

Water supply and water runoff quality in the sub deciduous forest of the Coast of Oaxaca, Mexico

Suministro y calidad del agua de escurrimientos en la selva mediana subcaducifolia de la Costa de Oaxaca, México

Estrella E. Blancas-Díaz¹; Ernesto Castañeda-Hidalgo¹; Celerino Robles^{2*}; Gerardo Rodríguez-Ortiz¹; Gisela M. Santiago-Martínez¹; Yuri Villegas-Aparicio¹

¹Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas, Exhacienda de Nazareno, Xoxocotlán. C. P. 71230. Oaxaca, México.

²Instituto Politécnico Nacional, CIDIIR Unidad Oaxaca. Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán. C. P. 71230. Oaxaca, México.

*Corresponding author: croblesp@ipn.mx; tel.: +52 951 517 0610.

Abstract

Introduction: Land use change and waste discharge from coffee processing may be affecting quantity and quality of water supplying urban areas in the coastal region of Oaxaca.

Objective: To determine the level of contamination of aquifers and estimate surface water runoff in micro-watersheds of Pluma Hidalgo and Santa María Huatulco in Oaxaca, Mexico.

Materials and methods: Seven water supply points were analyzed during the rainy season of 2019. The following physicochemical parameters were determined: pH, total dissolved solids, electrical conductivity, hardness, total solids, chlorides, and chemical oxygen demand (COD). Surface runoff was estimated using the Raws and Prevert methods.

Results and discussion. Water bodies are within the permissible limits for human use. The Chacalapilla spring was classified as moderately hard (85 mg CaCO₃·L⁻¹), while the seven water bodies exceeded the permissible limit for COD (40 to 200 mg·L⁻¹); therefore, water is in a contaminated classification range and is not suitable for human consumption. Surface runoff values suggest a medium conservation condition of vegetation cover; areas with higher cover recorded lower runoff coefficients.

Conclusions. The physicochemical parameters indicated that water from Pluma Hidalgo and Santa María Huatulco is suitable for human use, but not for drinking.

Keywords: contaminated water, vegetation cover; runoff; micro-watershed; physicochemical quality.

Resumen

Introducción: El cambio de uso del suelo y el vertido de residuos provenientes del beneficio del café pueden estar afectando la cantidad y la calidad del agua que abastece las zonas urbanas de la región costa de Oaxaca.

Objetivo: Determinar el grado de contaminación de cuerpos acuíferos y estimar la escorrentía superficial del agua en las microcuencas de Pluma Hidalgo y Santa María Huatulco en Oaxaca, México.

Materiales y métodos: Siete puntos de abastecimiento de agua se analizaron durante la temporada de lluvias de 2019. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos siguientes: pH, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, dureza, sólidos totales, cloruros y demanda química de oxígeno (DQO). La escorrentía superficial se estimó con los métodos Raws y Prevert.

Resultados y discusión. Las aguas se encuentran dentro de los límites permisibles para uso humano. El agua del manantial de Chacalapilla se clasificó como moderadamente dura (85 mg CaCO₃·L⁻¹), mientras que la de los siete cuerpos acuíferos excedió el límite permisible de DQO (40 a 200 mg·L⁻¹); por tanto, el agua se encuentra en un rango de clasificación contaminada y no es apta para consumo humano. Los valores de escorrentía superficial sugieren un estado medio de conservación de la cobertura vegetal; las áreas con mayor cobertura registraron coeficientes menores de escorrentía.

Conclusiones. Los parámetros fisicoquímicos indicaron que el agua proveniente de Pluma Hidalgo y Santa María Huatulco es apta para el uso humano, pero no para el consumo.

Palabras clave: agua contaminada; cobertura vegetal; escorrentía; microcuencas; calidad fisicoquímica.

Introduction

Intense extractive human activity and the excessive consumption of natural resources are a threat to the environment. Water, being a vitally important resource, merits special consideration (Audesirk, Audesirk, & Byers, 2013). According to the World Water Assessment Program (WWAP, 2019), starting in the 1980s, water use has increased 1 % each year globally. This trend is related to population growth, which has generated serious consequences due to intensive use of water for food production, which classifies it as a resource under anthropological pressure (Morales-Durán, Torre-González, García-Sánchez, & Chávez, 2018). Agriculture and livestock are the largest consumers of water with 69 % of annual withdrawals globally (WWAP, 2018).

Out of the approximately 1449.471 million cubic meters of precipitated water that Mexico receives annually, only the water that runs off into rivers and that which infiltrates into the subsoil to maintain aquifer recharge can be used (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018a). This infiltration process reduces surface runoff and, consequently, water and soil loss. In contrast, vegetation cover removal can cause degradation, which is reflected in its infiltration capacity and soil permeability (González, Álvarez-Figueroa, González, & Aguirre-Mendoza, 2016).

One of the most serious problems faced by water bodies and streams is pollution caused by industrial and municipal wastewater, caused by excessive consumption of ecosystem goods and services (Haseena et al., 2017). For the adequate use of water in Mexico, SEMARNAT and CONAGUA (2015) established 37 hydrological regions constantly monitored to know the quality of the water. Depending on the water use, different qualities are accepted; their physicochemical characteristics are evaluated with parameters selected according to specific requirements (Basílico, De Cabo, & Faggil, 2015; Ritabrata, 2018).

The Copalita river basin belongs to hydrological region number 21 Costa de Oaxaca, made up of 19 micro-watersheds with a territorial extension of 10 514 km² and a hydrological potential by normal annual precipitation of 951 mm (SEMARNAT & CONAGUA, 2018b). In the region, one of the main economic activities is shade-grown coffee production, which affects runoff water due to processing and agrochemicals used for maintenance. Wet-processed coffee causes problems due to the discharge of residues from pulp removal and from washing coffee beans in water bodies, modifying their physicochemical characteristics such as decreased pH and increased concentration of total solids and chemical oxygen

Introducción

La intensa actividad humana extractiva y el desmedido consumo de los recursos naturales son una amenaza para el ambiente. El agua, por ser un recurso de vital importancia, amerita una consideración especial (Audesirk, Audesirk, & Byers, 2013). De acuerdo con el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, 2019), a partir de la década de 1980, el uso del agua ha incrementado 1 % cada año a nivel mundial. Esta tendencia se relaciona con el crecimiento poblacional, lo que ha generado consecuencias graves debido al uso intensivo del agua para la producción de alimentos, lo que la cataloga como un recurso bajo presión antropológica (Morales-Durán, Torre-González, García-Sánchez, & Chávez, 2018). La agricultura y la ganadería son los mayores consumidores de agua con 69 % de las extracciones anuales a nivel global (WWAP, 2018).

De los aproximadamente 1449.471 millones de metros cúbicos de agua precipitada que México recibe anualmente, solo puede ser utilizada el agua que escurre hacia los ríos y la que se infiltra al subsuelo para mantener la recarga acuífera (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018a). Este proceso de infiltración reduce la escorrentía superficial y, por consiguiente, la pérdida de agua y suelo. Por el contrario, la remoción de la cobertura vegetal puede causar degradación, lo cual se ve reflejado en su capacidad de infiltración y la permeabilidad del suelo (González, Álvarez-Figueroa, González, & Aguirre-Mendoza, 2016).

Uno de los problemas más graves a los que se enfrentan los cuerpos y corrientes de agua es la contaminación por aguas residuales, industriales y municipales, propiciada por el consumo desmedido de bienes y servicios ecosistémicos (Haseena et al., 2017). Para el aprovechamiento adecuado del agua en México, la SEMARNAT y CONAGUA (2015) establecieron 37 regiones hidrológicas monitoreadas constantemente para conocer la calidad de sus aguas. Dependiendo del uso del agua se admiten calidades distintas; sus características fisicoquímicas se evalúan con parámetros seleccionados de acuerdo con los requerimientos específicos (Basílico, De Cabo, & Faggil, 2015; Ritabrata, 2018).

La cuenca del río Copalita pertenece a la región hidrológica número 21 Costa de Oaxaca, conformada por 19 microcuencas con una extensión territorial de 10 514 km² y con un potencial hidrológico por precipitación normal anual de 951 mm (SEMARNAT & CONAGUA, 2018b). En la región, una de las principales actividades económicas es la producción de café bajo sombra, la cual afecta las aguas de escurrimiento a

demand (Rattan, Parande, Nagaraju, & Ghiwari, 2015). The objective of this study was to determine the level of contamination of seven water bodies, located in coffee farms, and to estimate surface water runoff in micro-watersheds of Pluma Hidalgo and Santa María Huatulco (Oaxaca, Mexico), given the lack of information for these variables.

