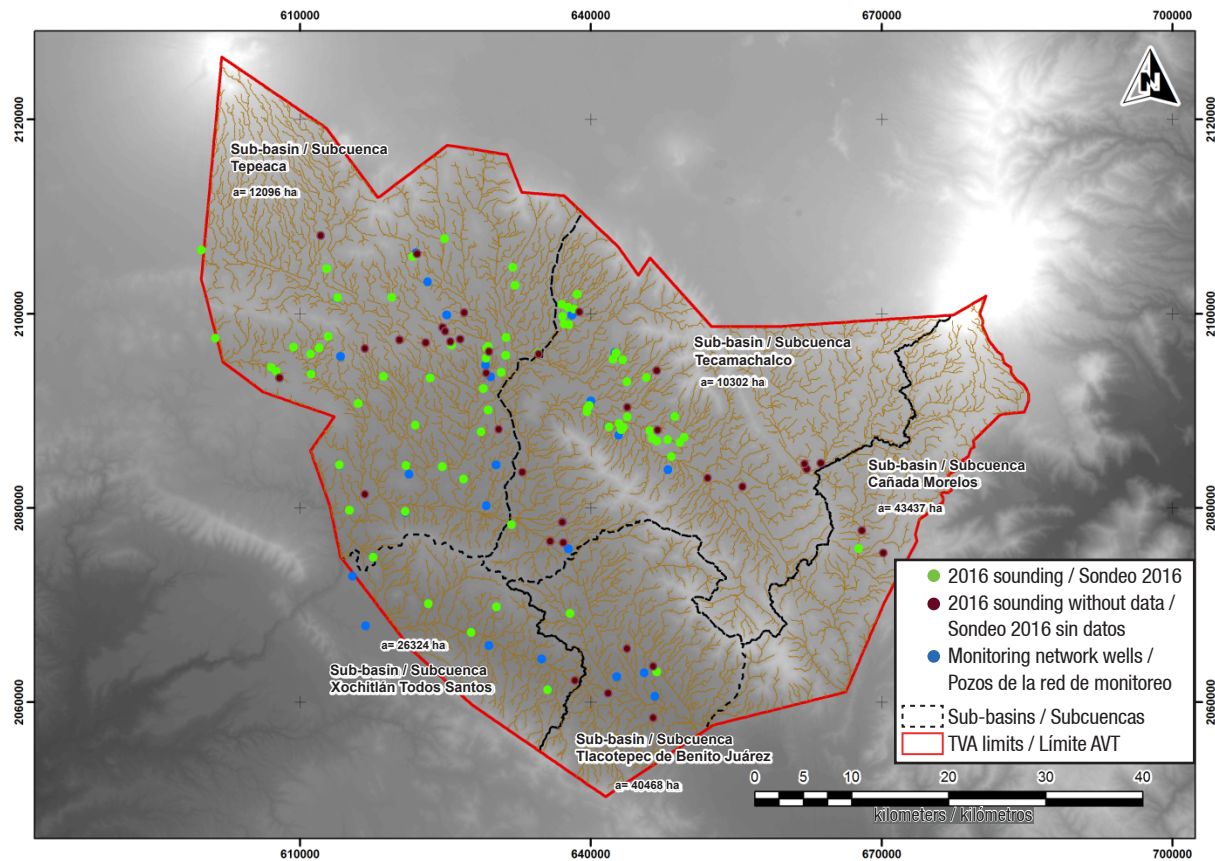


Figure 3. Spatial distribution of groundwater wells by sub-basin: includes the monitoring network and the field sounding conducted in 2016.

Figura 3. Distribución espacial de los pozos de agua subterránea por subcuenca: incluye la red de monitoreo y el sondeo realizado en campo en 2016.