Materials and Methods

Study area

This study was carried out in the municipalities of Pluma Hidalgo and Santa María Huatulco on the coast of Oaxaca, micro-watersheds belonging to the Copalita river basin complex, which covers 152 945 ha (Villalobos-Hiriart, Álvarez, Hernández, Lanza-Espino, & González-Mora, 2010). In addition to coffee production, other economic activities in the region include beekeeping, firewood extraction, and aquaculture. Provision of tourism services is relevant, which is supplied by water from these micro-watersheds given the demand for enormous quantities to satisfy recreational activities (García Alvarado, Díaz Zorrilla, Castañeda Hidalgo, Lozano Trejo, & Pérez León, 2017). The study area is dominated by the sub deciduous forest in an altitudinal range of 350 to 1 200 m. The dominant tree species are guanacastle (*Enterolobium cyclocarpum* Jacq. Griseb.), red cedar (*Cedrela mexicana* L.), palo mulato (*Bursera simaruba* L.), huanchal (*Cupania dentata* L.) and palo de mujer (*Alchornea latifolia* Sw.) (Pennington & Sarukhán, 2005; Rzedowski, 2006). Because these species are considered fine woods, the extraction of these species is already notorious in some abandoned farms, and coffee growers tend to clear the land, leaving one or two species to shade the coffee. During the period of 2000-2011, there was a change in the vegetation cover of the region's forests, which were converted into areas for human use (Leija-Loredo, Reyes-Hernández, Reyes-Pérez, Flores-Flores, & Sahagún-Sánchez, 2016).

Site sampling and selection

Water samples were collected from seven water bodies belonging to five coffee farms: El Brasil, Vista Hermosa and Chacalapilla in the municipality of Pluma Hidalgo (15° 55' 16" a 15° 53' 38" N, and 96° 26' 51" a 96° 28' 33" W, 350 to 744 m); and El Nueve and Miramar in the municipality of Santa María Huatulco (15° 55' 54" to 15° 54' 28" N, and 96° 17' 8" to 96° 15' 52" W, 642 to 1 275 m) (Figure 1).

Samples were collected in September and November 2019. Plastic containers of 600 mL were used for this purpose, following the indications of NOM-230-SSA1-2002 (Secretaría de Salud, 2002) for collection

causa del beneficiado y los agroquímicos utilizados para su mantenimiento. El café procesado en húmedo ocasiona problemas debido al vertido de los residuos de la eliminación de la pulpa y del lavado de los granos de café a los cuerpos de agua, modificando sus características fisicoquímicas como disminución del pH y aumento de la concentración de sólidos totales y demanda química de oxígeno (Rattan, Parande, Nagaraju, & Ghiwari, 2015). El objetivo del presente trabajo fue determinar el grado de contaminación de siete cuerpos acuíferos, ubicados en fincas cafetaleras, y estimar la escorrentía superficial del agua en las microcuencas de Pluma Hidalgo y Santa María Huatulco (Oaxaca, México), ante la carencia de información para estas variables.

Materiales y métodos

Área de estudio

Este trabajo se desarrolló en los municipios de Pluma Hidalgo y Santa María Huatulco en la Costa de Oaxaca, microcuencas pertenecientes al complejo de la cuenca del río Copalita, la cual abarca 152 945 ha (Villalobos-Hiriart, Álvarez, Hernández, Lanza-Espino, & González-Mora, 2010). Además de la producción de café, otras actividades económicas en la región son la apicultura, extracción de leña y acuicultura. De gran relevancia es la prestación de servicios turísticos, que se abastece del agua de estas microcuencas ante la demanda de cantidades enormes para satisfacer las actividades recreativas (García Alvarado, Díaz Zorrilla, Castañeda Hidalgo, Lozano Trejo, & Pérez León, 2017). En el área de estudio predomina la selva mediana subcaducifolia en un rango altitudinal de 350 a 1 200 m. Las especies arbóreas dominantes son guanacastle (*Enterolobium cyclocarpum* Jacq. Griseb.), cedro rojo (*Cedrela mexicana* L.), palo mulato (*Bursera simaruba* L.), huanchal (*Cupania dentata* L.) y palo de mujer (*Alchornea latifolia* Sw.) (Pennington & Sarukhán, 2005; Rzedowski, 2006). Por ser consideradas maderas finas, el saqueo de estas especies ya es notorio en algunas fincas abandonadas, además de que los cafeticultores suelen aclarar el terreno dejando una o dos especies para la sombra del café. En el periodo 2000-2011 se registró un cambio en la cobertura vegetal de las selvas de la región, para convertirse en áreas de uso humano (Leija-Loredo, Reyes-Hernández, Reyes-Pérez, Flores-Flores, & Sahagún-Sánchez, 2016).

Selección y muestreo de sitios

Las muestras de agua se recolectaron de siete cuerpos acuíferos pertenecientes a cinco fincas cafetaleras: El Brasil, Vista Hermosa y Chacalapilla en el municipio de Pluma Hidalgo (15° 55' 16" a 15° 53' 38" LN, y 96° 26' 51" a 96° 28' 33" LO, 350 a 744 m); y El Nueve y

and transfer. Three samples were collected from seven supply sites: the Chacalapilla river and spring, the Vista Hermosa dam and catchment tank, El Nueve natural pond, Juquilita from El Brasil micro-watershed, and Miramar waterfall.

Physicochemical parameters

Water analyses were performed at the Soil Laboratory of CIIDIR Oaxaca. The following parameters were measured: pH, total dissolved solids (TDS, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and electrical conductivity (EC, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) measured with a potentiometer (Hanna Hi98130); total hardness (CaCO_3 , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) EDTA titration according to NMX-AA-072-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001), chlorides (Cl , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) by Mohr's method according to NMX-AA-073-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001), total solids (TS, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) using the gravimetry method following NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015) and chemical oxygen demand (COD, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) using the open reflux method with titration, according to NMX-AA-030-1-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012). Data were analyzed using a nonparametric linear model, using sample origin as the classificatory variable; an ANOVA was carried out using the Kruskal-Wallis test and separation of means using the Duncan's multiple range test ($P \leq 0.05$). Hierarchical clustering

Miramar en el municipio de Santa María Huatulco ($15^\circ 55' 54''$ a $15^\circ 54' 28''$ LN, y $96^\circ 17' 8''$ a $96^\circ 15' 52''$ LO, 642 a 1 275 m) (Figura 1).

Las muestras se recolectaron en septiembre y noviembre de 2019. Se utilizaron para ello recipientes plásticos de 600 mL, siguiendo las indicaciones de la NOM-230-SSA1-2002 (Secretaría de Salud, 2002) para la recolección y traslado. Se recolectaron tres muestras de siete sitios de abastecimiento: el río y el manantial de Chacalapilla, la represa y el tanque de captación de Vista Hermosa, estanque natural de El Nueve, microcuenca Juquilita de El Brasil y cascada de Miramar.

Parámetros fisicoquímicos

Los análisis de agua se realizaron en el Laboratorio de Suelos del CIIDIR Oaxaca. Se midieron los parámetros siguientes: pH, sólidos disueltos totales (SDT, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) medidos con un potenciómetro (Hanna Hi98130); la dureza total (CaCO_3 , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) mediante titulación con EDTA según la NMX-AA-072-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001), los cloruros (Cl , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) por el método de Mohr de acuerdo con la NMX-AA-073-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001), los sólidos totales (ST, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) con el método de gravimetría siguiendo la NMX-AA-034-SCFI-2015

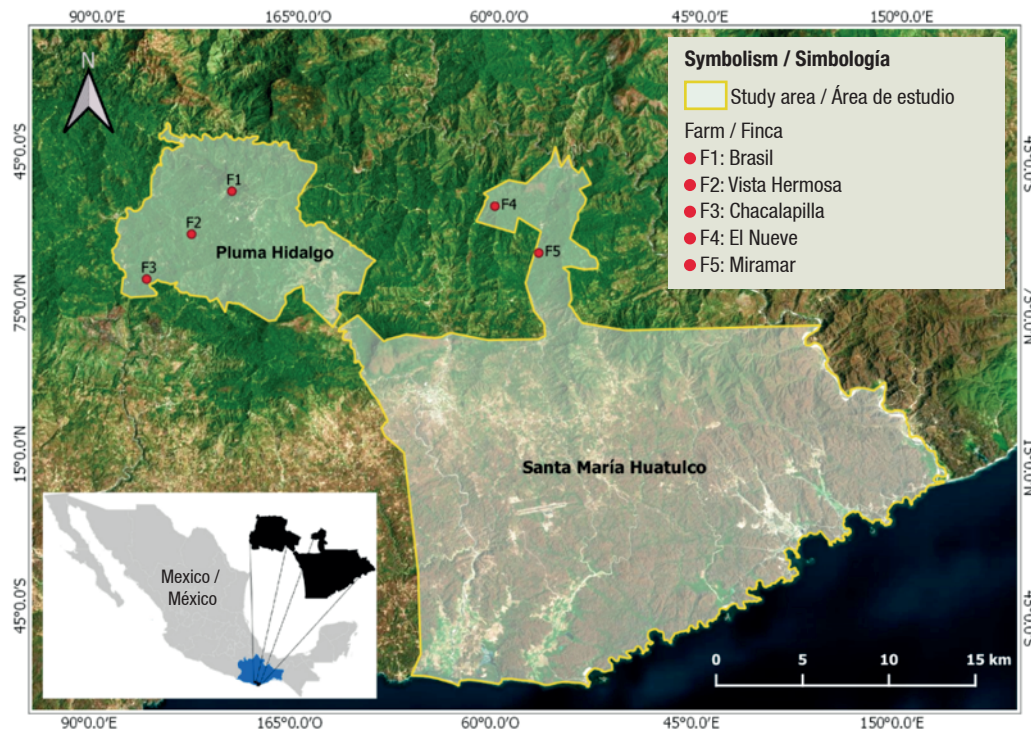


Figure 1. Location of sampled sites in the municipalities of Pluma Hidalgo and Santa María Huatulco in the coast of Oaxaca, Mexico.

Figura 1. Localización de los sitios muestreados en los municipios de Pluma Hidalgo y Santa María Huatulco en la región Costa de Oaxaca, México.

analysis was carried out with the minimum distance or maximum similarity strategy (Andritsos, 2002), using the simple average values of the physicochemical variables of the water and general conditions of sites. The analyses were performed with the SAS 9.4 program (SAS Institute, 2015).

Estimation of runoff coefficients

Tables with mean values of runoff coefficients of Raws and Prevert (Galindo-Castillo et al., 2010) were used, which were generated by empirical equations that include land use, slope and soil texture as elements for the calculation. Maps were developed with the QGIS 3.8 program (QGIS Development Team, 2019); land use and vegetation were taken from the vector layers of the Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016) and the Mexican Elevation Continuum (CEM ver. 3.0) that represents elevations of the Mexican continental territory. The vector layer of municipalities of Oaxaca, geostatistical framework (INEGI, 2019) was also used. These calculations were performed at the Geographic Information and Remote Sensing Laboratory of CIIDIR Oaxaca.

Results

According to Table 1, the ANOVA indicates highly significant differences ($P \leq 0.01$) in the parameters pH, TDS, EC, TH and Cl between supply sites. Table 2 contains the results of the physicochemical parameters evaluated in the water bodies. The pH of the water analyzed averaged 7.8, a value classified as alkaline. The natural pond of El Nueve farm had the lowest pH (6.0), classified as slightly acidic water, while the water of the Chacalapilla River had the highest value (8.4), classified as alkaline water. TDS were higher for the Chacalapilla spring water, just like the EC value. The lowest values of both parameters were recorded in the water from the Vista Hermosa catchment tank. The overall average of CaCO_3 in water bodies analyzed was $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which qualifies them as water without hardness. According to Romero-Rojas (2000) classification, water bodies with 75 to $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ are considered moderately hard; only the water from the spring had such a qualification. The catchment tank had the highest Cl- content, while the river water had the lowest concentration. TS content recorded a significant difference between water sources ($P < 0.05$); values of parameter ranged from $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Vista Hermosa tank) to $173 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Miramar waterfall). Of the parameters analyzed, COD resulted with values classified as undesirable, since according to the ranges (40 to $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) established by SEMARNAT (2015), all water bodies fell in the contaminated water category. Water from El Nueve natural pond had the highest value, while the Brasil micro-watershed had the lowest value (Table 2).

(Secretaría de Economía, 2015) y la demanda química de oxígeno (DQO , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) por el método de reflujos abierto con titulación, conforme a la NMX-AA-030-1-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012). Los datos se analizaron mediante un modelo lineal no paramétrico, utilizando el origen de la muestra como variable clasificatoria; se realizó análisis de varianza mediante la prueba de Kruskal-Wallis y separación de medias con la prueba de rango múltiple de Duncan ($P \leq 0.05$). Se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico con la estrategia de la distancia mínima o similitud máxima (Andritsos, 2002), usando los valores promedio simples de las variables fisicoquímicas del agua y condiciones generales de los sitios. Los análisis se realizaron con el programa SAS 9.4 (SAS Institute, 2015).

Cálculo del coeficiente de escurrimiento

Se utilizaron tablas con valores medios del coeficiente de escurrimiento de Raws y Prevert (Galindo-Castillo et al., 2010), generadas a través de ecuaciones empíricas que utilizan el uso de suelo, la pendiente y la textura del suelo como elementos para el cálculo. Los mapas se elaboraron con el programa QGIS 3.8 (QGIS Development Team, 2019); el de uso de suelo y vegetación se obtuvo de las capas vectoriales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016) y el continuo de elevaciones mexicano (CEM versión 3.0) que representa las elevaciones del territorio continental mexicano. De igual modo se utilizó la capa vectorial de municipios de Oaxaca del marco geoestadístico del INEGI (2019). Estos cálculos se realizaron en el Laboratorio de Información Geográfica y Percepción Remota del CIIDIR Oaxaca.

Resultados

De acuerdo con el Cuadro 1, el análisis de varianza indica diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en los parámetros pH, SDT, CE, DT y Cl entre sitios de abastecimiento. El Cuadro 2 contiene los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en los cuerpos acuíferos. El pH de las aguas analizadas se encuentra con un promedio de 7.8, valor clasificado como alcalino. El estanque natural de la finca El Nueve presentó el pH más bajo (6.0), clasificándose como agua ligeramente ácida, en tanto que el agua del río Chacalapilla tuvo el valor más alto (8.4), clasificándose como agua alcalina. Los SDT fueron mayores en el agua del manantial de Chacalapilla, al igual que el valor de CE. Los valores más bajos de ambos parámetros se registraron en el agua del tanque de captación de Vista Hermosa. El promedio general de CaCO_3 en las aguas analizadas fue de $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; el cual las califica como agua sin dureza. De acuerdo con la clasificación de Romero-Rojas (2000), las aguas con 75 a $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ son consideradas moderadamente duras; solamente el agua proveniente del manantial

Table 1. Overview of ANOVA of parameters evaluated in water samples from seven water bodies located in coffee farms in the Copalita river basin in the coast of Oaxaca, Mexico.**Cuadro 1. Resumen del análisis de varianza de los parámetros evaluados en las muestras de agua de siete cuerpos acuíferos ubicados en fincas cafetaleras de la cuenca del río Copalita en la región Costa de Oaxaca, México.**

Parameter / Parámetro	Mean squares and significance / Cuadrados medios y significancia		
	Sites / Sitios	Error	CV (%)
pH	112.44**	6.20	22.6
Total dissolved solids / Sólidos disueltos totales	125.11**	0.63	7.2
Electrical conductivity / Conductividad eléctrica	119.66**	3.10	16.0
Total hardness (CaCO ₃) / Dureza total (CaCO ₃)	115.55**	5.19	20.7
Total solids / Sólidos totales	52.11 ^{ns}	28.98	48.9
Chlorides / Cloruros	98.16**	12.42	32.0
Chemical oxygen demand / Demanda química de oxígeno	78.94*	18.77	39.3

Kruskal-Wallis test ($\alpha = 0.05$). ns = non-significant values ($P > 0.05$); ** values with highly significant effects ($P \leq 0.01$).

Prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$). ns = valores no significativos ($P > 0.05$); *valores con efectos significativos ($P \leq 0.05$); **valores con efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$).

Table 2. Parameters measured in water bodies located in coffee farms in the Copalita river basin in the coast of Oaxaca, Mexico.**Cuadro 2. Parámetros analizados en cuerpos de agua ubicados en fincas cafetaleras de la cuenca del río Copalita en la región Costa de Oaxaca, México.**