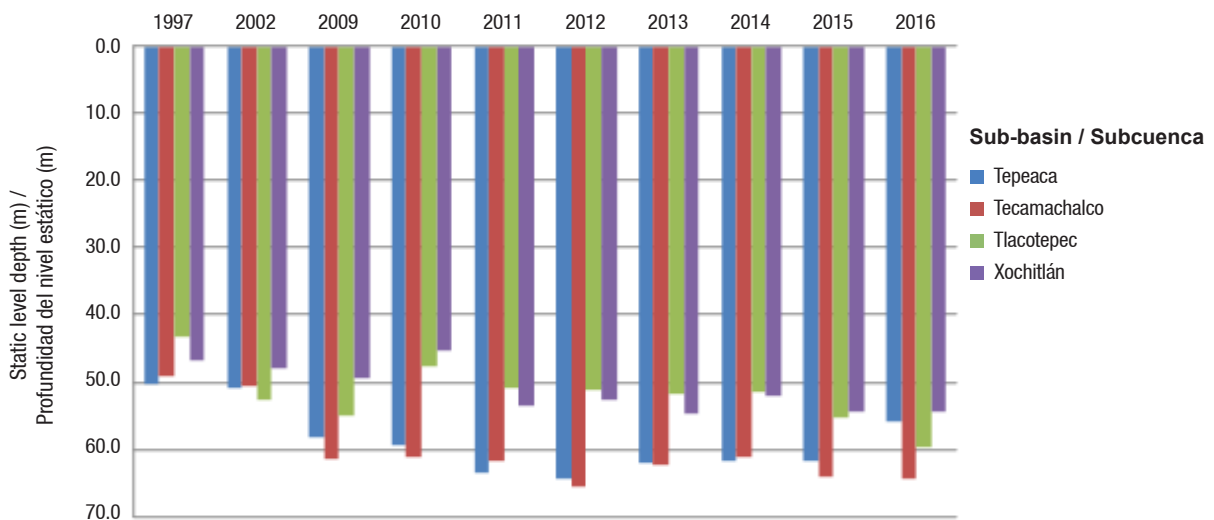


Figure 4. Average annual behavior of static groundwater levels in the Tecamachalco Valley aquifer, from 1997 to 2016. Data obtained from the monitoring network of the Tecamachalco Groundwater Technical Committee.

Figura 4. Comportamiento promedio anual de los niveles estáticos del agua subterránea del acuífero del Valle de Tecamachalco, de 1997 a 2016. Datos obtenidos de la red de monitoreo del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Tecamachalco.

The results of applying the MK test to the 71 monitored wells showed that 86 % have a decrease in the static water level, indicating an increasing groundwater depth, while 14 % of the wells have an upward trend; that is, a lower depth of the groundwater level, with a recovery trend (Tables 1 and 2).

In the digital elevation model (Figure 5), one can see the static level depths, which continue to fall due to the continuous extraction of groundwater from the wells. From 1997 to 2010, there was an average drop of 10 m, mainly in the Tepeaca sub-basin. In this period, the public-urban use wells were the ones that recorded the greatest water table depths. The deepest wells used for agricultural purposes ranged between 80 and 90 m, and the shallowest reached 20 m. On the other hand, in the period from 2010 to 2015 there was a slight recovery in the static level of approximately 5 m (Figure 5).

Figure 6 represents the digital elevation model for 2016 where one can see the area with the deepest static level, which is located in the Tecamachalco sub-basin with wells over 140 m deep in the municipalities of Palmar de Bravo and Huixcolotla. Also shown are shallow wells (13 m) in the Cañada Morelos sub-basin, where the wells are also located near what were previously filtering galleries.

Villarreal (2017) states that if the current use trend of TVA groundwater continues, a deficit of more than 300 % could be reached in the next 50 years, this

cuales eran principalmente para uso público y agrícola; este aumento se vio reflejado en el volumen de agua concesionada, que alcanzó los 212490006.5 m<sup>3</sup>; es decir, hubo un incremento de 26 % anual (Figura 2). Adicionalmente, en la Figura 2 se pueden identificar los usos consuntivos del agua de los pozos; dichos pozos corresponden únicamente a los registrados en el REPGA, no al total de pozos que se encuentran actualmente en la zona sin registro, en proceso o en forma clandestina.

La distribución espacial de la red de monitoreo ha permitido evidenciar los cambios o tendencia de las fluctuaciones del nivel de agua subterránea en la zona de estudio, la cual se dividió en subcuencas para facilitar el análisis. Como se observa en la Figura 3, se encontraron más pozos de monitoreo en la subcuenca denominada Tepeaca.

De 1997 a 2016 incrementó la profundidad de los niveles estáticos de la red de monitoreo, lo que implicó un mayor abatimiento de los pozos, con una tasa de crecimiento anual de 1.45 %. La subcuenca con menor incremento en la profundidad del nivel estático fue Tlacotepec (con 0.7 %), seguida de Tepeaca (con 1.3 %), Tecamachalco y Xochitlán (ambas con una tasa de 1.9 %) (Figura 4). El abatimiento promedio en dicho periodo fue de 14 m para el conjunto de pozos.

Los resultados de la aplicación de la prueba MK a los 71 pozos monitoreados mostró que 86 % presentan una

**Table 1. Results of the Mann-Kendall test on the annual chronological series of static groundwater levels in the Tecamachalco Valley aquifer.**

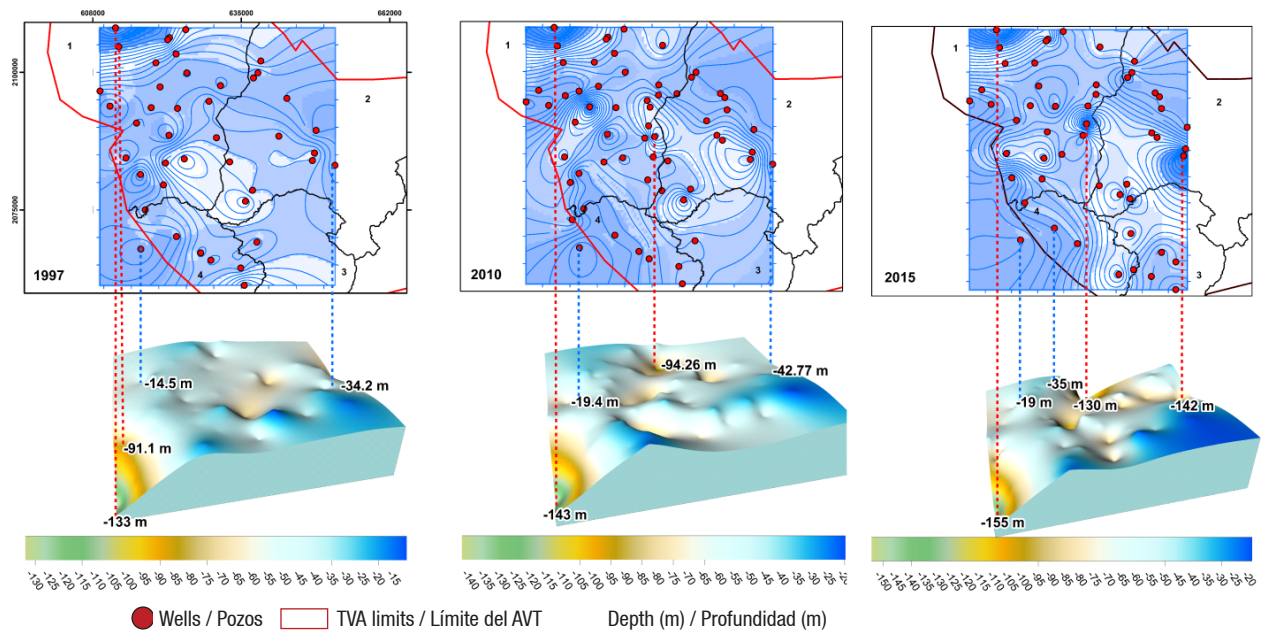
**Cuadro 1. Resultados de la prueba Mann-Kendall en las series cronológicas anuales de los niveles estáticos del agua subterránea del acuífero del Valle de Tecamachalco.**

Sub-basin/ Subcuenca	Kendall Tau/ Tau de Kendall	Mann-Kendall (S)/ Mann-Kendall (S)	Variance (S)/ Varianza (S)	p-value (unilateral)/ Valor - P (unilateral)	Alpha/ Alfa	Sen's slope/ Pendiente Sen
Tepeaca	0.5	18	92	1.0	0.1	1.3
Tecamachalco	0.6	22	92	1.0	0.1	1.3
Tlacotepec	0.4	14	92	0.9	0.1	0.8
Xochitlán	0.6	20	92	1.0	0.1	1.1