Parameter / Parámetro	El Brasil	Chacalapilla		Vista Hermosa		El Nueve	Miramar
	Micro-watershed / Microcuenca	River / Río	Spring / Manantial	Dam / Represa	Tank / Tanque	Natural pond / Estanque natural	Waterfall / Cascada
pH	8.3 ± 0.2 a	8.4 ± 0 a	8.1 ± 0 a	8.2 ± 0.2 a	7.3 ± 0 c	6.0 ± 0 d	7.7 ± 0 b
TDS (mg·L ⁻¹) / SDT (mg·L ⁻¹)	73.6 ± 1.6 c	71.0 ± 0.5 d	119.0 ± 0 a	65.3 ± 0.6 e	49.0 ± 0 g	54.0 ± 0 f	103.0 ± 0 b
EC (μS·cm ⁻¹) / CE (μS·cm ⁻¹)	178.3 ± 9.6 b	142.0 ± 6.3 c	232.0 ± 0 a	142.3 ± 10.0 c	96.0 ± 0 e	121.0 ± 0 d	170.0 ± 0 b
TH (mg CaCO ₃ ·L ⁻¹) / DT (mg CaCO ₃ ·L ⁻¹)	46.6 ± 0.6 c	36.6 ± 1.7 d	85.0 ± 2.4 a	36.0 ± 1.1 c	34.6 ± 5.6 d	23.0 ± 0.6 e	73.3 ± 0.6 b
TS (mg·L ⁻¹) / ST (mg·L ⁻¹)	140.0 ± 20 ab	120.0 ± 0 b	133.0 ± 17 ab	120.0 ± 11.0 b	100.0 ± 23.0 b	126.6 ± 6.6 ab	173.3 ± 6.6 a
Cl ⁻ (mg·L ⁻¹)	28.2 ± 10.9 b	8.2 ± 1.6 c	28.1 ± 1.6 b	38.0 ± 1.6 b	55.4 ± 2.1 a	33.0 ± 5.9 b	21.5 ± 3.3 bc
COD (mg·L ⁻¹) / DQO (mg·L ⁻¹)	53.3 ± 13.0 c	86.7 ± 25.0 bc	66.7 ± 11.5 c	86.7 ± 5.7 bc	146.0 ± 23.0 ab	173.0 ± 13.0 a	93.3 ± 26.0 bc
CR / CoEsR	0.726	0.213	0.218	0.226	0.218	0.255	0.215
CP / CoEsP	0.535	0.306	0.316	0.277	0.262	0.324	0.258

TDS = Total dissolved solids, EC = Electrical conductivity, TH = Total hardness, TS = Total solids, Cl⁻ = chlorides, COD = Chemical oxygen demand, C = Raws (R) and Prevert (P) runoff coefficient. Mean values (± standard deviation) with the same letter show no significant statistical differences between water bodies (Duncan, $P = 0.05$).

SDT = sólidos disueltos totales, CE = conductividad eléctrica, DT = dureza total, ST = sólidos totales, Cl⁻ = cloruros, DQO = demanda química de oxígeno, CoEs = coeficiente de escorrentía Raws (R) y Prevert (P). Valores medios (± desviación estándar) con la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas entre cuerpos de agua (Duncan, $P = 0.05$).

Classification of aquifers studied

Figure 2 shows clustering of aquifer bodies studied, using all physicochemical parameters. Analysis shows formation of two groups at a distance of ±130; formation of three groups with one, four and two

obtuvo tal calificativo. El tanque de captación tuvo el mayor contenido de Cl⁻, mientras que el agua del río registró la menor concentración. En el contenido de ST se registró diferencia significativa entre fuentes de agua ($P < 0.05$); los valores del parámetro fluctuaron de 100 mg·L⁻¹ (tanque de Vista Hermosa) a 173 mg·L⁻¹ (cascada

aquifer bodies, respectively, is defined at a distance of ± 100 . The Chacalapilla spring is the only water source with subway origin, which is why its physicochemical characteristics differ from the rest, which are formed by surface water runoff. The two remaining groups of springs do not have a close geographic association; they are grouped based on the value of their physicochemical characteristics.

Runoff coefficient

Runoff coefficient calculation by the Raws method shows that areas with higher vegetation have less runoff. Areas covered by vegetation, at the points where most of the sampling was carried out, have the lowest values of runoff coefficient, which means that the greater volume of rainwater that runs off through a watershed filters through the soil to supply groundwater recharge; while higher areas report a high runoff coefficient due to reduction of vegetation cover (Table 2; Figure 3).

Results are similar using runoff coefficient calculation by the Prevert method, which includes soil type,

Miramar). De los parámetros analizados, la DQO resultó con valores clasificados como no deseables, ya que de acuerdo con los rangos (40 a $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) establecidos por la SEMARNAT (2015), todas las aguas se encuentran en la categoría de aguas contaminadas. El agua del estanque natural de El Nueve tuvo el valor más alto, en tanto que la microcuenca de Brasil tuvo el más bajo (Cuadro 2).

Clasificación de los cuerpos acuíferos muestreados

La Figura 2 ilustra el agrupamiento de los cuerpos acuíferos muestreados, utilizando todos los parámetros fisicoquímicos. El análisis muestra la formación de dos grupos a una distancia de ± 130 ; a una distancia de ± 100 se define la formación de tres grupos con uno, cuatro y dos cuerpos acuíferos, respectivamente. El manantial de Chacalapilla es la única fuente de agua con proveniencia subterránea, razón por la cual sus características fisicoquímicas difieren del resto que son formadas por escorrentía de agua superficial. En las fuentes de los dos grupos restantes no hay una asociación geográfica cercana, se agrupan con base en el valor de sus características fisicoquímicas.

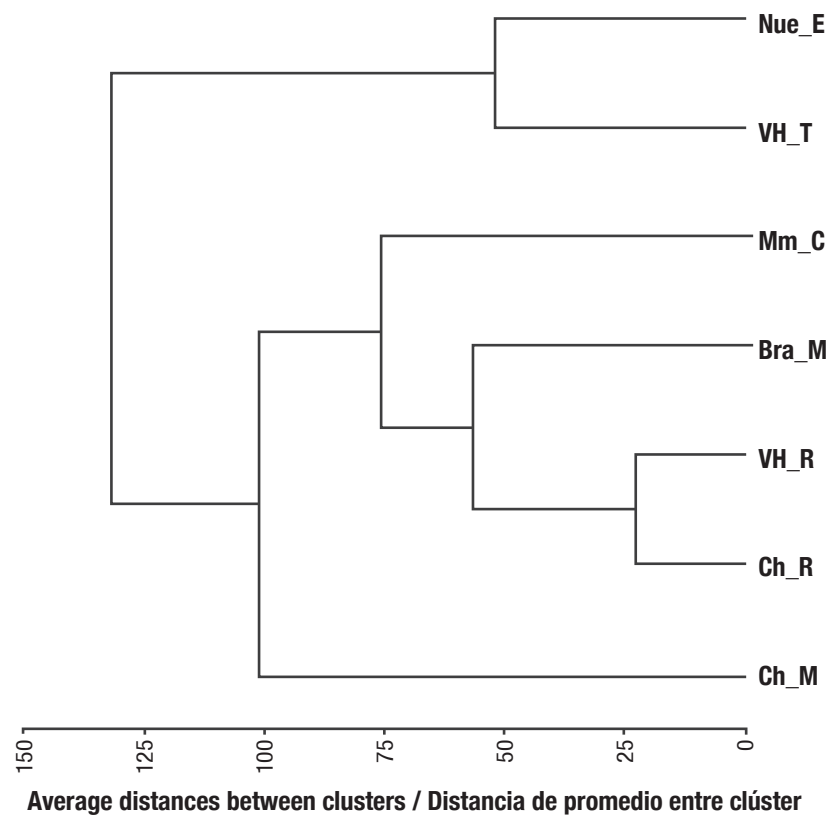


Figure 2. Clustering of seven water supply sources according to their physicochemical characteristics in the coast of Oaxaca, Mexico. Nue_E = El Nueve pond; VH_T and VH_R = Vista Hermosa tank and dam; Mm_C = Miramar waterfall; Bra_Mi = Brasil micro-watershed; Ch_R and Ch_M = Chacalapilla river and spring.

Figura 2. Agrupamiento de siete fuentes de suministro de agua de acuerdo con sus características fisicoquímicas en la región Costa de Oaxaca, México. Nue_E = estanque El Nueve; VH_T y VH_R = Vista Hermosa tanque y represa; Mm_C = Miramar cascada; Bra_Mi = Brasil microcuenca; Ch_R y Ch_M = Chacalapilla río y manantial.