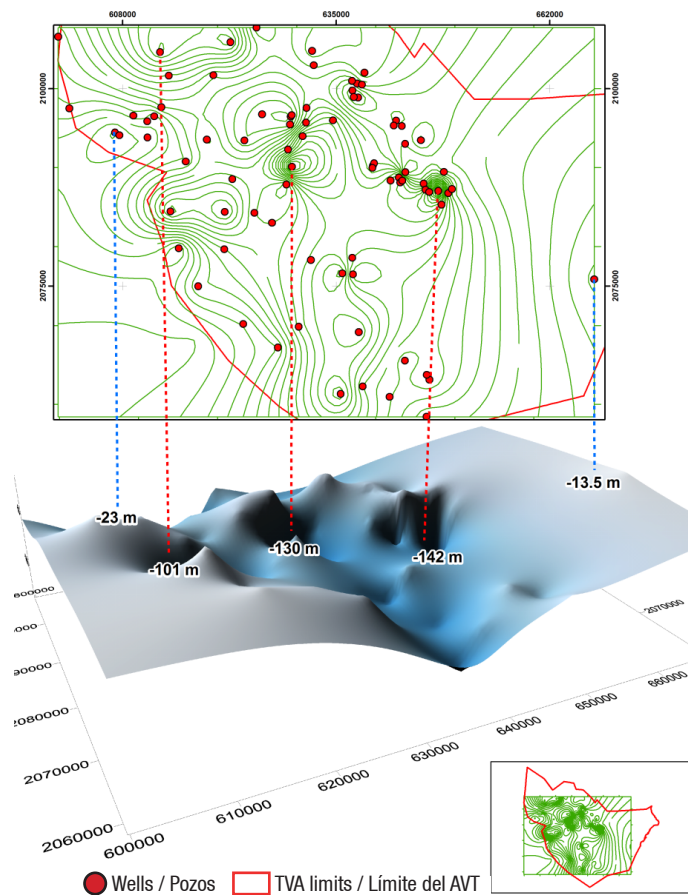
**Table 2. Well behavior by sub-basin according to the Mann-Kendall test.**

**Cuadro 2. Comportamiento de los pozos por subcuenca de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall.**

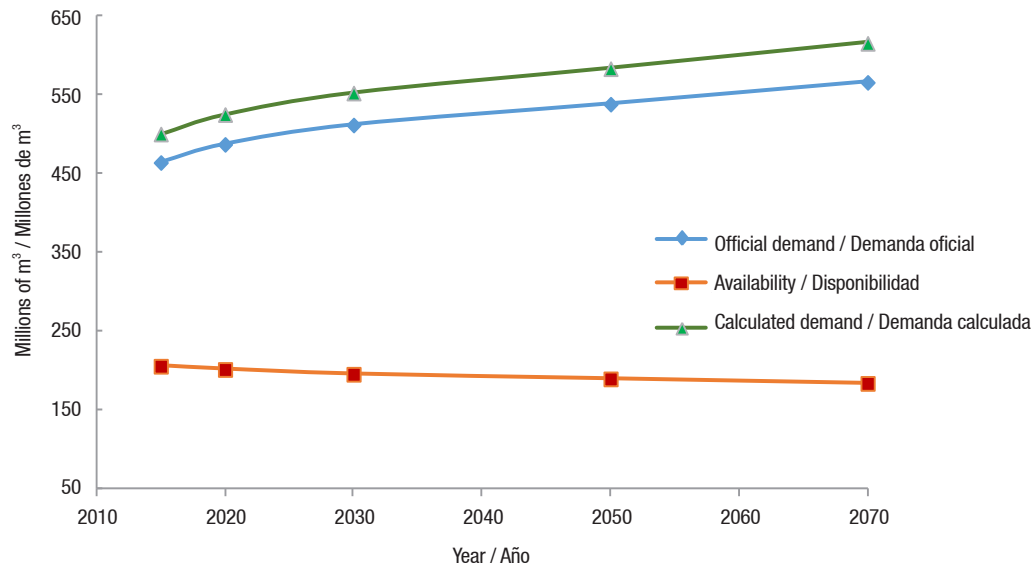
Sub-basin/ Subcuenca	No. of wells/ Número de pozos	Depletion/ Abatimiento	Percentage/ Porcentaje	Recovery/ Recuperación	Percentage/ Porcentaje
Tepeaca	37	32	45.1	5	7.0
Tecamachalco	18	16	22.5	2	2.8
Tlacotepec	8	7	9.9	1	1.4
Xochitlán	8	6	8.5	2	2.8



**Figure 5. Digital elevation maps interpolated by the Kriging method of the static groundwater levels in the Tecamachalco Valley aquifer (TVA) from 1997 to 2015.**  
**Figura 5. Mapas digitales de elevación interpolados por el método de Kriging de los niveles estáticos de aguas subterráneas del acuífero del Valle de Tecamachalco (AVT) de 1997 a 2015.**



**Figure 6. Digital elevation map interpolated by the Kriging method of static groundwater levels in the Tecamachalco Valley aquifer in 2016.**  
**Figura 6. Mapa digital de elevación interpolado por el método de Kriging de los niveles estáticos de aguas subterráneas del acuífero del Valle de Tecamachalco de 2016.**



**Figure 7. Projection of the Tecamachalco Valley aquifer's groundwater availability and demand in the 2015-2070 period.**  
Source: Villarreal (2017), with some modifications.

**Figura 7. Proyección de la disponibilidad y la demanda de agua subterránea del acuífero del Valle de Tecamachalco en el período 2015-2070.** Fuente: Villarreal (2017), con algunas modificaciones.

considering that the availability of the resource does not increase, but tends to decrease in the face of increasing demand (Figure 7).

### Discussion

According to the region's inhabitants, a few decades ago the water was a few meters deep, a situation that has changed drastically, as there are now wells that have had to be relocated due to their depletion. Similarly, they mention that rainy periods occurred more regularly in the past and that it rained more. Martínez-Austria and Patiño-Gómez (2012) point out that in the TVA various factors such as agricultural production, population growth, industrial activity, rainfall and temperature condition the availability of surface and groundwater.

As regards the dynamics of the piezometric levels of the monitoring wells, the network does not cover the entire aquifer, some of the missing data being from the Cañada Morelos sub-basin. Durazo and Farvolden (1989) indicate that it is not easy to obtain missing data on an aquifer's level, since *in situ* measurements are needed to generate models, reliable availability predictions and judicious water allocations. The only way to obtain reasonably accurate information on a basin's water table is to drill control wells, although this involves time and resources, so the most viable way to obtain this information is to use historical data and indirect observations to describe the original conditions.

In this work, the aquifer's static levels showed a tendency to increase their depth, with a difference of at least 14 m between 1997 and 2016. This situation

disminución del nivel estático del agua, lo que indica una profundidad del agua subterránea cada vez mayor, mientras que 14 % de los pozos tienen una tendencia a la alza; es decir, una menor profundidad del nivel de agua subterránea, con tendencia a su recuperación (Cuadros 1 y 2).

En el modelo de elevación digital (Figura 5) se pueden observar las profundidades de los niveles estáticos, que debido a la extracción continua de agua subterránea de los pozos, éstos siguen descendiendo. De 1997 a 2010, se observa en promedio un abatimiento de 10 m, principalmente en la subcuenca de Tepeaca. En dicho periodo, los pozos de uso público-urbano fueron los que registraron mayor profundidad de los niveles freáticos. Los pozos de uso agrícola variaron entre 80 y 90 m los más profundos, y los más someros alcanzaron los 20 m. Por su parte, en el periodo de 2010 a 2015 se observa una ligera recuperación del nivel estático de aproximadamente 5 m (Figura 5).

La Figura 6 representa el modelo digital de elevación para 2016, y se puede observar la zona de mayor profundidad del nivel estático, la cual se ubica en la subcuenca de Tecamachalco con pozos de más de 140 m de profundidad en los municipios de Palmar de Bravo y Huixcolotla. También se muestran pozos con poca profundidad (13 m) en la subcuenca de Cañada Morelos, donde además los pozos se encuentran cerca de las que anteriormente fueron galerías filtrantes.

Villarreal (2017) menciona que de seguir la tendencia actual de aprovechamiento y explotación de agua subterránea del AVT, en los próximos 50 años se

reflects the level of depletion of the aquifer in almost 20 years, which is exacerbated by the climatic conditions of the area. In this sense, low rainfall rates imply a greater dependence on groundwater, which increases the level of extraction. In addition, water demands for the various needs of the population could at some time exceed the natural recovery capacity of the aquifer, which would lead to drilling deeper wells. This situation puts the health of those who consume the groundwater at risk, since, according to Esteller, Rodríguez, Cardona, and Padilla-Sánchez (2012), there is a risk that the chemical composition of the water is different: deep brackish water or thermal water rich in trace elements. Sandoval-Montes, Ramos-Leal, and Morán-Ramírez (2016) explain that deep groundwater levels in an aquifer show greater physicochemical evolution, which forces them to be monitored continuously to avoid soil salinization due to its use in irrigating plots. Therefore, knowing the behavior of groundwater, together with regional climate dynamics, becomes a very useful tool, both for integrated water management and for the promotion of aquifer sustainability.