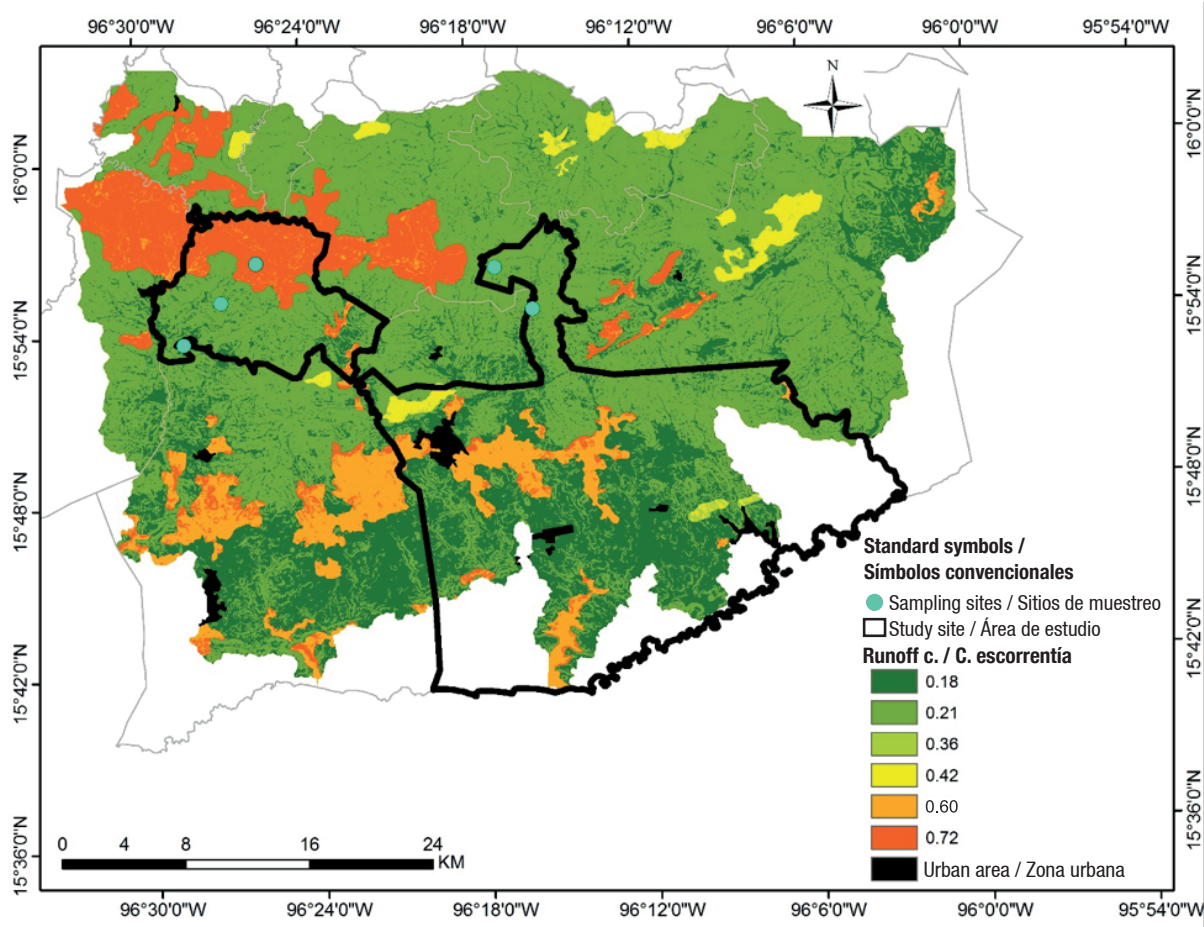


Figure 3. Runoff coefficient (Raws tables) of the Copalita river basin in the coast of Oaxaca, Mexico.

Figura 3. Coeficiente de escorrentía (tablas de Raws) de la cuenca del río Copalita en la región Costa de Oaxaca, México.

as opposed to the Raws method that only includes slope and vegetation cover. The lowest values of the coefficient were recorded in areas with abundant vegetation, and the highest in places where soil has been left bare (Table 2; Figure 4).

Discussion

pH results (7.8 on average) are similar to those reported by Aly, Al-Omran, and Alharby (2014) in groundwater in an interval between 6.8 and 7.6. Also similar to those recorded by Sánchez, Álvarez, Pacheco, Carrillo, and González (2016), who indicated that water was moderately alkaline (6.7 to 8.2) in Quintana Roo aquifers. Bhat, Parveen, and Hassan (2018) determined pH from 7.03 to 7.71 for the Yamuna River in India. These authors indicated that high pH values may be due to the abundant presence of bicarbonates and calcium and magnesium carbonates from wastewater, mainly from urban runoff and industrial effluents.

TDS contents ($<120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) found in this study were lower than those reported by Gue, Mayer, and

Coefficiente de escorrentía

El cálculo del coeficiente de escorrentía por el método de Raws muestra que en zonas de mayor vegetación existe menor escorrentía. Las zonas cubiertas por la vegetación, en los puntos donde se realizó la mayoría de los muestreos, tienen los valores menores del coeficiente de escorrentía, lo cual implica que el mayor volumen de agua de lluvia que escurre a través de una cuenca se infiltra por el suelo para abastecer las recargas de agua subterráneas; mientras que en las zonas más altas se registra un valor alto del coeficiente de escorrentía debido a la reducción de la cobertura vegetal (Cuadro 2; Figura 3).

Los resultados son similares utilizando el cálculo del coeficiente de escorrentía por el método de Prevert, el cual incluye el tipo de suelo, a diferencia del método de Raws que solo toma en cuenta la pendiente y la cobertura vegetal. Los valores más bajos del coeficiente se registraron en zonas con vegetación abundante, y los más altos, en los lugares donde el suelo ha quedado descubierto (Cuadro 2; Figura 4).

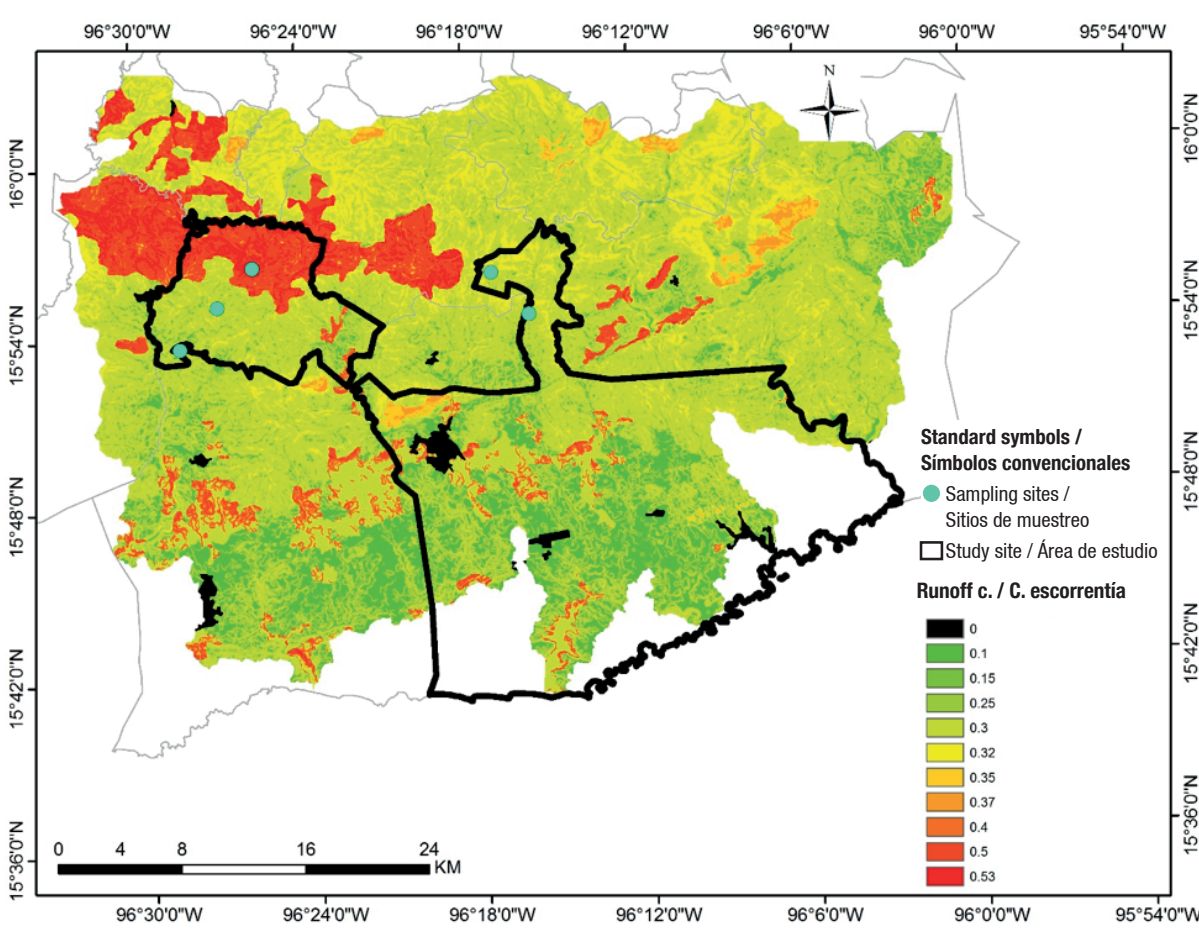


Figure 4. Runoff coefficient (Prevert tables) of the Copalita river basin in the coast of Oaxaca, Mexico.

Figura 4. Coeficiente de esorrentía (tablas de Prevert) de la cuenca del río Copalita en la región Costa de Oaxaca, México.

Grasby (2015), who determined values from 7210 to 51 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in spring waters from Athabasca, Alberta, Canada. Olorode, Bamigbola, and Ogba (2015) found TDS ranging from 91 to 7 931 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in five rivers in the Niger Delta region of Nigeria for their dry season, while for the rainy season they reported 80 to 7 920 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Regarding EC, Solís-Castro, Zúñiga-Zúñiga, and Mora-Alvarado (2018) report 50 to 549 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for well water and 25 to 499 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for spring water; while Mayorga and Mayorga (2015) reported values of 50 to 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for river water and reservoir tanks from the Santa Rosa and La Hechicera sector in Mérida, Venezuela, values similar to those recorded in water bodies of this study. The latter authors take permissible ranges (50 to 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) from Standard Methods, considering these water bodies suitable for use and consumption. Rubio-Arias, Contreras-Caraveo, Quintana, Saucedo-Teran, and Pinales-Munguia (2012) describe that high EC levels do not mean that water represents a health problem, it is only indicative of the concentration of dissolved ions.