## Conclusions

The analysis of the temporal variations of the TVA's static levels, from 1997 to 2016, allowed us to know the behavior of the aquifer (recovery or depletion) and the activities that generate pressure on it.

Continuing to monitor the evolution of static groundwater levels is essential to identify vulnerable or critical areas. In the case of the TVA, it is important to expand the monitoring network to have more accurate estimates, which should consider its heterogeneity and the water demand of users. In the long term, constant monitoring will make it possible to identify the variability in groundwater levels and to understand the causes of variations in that level.

## Acknowledgments

The authors thank the National Council of Science and Technology (CONACYT) for the support granted to carry out this research, and the staff of the Tecamachalco Groundwater Technical Committee (COTAS) for providing us with access to information and support in monitoring groundwater wells.

*End of English version*

## References / Referencias

Coaguila-Núñez, D. N., Tangerino-Hernández, F. B., Freitas-da Silva, Y., & Gonçalves-Feitosa, D. (2013). Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial utilizando datos de evapotranspiración. *Anais XVI*

podría alcanzar un déficit de más de 300 %; lo anterior considerando que la disponibilidad del recurso no incrementa, sino que tiende a disminuir ante el aumento de la demanda (Figura 7).

## Discusión

De acuerdo con pobladores de la región, hace algunas décadas el agua se encontraba a muy pocos metros de profundidad, situación que ha cambiado drásticamente, ya que actualmente existen pozos que se han tenido que reubicar debido a su agotamiento. De igual manera, mencionan que antes los periodos de lluvias eran exactos, y llovía en más cantidad. Martínez-Austria y Patiño-Gómez (2012) señalan que en el AVT diversos factores como la producción agrícola, el crecimiento demográfico, la actividad industrial, la precipitación y la temperatura condicionan la disponibilidad de agua superficial y subterránea.

En cuanto a la dinámica de los niveles piezométricos de los pozos de monitoreo, la red no cubre todo el acuífero, algunos de los datos que faltan son de la subcuenca de cañada Morelos. Durazo y Farvolden (1989) indican que no es fácil obtener datos faltantes sobre el nivel de los acuíferos, ya que se necesitan mediciones *in situ* que permitan generar modelos, predicciones fiables de disponibilidad y asignaciones juiciosas de agua. La única manera de obtener información razonablemente precisa sobre el nivel freático en una cuenca es perforar pozos de control, aunque esto implica tiempo y recursos, por lo que la forma más viable de obtener esta información es el uso de datos históricos y observaciones indirectas que permitan describir las condiciones originales.

En este trabajo, los niveles estáticos del acuífero presentaron una tendencia a incrementar su profundidad, con una diferencia de al menos 14 m entre 1997 y 2016. Dicha situación refleja el nivel de abatimiento del acuífero en casi 20 años, la cual se agudiza dadas las condiciones climáticas de la zona. En este sentido, las bajas tasas de precipitación implican una mayor dependencia del agua subterránea, lo que aumenta el nivel de extracción. Además, las demandas de agua para las diversas necesidades de la población en algún momento podrían superar la capacidad natural de recuperación del acuífero, lo que llevaría a perforar pozos más profundos. Esta situación pone en riesgo la salud de quien consumen el agua subterránea, ya que, de acuerdo con Esteller, Rodríguez, Cardona, y Padilla-Sánchez (2012), se corre el riesgo de que la composición química del agua sea distinta: agua salobre profunda o agua termal rica en elementos traza. Sandoval-Montes, Ramos-Leal, y Morán-Ramírez (2016) explican que los niveles profundos de agua subterránea en un acuífero presentan mayor evolución fisicoquímica, lo que obliga a que sean vigilados de manera continua para evitar la

- Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Brazil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Retrieved from [www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/corrigidos/analisis\\_comparativo.pdf](http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/corrigidos/analisis_comparativo.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (1999). *Estudio de simulación hidrodinámica del acuífero de Tecamachalco, Puebla*. México: Author.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2002). *Planeación participativa para el manejo integrado del acuífero del Valle de Tecamachalco*. México: Author.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2003). *Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2101 Valle de Tecamachalco y se modifican los límites y planos de localización*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2006). *Estadísticas del agua en México*. México: Author.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013). *Estadísticas del agua en México*. México: Author. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/260111/EAM2013\\_br.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/260111/EAM2013_br.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea en el acuífero Valle de Tecamachalco (2101), estado de Puebla*. México: Diario Oficial de la Federación. México. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103299/DR\\_2101.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103299/DR_2101.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). *Estadísticas del agua en México*. México: Author.
- Comisión Nacional del Agua-Comité Técnico de Aguas Subterráneas (CONAGUA-COTAS). (2002). *Integración del plan de manejo para el acuífero de Tecamachalco, Puebla*. México: Author.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2012). *Sistema nacional de información sobre biodiversidad*. México: Author. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Contreras-Servín, C., & Galindo-Mendoza, M. G. (2008). Abasto futuro de agua potable, análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*, 17, 127-137. doi: 10.15446/rcdg.n17.10923
- Custodio, E., Andreu-Rodes, J. M., Aragón, R., Estrela, T., Ferrer, J., García-Aróstegui, J. L., Manzano, M., Rodríguez-Hernández, L., Sahuquillo, A., & del Villar, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, 559, 302-316. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.107
- Durazo, J., & Farvolden, R. N. (1989). The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *Journal of Hydrology*, 112(1-2), 171-190. doi: 10.1016/0022-1694(89)90187-X
- Elsheikh, A., Zeielabdein, K. A., & Babikir, I. A. (2009). Groundwater balance in the Khor Arbaat basin, Red Sea State, eastern Sudan. *Hydrogeology Journal*, 17(8), 2072-2082. doi: 10.1007/s10040-009-0541-0
- salinización de los suelos por su uso en el riego de las parcelas. Por lo tanto, conocer el comportamiento de las aguas subterráneas, junto con las dinámicas climáticas regionales, se convierten en una herramienta muy útil, tanto para la gestión integral del agua como para fomentar la sostenibilidad del acuífero.

## Conclusiones

El análisis de las variaciones temporales de los niveles estáticos del AVT, de 1997 a 2016, permitió conocer el comportamiento del acuífero (recuperación o abatimiento) y las actividades que generan presión sobre éste.

Continuar con el monitoreo de la evolución de los niveles estáticos del agua subterránea es esencial para identificar áreas vulnerables o críticas. En el caso del AVT es importante ampliar la red de monitoreo para contar con estimaciones más precisas, la cual debe considerar su heterogeneidad y la demanda de agua de los usuarios. A largo plazo, el monitoreo constante permitirá identificar la variabilidad de los niveles de agua subterránea y comprender las causas de las variaciones de dicho nivel.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para llevar a cabo esta investigación, y al personal del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Tecamachalco por brindarnos acceso a la información y apoyo en el monitoreo de pozos de agua subterránea.

## Fin de la versión en español

- Esteller, M., Rodríguez, R., Cardona, A., & Padilla-Sánchez, L. (2012). Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation : case studies from Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9), 5725-5741. doi: 10.1007/s10661-011-2376-0
- Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Natural Climate Change*, 4(11), 945-948. doi: 10.1038/nclimate2425
- Fishman, R. M., Siegfried, T., Raj, P., Modi, V., & Lall, U. (2011). Over-extraction from shallow bedrock versus deep alluvial aquifers: Reliability versus sustainability considerations for India's groundwater irrigation. *Water Resources Research*, 47(6), 1-15. doi: 10.1029/2011WR010617
- Foootan, E., Rietbroek, R., Kusche, J., Shari, M. A., Awange, J. L., Schmidt, M., Omondi, P., & Famiglietti, J. (2014). Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE , altimetry and hydrological data. *Remote Sensing of Environment*, 140, 580-595. doi: 10.1016/j.rse.2013.09.025