Discusión

Los resultados de pH (7.8 en promedio) son comparables a los reportados por Aly, Al-Omran, y Alharby (2014) en agua subterránea en un intervalo entre 6.8 y 7.6. También son similares a los registrados por Sánchez, Álvarez, Pacheco, Carrillo, y González (2016), quienes indicaron que el agua fue moderadamente alcalina (6.7 a 8.2) en los acuíferos de Quintana Roo. Bhat, Parveen, y Hassan (2018) determinaron pH de 7.03 a 7.71 para el río Yamuna, India. Estos autores indicaron que los valores altos de pH pueden deberse a la presencia abundante de bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio de las aguas residuales, procedentes principalmente de esorrentía urbana y efluentes industriales.

En este trabajo, los contenidos de SDT ($<120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) fueron menores que los reportados por Gue, Mayer, y Grasby (2015), quienes determinaron valores de 7210 a 51 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en las aguas de manantial de Athabasca, Alberta, Canadá. Por su parte, Olorode, Bamigbola,

Hardness values were similar to those found by Pérez-López (2016), who reported results between 40 to 121 mg·L⁻¹ of CaCO₃ in drinking water samples from Poás and San Ramón, Costa Rica. Brousett-Minaya, Chambi-Rodríguez, Mollocondo-Turpo, Aguilar-Atamari, and Lujano-Laura (2018) reports hardness results from 92 to 135 mg·L⁻¹ CaCO₃ in surface water and maximum values of 135.42 mg·L⁻¹ CaCO₃ for spring. This value is higher than that recorded in the Chacalapilla spring, where the highest value (85.0 mg·L⁻¹ CaCO₃) was found with respect to the water bodies evaluated. Such values may be because the water in these bodies contains rocks rich in carbonates and other minerals that upon detachment are incorporated into the water (Almazán-Juárez et al., 2016).

Alcivar-Bueno et al. (2017) studied water wells in the Guayas Province of Ecuador and found 1 000.25 mg·L⁻¹ total solids. The authors classified water as normal, according to the limit (1 000 mg·L⁻¹) established by the Environmental Quality and Effluent Discharge Standard of that country (Presidency of the Republic, 2001). In the present study, the values did not exceed 200 mg·L⁻¹, so water is considered of good quality. Rubio-Arias et al. (2014) assessed water samples from La Boquilla Dam, Chihuahua, by the titration method with AgNO₃, and found a mean Cl⁻ concentration of 6.35 mg·L⁻¹ with the highest level in December (10.37 mg·L⁻¹). Bharti, Giri, and Kumar (2017) analyzed water samples using the Mohr's method and reported Cl⁻ concentrations of 26.9 to 29.9 mg·L⁻¹ for the river and 15.8 to 16.9 for the spring. These authors describe that the increase in Cl⁻ content may indicate possible contamination by human sewage, manure, industrial wastes, or simply naturally by the effect of dragging caused by precipitation.

Rosabal-Carbonell, Chang-Huerta, Pérez-Aballe, and Morales-León (2012) analyzed clean and wastewater samples in the Granma, Cuba, and reported DOC values ranging from 21.26 mg·L⁻¹ for the Arroyan River to 22.72 mg·L⁻¹ for the Paso Malo reservoir, concentrations lower than those found in the present study. Dimas, Garza, and Treviño (2015) evaluated the water quality of the Aguas Blancas riverbed, Acapulco, Guerrero, following the methodology used in this study, and determined average DOC values of 7 to 28 mg·L⁻¹ and 14 to 26 mg·L⁻¹, for dry and rainy seasons, respectively.

Furthermore, Flores, Del Ángel, Frías, and Gómez (2018) indicate average values of 105 to 155 mg·L⁻¹ of DOC in Laguna de las Ilusiones, Villahermosa, Tabasco, using the closed reflux method, and classify water as contaminated according to Mexican standards. DOC values in the present study (53.3 to 173.0 mg·L⁻¹) could be related to municipal drains, runoff of agrochemicals used for fertilization and control of plant pests and diseases in coffee plantations, incorporation of animal

and Ogba (2015) encontraron SDT en un rango de 91 a 7931 mg·L⁻¹ en cinco ríos de la región del Delta del Níger en Nigeria para su temporada de secas, mientras que para la época de lluvia reportaron 80 a 7 920 mg·L⁻¹.

Con respecto a la CE, Solís-Castro, Zúñiga-Zúñiga, y Mora-Alvarado (2018) reportan 50 a 549 µS·cm⁻¹ para el agua de pozos y 25 a 499 µS·cm⁻¹ para aguas nacientes; mientras que Mayorga y Mayorga (2015) reportaron valores de 50 a 100 µS·cm⁻¹ para agua de río y tanques de depósito del sector Santa Rosa y La Hechicera en Mérida, Venezuela, valores similares a los registrados en las aguas de este estudio. Estos últimos autores toman rangos permisibles (50 a 100 µS·cm⁻¹) de Standard Methods, considerando esas aguas aptas para su uso y consumo. Rubio-Arias, Contreras-Caraveo, Quintana, Saucedo-Teran, y Pinales-Munguia (2012) describen que los niveles altos de CE no significan que el agua represente un problema de salud, solo es indicativo de la cantidad de iones disueltos.

Los valores de dureza fueron similares a los obtenidos por Pérez-López (2016), quien obtuvo resultados entre 40 a 121 mg·L⁻¹ de CaCO₃ en muestras de agua potable de Poás y San Ramón, Costa Rica. Brousett-Minaya, Chambi-Rodríguez, Mollocondo-Turpo, Aguilar-Atamari, y Lujano-Laura (2018) presentaron resultados de dureza de 92 a 135 mg·L⁻¹ de CaCO₃ en aguas superficiales y valores máximos de 135.42 mg·L⁻¹ de CaCO₃ para el manantial. Este valor es mayor que el registrado en el manantial de Chacalapilla, donde se obtuvo el valor más alto (85.0 mg·L⁻¹ de CaCO₃) con respecto a los cuerpos de agua evaluados. Dichos valores pueden deberse a que el agua de estos cuerpos contiene rocas ricas en carbonatos y otros minerales que al desprenderse se incorporan al agua (Almazán-Juárez et al., 2016).

Alcivar-Bueno et al. (2017) estudiaron pozos de agua de la Provincia del Guayas en Ecuador y obtuvieron 1 000.25 mg·L⁻¹ de sólidos totales. Los autores clasificaron el agua como normal, según el límite (1 000 mg·L⁻¹) establecido por la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes de dicho país (Presidencia de la República, 2001). En el presente estudio, los valores no rebasaron los 200 mg·L⁻¹, por lo que el agua se considera de buena calidad. Rubio-Arias et al. (2014) valoraron muestras de agua de la presa La Boquilla, Chihuahua, por el método de titulación con AgNO₃, y obtuvieron una concentración media de Cl⁻ de 6.35 mg·L⁻¹ con el nivel más alto en diciembre (10.37 mg·L⁻¹). Bharti, Giri, y Kumar (2017) analizaron muestras de agua utilizando el método de Mohr y reportaron concentraciones de Cl⁻ de 26.9 a 29.9 mg·L⁻¹ para el río y 15.8 a 16.9 para el manantial. Estos autores describen que el aumento del contenido de Cl⁻ puede indicar una posible contaminación por aguas residuales humanas, estiércol, desechos industriales o simplemente de

waste thrown into water bodies, or just by the same decomposing organic matter such as leaf litter and waste from aquatic organisms. Vázquez, Aké-Castillo, and Favila (2011) and Gómez-Anaya, Novelo-Gutiérrez, and Astudillo-Aldana (2017) indicate that coffee plantations can have an impact on waters, making them more sensitive to disturbances and changes in their physicochemical characteristics. Kaur and Kaur (2015) state that high DOC can cause oxygen depletion, due to microbial decomposition and contamination by degradable organic wastes from various sources.

Cluster analysis groups sites into clusters of similar nature based on similarities and differences between sources and is useful for clustering sampling sites to save time and effort in future sampling (Khan, Gani, & Chakrapani, 2016). These similarities may prove useful if conservation programs for the area are ever intended in the future.