- GeoComunes. (2015). *Acuíferos disponibilidad CONAGUA*. México: Author. Retrieved from [http://132.248.14.102/layers/CapaBase:ii\\_1\\_acuíferos\\_disponibilidad\\_cna#more](http://132.248.14.102/layers/CapaBase:ii_1_acuíferos_disponibilidad_cna#more)
- Gong, H., Pan, Y., & Xu, Y. (2012). Spatio-temporal variation of groundwater recharge in response to variability in precipitation, land use and soil in Yanqing Basin, Beijing, China. *Hydrogeology Journal*, 20(7), 1331-1340. doi: 10.1007/s10040-012-0883-x
- Gorelick, S., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 51(5), 3031-3051. doi: 10.1002/2014WR016825
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3-4), 350-363. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.11.009
- Hasanuzzaman, M., Song, X., Han, D., Zhang, Y., & Hussain, S. (2017). Prediction of groundwater dynamics for sustainable water resource management in Bogra District, Northwest Bangladesh. *Water*, 9(4), 1-17. doi: 10.3390/w9040238
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009a). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Esperanza, Puebla*. México: Author. Retrieved from [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21063.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21063.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009b). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Quecholac, Puebla*. México: Author. Retrieved from [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21115.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21115.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009c). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tepeaca, Puebla*. México: Author. Retrieved from [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21164.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21164.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Censo de población y vivienda*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Kisi, O., & Ay, M. (2014). Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*, 513, 362-375. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.005
- Konikow, L. F. (2011). Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 38(17), 1-5. doi: 10.1029/2011GL048604
- Konikow, L. F. (2015). Long-term groundwater depletion in the United States. *Groundwater*, 53(1), 2-9. doi: 10.1111/gwat.12306.
- Kværner, J., & Snilsberg, P. (2013). Hydrogeological impacts of a railway tunnel in fractured Precambrian gneiss rocks (south-eastern Norway). *Hydrogeology Journal*, 21(7), 1633-1653. doi: 10.1007/s10040-013-1014-z
- Lin, H., Ke, K., Tan, Y., Wu, S., Hsu, G., Chen, P., & Fang, S. (2013). Estimating pumping rates and identifying potential recharge zones for groundwater management in multi-aquifers system. *Water Resour Manage*, 27(9), 3293-3306. doi: 10.1007/s11269-013-0347-7
- Maliva, R. G. (2016). *Aquifer characterization techniques. Schlumberger methods in water resources evaluation series no. 4*. USA: Springer Hydrogeology. doi: 10.2110/pec.04.80
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5-20. Retrieved from [www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n1/v3n1a1.pdf](http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n1/v3n1a1.pdf)
- Mi, L., Xiao, H., Zhang, J., Yin, Z., & Shen, Y. (2016). Evolution of the groundwater system under the impacts of human activities in middle reaches of Heihe River Basin (Northwest China) from 1985 to 2013. *Hydrogeology Journal*, 24(4), 971-986. doi: 10.1007/s10040-015-1346-y
- Milan, G., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172-182. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.014
- Oswald-Spring, U., & Sánchez-Cohen, I. (2011). Water resources in Mexico: A conceptual introduction. In: Oswald-Spring, U. (Ed.), *Water resources in Mexico: scarcity, degradation, stress, conflicts, management, and policy. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace Series* (pp. 524). Berlin, Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-05432-7\_1
- Peñuela-Arévalo, L. A., & Carrillo-Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía*, 81, 18-32. doi: 10.14350/rig.30518
- Sandoval-Montes, I., Ramos-Leal, J. A., & Morán-Ramírez, J. (2016). El sistema hidrológico Esperanza-Oriental y su impacto sobre el acuífero de Tecamachalco, Puebla, México. *Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 7(2), 14-25. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/rde/2016/05/09/el-sistema-hidrologico-esperanza-oriental-y-su-impacto-sobre-el-acuifero-de-tecamachalco-puebla-mexico/>
- Sang, Y., Wang, Z., & Liu, C. (2014). Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 510, 293-298. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.12.039
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). (1989). *Estudio geohidrológico en el Distrito de Desarrollo Rural no. 116*. México: Author.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican*. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from [www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018)
- Shrestha, S., Bach, T. V., & Pandey, V. P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs)

- scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61, 1-13. doi: 10.1016/j.envsci.2016.03.010
- Sishodia, R. P., Shukla, S., Graham, W. D., Wani, S. P., & Garg, K. K. (2016). Bi-decadal groundwater level trends in a semi-arid south indian region: Declines, causes and management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 43-58. doi: 10.1016/j.ejrh.2016.09.005
- Van-Loon, A., Kumar, R., & Mishra, V. (2017). Testing the use of standardised indices and GRACE satellite data to estimate the European 2015 groundwater drought in near-real time. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), 1947-1971. doi: 10.5194/hess-21-1947-2017
- Villarreal, L. A. (2017). Proyección de la disponibilidad y demanda de agua en el acuífero Valle de Tecamachalco, Puebla, en el período 2015-2070. *Quinto congreso nacional de riego y drenaje*. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación. Retrieved from comeii.com/comeii2019/
- Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1-4), 254-271. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7
- Zhang, Y., Odeh, I. O., & Han, C. (2009). Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4), 256-264. doi: 10.1016/j.jag.2009.03.001