Soils of the upper and middle basin of the Copalita River have sandy loam and loam textures (Lozano-Trejo et al., 2020), which favors rainwater infiltration. Úbeda, Farguell, Francos, Outeiro, and Pacheco (2020) found promising results using rainfall simulators and report that areas devoid of vegetation had higher runoff (4 to 12 %) than more vegetated areas. Treviño Garza, Muñoz Robles, Cavazos Camacho, and Barajas Chávez (2002) calculated the runoff coefficient for the Sierra de San Carlos (Tamaulipas, Mexico), using Prevert tables, and found values of 0.63 for agricultural areas and 0.35 for forests; these coefficients are similar to those found in this study. González et al. (2016) affirm that indirect methods to generate runoff coefficient are based mainly on slope, soil and vegetation; in steep areas this coefficient is high. Similarly, they indicate that soil characteristics, such as infiltration capacity and permeability, influence the magnitude of surface runoff. Camarasa-Belmonte, Caballero López, and Iranzo García (2018) used cartography by geographic information systems (GIS) for mapping runoff thresholds in the province of Valencia, Spain; the authors conclude that changes in land use cause up to 100 % of rainfall to become runoff, preventing infiltration and water storage in soil and aquifers.

Conclusions

The parameters analyzed in water samples are within good quality standards, which indicates they are acceptable for human use. Chemical oxygen demand values, higher than the maximum value established by SEMARNAT, classify water as contaminated, which may be due to the presence of deposited and decomposing native organic matter and discharges from coffee processing. Water from Pluma Hidalgo and Santa María Huatulco, Oaxaca, is recommended for human use, but

forma natural por efecto de los arrastres provocados por las precipitaciones.

Rosabal-Carbonell, Chang-Huerta, Pérez-Aballe, y Morales-León (2012) analizaron muestras de aguas limpias y residuales en la Granma, Cuba, y reportaron valores de DQO que van de 21.26 mg·L⁻¹ para el río Arroyan a 22.72 mg·L⁻¹ para el embalse Paso Malo, concentraciones menores que las obtenidas en el presente estudio. Dimas, Garza, y Treviño (2015) evaluaron la calidad del agua del cauce de Aguas Blancas, Acapulco, Guerrero, siguiendo la metodología utilizada en este trabajo, y determinaron valores promedio de DQO de 7 a 28 mg·L⁻¹ y de 14 a 26 mg·L⁻¹, para las épocas de estiaje y lluvias, respectivamente.

Asimismo, Flores, Del Ángel, Frías, y Gómez (2018) indican valores promedio de 105 a 155 mg·L⁻¹ de DQO en la Laguna de las Ilusiones, Villahermosa, Tabasco, con el método de reflujo cerrado, y clasifican el agua como contaminada de acuerdo con las normas mexicanas. Los valores de DQO en el presente estudio (53.3 a 173.0 mg·L⁻¹) podrían estar relacionados con los desagües municipales, la escorrentía de agroquímicos utilizados para la fertilización y control fitosanitario en los cafetales, la incorporación de desechos animales arrojados a los cuerpos de agua o simplemente por la misma materia orgánica en descomposición como la hojarasca y desechos de organismos acuáticos. Vázquez, Aké-Castillo, y Favila (2011) y Gómez-Anaya, Novelo-Gutiérrez, y Astudillo-Aldana (2017) señalan que los cafetales pueden tener efecto en las aguas, haciéndolas más sensibles a perturbaciones y cambios en sus características fisicoquímicas. Kaur y Kaur (2015) afirman que una DQO alta puede causar el agotamiento del oxígeno, debido a la descomposición microbiana y contaminación por desechos orgánicos degradables de varias fuentes.

El análisis clúster agrupa sitios en conglomerados de naturaleza similar, en función de las similitudes y diferencias entre las fuentes y es útil para la agrupación de sitios de muestreo con el fin de ahorrar tiempo y esfuerzo en muestreos futuros (Khan, Gani, & Chakrapani, 2016). Estas similitudes pueden resultar de gran utilidad si en algún futuro se pretenden realizar programas de conservación para la zona.

Los suelos de la cuenca alta y media del río Copalita poseen texturas franco arenosa y franca (Lozano-Trejo et al., 2020), lo cual favorece la infiltración del agua de lluvia. Úbeda, Farguell, Francos, Outeiro, y Pacheco (2020) obtuvieron resultados prometedores con la utilización de simuladores de lluvia y reportan que las áreas desprovistas de vegetación produjeron escorrentía mucho más elevada (4 a 12 %) que las zonas más vegetadas. Treviño Garza, Muñoz Robles,

not for drinking. The runoff coefficient indicates the importance of conservation of vegetation cover and soil to maintain the existing aquifers. Raws and Prevert methods estimate similar values; areas with greater vegetation cover reported lower runoff coefficients.

Acknowledgments

The first author thanks CONACyT for granting her a scholarship for a Master's degree in Science (No. 920347). The authors of this study thank the owners of the coffee farms El Brasil, Vista Hermosa and Chacalapilla of Pluma Hidalgo and El Nueve and Miramar of Santa María Huatulco, for the support to carry out this research.

End of English version

References / Referencias

- Alcívar-Bueno, J. C., Mariscal-Santi, W., Sorroza-Rojas, N. A., Villacres-Pastor, R., García-Laterra, F. S., & Mariscal-García, R. S. (2017). Evaluación físico-química y microbiológica de la calidad del agua de pozos. *Dominio de las Ciencias*, 3(4), 183–206. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6325501>
- Almazán-Juárez, M. T., Almazán-Juárez, Á., Carreto-Pérez, B. E., Hernández Castro, E., Damián-Nava, A., & Almazán-Núñez, R. C. (2016). Calidad y clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(9), 293–305. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282016000300293
- Aly, A. A., Al-Omran, A. M., & Alharby, M. M. (2014). The water quality index and hydrochemical characterization of groundwater resources in Hafar Albatin, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 4177–4190. doi: 10.1007/s12517-014-1463-2
- Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. E. (2013). *Biología, la vida en la Tierra con fisiología* (9ª. ed.). México: Editorial Pearson.
- Basílico, G. O., De Cabo, L., & Faggil, A. (2015). Adaptación de índices de calidad de agua y de riberas para la evaluación ambiental en dos arroyos de la llanura Pampeana. *Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 17(2), 119–134. Retrieved from <http://revista.macn.gob.ar/ojs/index.php/RevMus/article/view/411>
- Bharti V. K., Giri A., & Kumar, K. (2017). Evaluation of physico-chemical parameters and minerals status of different water sources at high altitude. *Environmental Science and Toxicology*, 2(1), 010–018. doi: 10.17352/pjest.000007
- Bhat, B. N., Parveen, J., & Hassan, T. (2018). Seasonal assessment of physicochemical parameters and evaluation of water quality of river Yamuna, India. *Advances in Environmental Technology*, 4(1), 41–49. doi: 10.22104/aet.2018.2415.1121

Cavazos Camacho, y Barajas Chávez (2002) calcularon el coeficiente de escorrentía de la Sierra de San Carlos (Tamaulipas, México), utilizando las tablas de Prevert, y obtuvieron valores de 0.63 para áreas agrícolas y 0.35 para los bosques; estos coeficientes se asemejan a los del presente trabajo. González et al. (2016) afirman que los métodos indirectos para generar el coeficiente de escorrentía se basan principalmente en la pendiente, el suelo y la vegetación; en zonas altas este coeficiente resulta elevado. De igual modo indican que las características del suelo, como la capacidad de infiltración y la permeabilidad, influyen en la magnitud de la escorrentía superficial. Camarasa-Belmonte, Caballero López, e Iranzo García (2018) utilizaron cartografía mediante sistemas de información geográfica (SIG) para la elaboración de mapas de umbrales de escorrentía en la provincia de Valencia, España; los autores concluyen que los cambios en el uso del suelo provocan que hasta el 100 % de la lluvia se convierta en escorrentía, impidiendo los procesos de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo y los acuíferos.

Conclusiones

Los parámetros analizados en las muestras de agua se encuentran dentro de los estándares de buena calidad, lo cual implica que son aceptables para que puedan ser destinadas al uso humano. Los valores de demanda química de oxígeno, superiores al valor máximo establecido por SEMARNAT, clasifican al agua como contaminada, lo cual puede deberse a la presencia de materia orgánica nativa depositada y en descomposición, y a las descargas del beneficiado del café. El agua proveniente de Pluma Hidalgo y Santa María Huatulco, Oaxaca, es recomendable para uso humano, pero no recomendable para su consumo. El coeficiente de escorrentía indica la importancia de la conservación de la cobertura vegetal y el suelo para mantener los cuerpos acuíferos existentes. Los métodos de Raws y Prevert estiman valores similares; las áreas con mayor cobertura vegetal registraron coeficientes menores de escorrentía.

Agradecimientos

La primera autora agradece al CONACyT el otorgamiento de beca para estudios de Maestría en Ciencias (Núm. 920347). Agradecemos a los propietarios de las fincas cafetaleras El Brasil, Vista Hermosa y Chacalapilla de Pluma Hidalgo y El Nueve y Miramar de Santa María Huatulco, por las facilidades para realizar el presente trabajo de investigación.

Fin de la versión en español

- Brousett-Minaya, M., Chambi-Rodríguez, A., Mollocondo-Turpo, M., Aguilar-Atamari, L., Lujano-Laura, E. (2018). Evaluación físico-química y microbiológica de agua para consumo humano Puno-Perú. *Fides et Ratio*, 15(15), 47–68. Retrieved from <http://fidesetratio.ulasalle.edu.bo/index.php/fidesetratio/article/view/42>
- Camarasa-Belmonte, A. M., Caballero López, M. P., & Iranzo García, E. (2018). Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956–2011). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 127–153. doi: 10.21138/bage.2714
- Dimas, M. J. J., Garza, M. N. D., & Treviño, D. B. M. (2015). Índice de la calidad del agua y metales pesados del cauce aguas blancas del municipio de Acapulco Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 113–118. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263139243016>
- Flores, C. M., Del Ángel, E., Frías, D. M., & Gómez, A. L. (2018). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en aguas y sedimento superficial de la laguna de Ilusiones, Tabasco, México. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 39–57. doi: 10.24850/j-tyca-2018-02-02
- Galindo-Castillo, E., Otazo-Sánchez, M., Reyes-Gutiérrez, R., Arellano-Islas, S. M., Gordillo-Martínez, A., & González-Ramírez, C. A. (2010). Balance hídrico en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, México: proyecciones para 2021. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 10, 65–90. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/243458725_BALANCE_HIDRICO_EN_EL_ACUIFERO_CUAUTITLAN-PACHUCA_MEXICO_PROYECCIONES_PARA_2021
- García Alvarado, M. E., Díaz Zorrilla, G. O., Castañeda Hidalgo, E., Lozano Trejo, S., & Pérez León, M. I. (2017). Caracterización del agroecosistema de café bajo sombra en la cuenca del río Copalita. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 40, 635–648. doi: 10.22004/ag.econ.262052
- Gómez-Anaya, J. A., Novelo-Gutiérrez, R., & Astudillo-Aldana, M. R. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 372–380. doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.004
- González, G. A., Álvarez-Figueroa, P., González, F. M., & Aguirre-Mendoza, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador. *CEDAMAZ*, 6(1), 50–59. Retrieved from <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/61>
- Gue, A. E., Mayer, B., & Grasby, S. E. (2015). Origin and geochemistry of saline spring waters in the Athabasca oil sands region, Alberta, Canada. *Applied Geochemistry*, 61, 132–145. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.05.015
- Haseena, M., Faheem, M. M., Javed, A., Arshad, S., Asif, N., Zulfikar, S., & Hanif, J. (2017). Water pollution and human health. *Environmental Risk Assessment and Remediation*, 1(3), 16–19. doi: 10.4066/2529-8046.100020
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Uso del suelo y vegetación. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2019). Mapas. Área geográfica. Oaxaca. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Kaur, S., & Kaur, J. (2015). Assessment of seasonal variations in oxygen demanding parameters (DO, BOD, COD) along Sirhind Canal passing through Moga, Punjab India. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(5), 697–700. Retrieved from http://ijiset.com/vol2/v2s5/IJISSET_V2_I5_104.pdf
- Khan, M. Y. A., Gani, K. M., & Chakrapani, G. J. (2016). Assessment of surface water quality and its spatial variation. A case study of Ramganga River, Ganga Basin, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 28. doi: 10.1007/s12517-015-2134-7
- Leija-Loredo, E. G., Reyes-Hernández, H., Reyes-Pérez, O., Flores-Flores, J. L., & Sahagún-Sánchez, F. J. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 22(1), 125–140. doi: 10.21829/myb.2016.221481
- Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., Díaz-Zorrilla, G. O., & Santiago-Martínez, G. M. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(1), 57–66. doi: 10.28940/terra.v38i1.443
- Mayorga, J., & Mayorga, O. (2015). Caracterización del agua de consumo en el sector Santa Rosa-La Hechicera (Mérida, Venezuela). *Revista Ingeniería*, 22(2), 106–112. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70742617011>
- Morales-Durán, N., Torre-González, A., García-Sánchez, V., & Chávez, C. (2018). Estudio de la calidad bacteriológica y parámetros fisicoquímicos del agua del Distrito de Riego 023. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 53–67. doi: 10.24850/j-tyca-2018-01-04
- Olorode, O. A., Bamigbola, E. A., & Ogba, O. M. (2015). Comparative studies of some river waters in Port Harcourt based on their physico chemical and microbiological analysis, Niger Delta Region of Nigeria. *International Journal of Basic and Applied Science*, 3(3), 29–37.
- Pennington, T., & Sarukhán, J. (2005). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica.
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(3), 3–14. doi: 10.18845/tm.v29i3.2884
- Presidencia de la República. (2001). Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI, Anexo 1 del texto unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Quito, Ecuador.
- Rattan, S., Parande, A. K., Nagaraju, V. D., & Ghiwari, G. K. (2015). A comprehensive review on utilization of

- wastewater from coffee processing. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9), 6461–6472. doi: 10.1007/s11356-015-4079-5
- Ritabrata, R. (2018). An introduction to water quality analysis. *Essence*, 9(2), 94–100. doi: 10.31786/09756272.18.9.2.214
- Romero-Rojas, J. A. (2000). *Calidad del agua* (2ª. ed). México: Alfaomega.
- Rosabal-Carbonell, Y., Chang-Huerta, L., Pérez-Aballe, N., & Morales-León, J. A. (2012). Evaluación de la demanda química de oxígeno en aguas de la provincia de Granma, Cuba. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(1), 15–20. <http://revista.itson.edu.mx/index.php/rln/article/view/197>
- Rubio-Arias, H., Contreras-Caraveo, M., Quintana, R. M., Saucedo-Teran, R. A., & Pinales-Munguia, A. (2012). An overall water quality index (WQI) for a man-made aquatic reservoir in Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(5), 1687–1698. doi: 10.3390/ijerph9051687
- QGIS Development Team (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Retrieved from <http://qgis.osgeo.org>
- Rubio-Arias, H. O., Ortiz-Delgado, R. C., Quintana-Martínez, R. M., Saucedo-Terán, R. A., Ochoa-Rivero, J. M., & Rey-Burciaga, N. I. (2014). Índice de calidad de agua (ICA) en la presa La Boquilla en Chihuahua, México. *Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 139–150. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000200005
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación en México* (1ª. edición digital). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., & González, R. A. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Revista Tecnología y Ciencia del Agua*, 7(4), 75–96. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n4/2007-2422-tca-7-04-00075.pdf>
- SAS Institute. (2015). SAS® University Edition: Installation Guide for Windows. Cary, NC: Author.
- Secretaría de Economía. (2012). Norma Mexicana. NMX-AA-030-1-SCFI-2012. Análisis de agua. Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Parte 1. Método de reflujo abierto. México: DOF. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166774/NMX-AA-030-1-SCFI-2012.pdf>
- Secretaría de Economía. (2015). Norma Mexicana. NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México: DOF. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- Secretaría de Economía. (2001). Norma Mexicana. NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México: DOF. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía. (2001). Norma Mexicana. NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales, y residuales tratadas. Método de prueba. México: DOF. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Retrieved from https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Estadísticas del agua en México, edición 2015. Retrieved from <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-del-agua-en-mexico-edicion-2015/>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018a). Atlas del agua en México. Retrieved from http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018b). Estadísticas del agua en México, edición 2018. Retrieved from <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>
- Secretaría de Salud. (2002). Norma Oficial Mexicana. NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Retrieved from <http://www.cucba.udg.mx/sites/default/files/proteccioncivil/normatividad/NOM-230-SSA1-2002.pdf>
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35–46. doi: 10.18845/tm.v31i1.3495
- Treviño Garza, E. J., Muñoz Robles, C. A., Cavazos Camacho, C., & Barajas Chávez, L. (2002). Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*, 5(4). <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/1202>
- Úbeda, X., Farguell, J., Francos, M., Outeiro, L., & Pacheco, E. (2020). Runoff and erosion generation by simulated rainfall in a Mediterranean forest with forest management. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 37–51. doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.01.007
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, Francia:

- UNESCO. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494>
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás*. París, Francia: UNESCO. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- Vázquez, G., Aké-Castillo, J. A., & Favila, M. E. (2011). Algal assemblages and their relationship with water quality in tropical Mexican streams with different land uses. *Hydrobiologia*, 667(1), 173–189. doi: 10.1007/s10750-011-0633-4
- Villalobos-Hiriart, J. L., Álvarez, F., Hernández, C., Lanza-Espino, G. D. L., & González-Mora, I. D. (2010). Crustáceos decápodos de las cuencas Copalita, Zimatán y Coyula, en Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 99–111. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42518506005>