

CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO DUERO, MICHOACÁN

• José Teodoro Silva* • Rodrigo Moncayo • Salvador Ochoa •
• Francisco Estrada • Gustavo Cruz-Cárdenas • Carlos Escalera •
• Fabián Villalpando • Jaime Nava •

Instituto Politécnico Nacional, México

*Autor de correspondencia

• Alfredo Ramos •

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., México

• Martín López •

Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Se describe la calidad química de los recursos hídricos tanto subterráneos como superficiales en la cuenca del río Duero. El agua subterránea se analizó mediante un estudio hidrogeoquímico en 97 aprovechamientos (20 manantiales y 76 pozos) para la época de estiaje. Se aplicó el Índice de Calidad del Agua (ICA; NSFQWI) en el agua superficial para 35 sitios, a partir de ocho parámetros, dividiéndolos en manantiales y el cauce. Se compararon diferentes parámetros con información previa mediante un análisis de varianza. La calidad del agua subterránea en términos generales resultó buena y está asociada con el tipo de rocas y geología de la cuenca. Predomina la clase de agua C1-S1, baja en salinidad y sodio, pudiéndose utilizar en la mayor parte de los cultivos y cualquier tipo de suelos sin desarrollar peligro por salinidad y sodicidad. Los valores ICA obtenidos, uso en agua potable, ubican a la mayoría de los manantiales como contaminados, con excepción del manantial de Carapan (condición excelente con 92 puntos). En el cauce, uso en agricultura, el 75% de los sitios resulta como contaminado y el resto en levemente contaminado. La comparación de los nitratos en 20 años de diferencia fue estadísticamente significativo ($F = 15.73$, $p = 0.0001$), lo que representa un aumento importante de los nutrientes en el río. Por último, el creciente deterioro de la calidad del agua del río, a pesar de un balance hidrológico positivo, promueve la extracción del agua subterránea, llevando a un proceso de sobreexplotación del manto acuífero.

Palabras clave: análisis hidrogeoquímico, índice de calidad del agua, contaminación, sobreexplotación.

Introducción

En México, el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2012 incluye el Programa Nacional Hídrico, en el cual se señalan los pasos para un manejo adecuado del recurso de manera comunitaria (Presidencia de la República, 2007). Sus ob-

jetivos principales son prevenir y reducir la contaminación del agua; fomentar su uso adecuado; proteger ríos, lagos y lagunas; y reducir los efectos de inundaciones y sequías (Conagua, 2008).

Para lograrlo, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) ha promovido la realización de lo

que denomina proyectos emblemáticos para el saneamiento integral de cuencas, considerados de alto beneficio social y que pueden ser concluidos en cinco años. Con ello se busca dar respuesta más efectiva a la solución de la problemática socioambiental de cuenca, con base en un consenso de usuarios.

Esto responde a que en la actualidad podría establecerse que prácticamente la totalidad de las cuencas hidrológicas de México se encuentran en mayor o menor medida con verdaderos problemas de contaminación. Ejemplo de ello es la cuenca del río Lerma, considerada la más contaminada de México (Pacheco-Vega, 2007).

La cuenca del río Duero, localizada dentro de la zona hidrológica río Lerma-Chapala no escapa a esta situación. Problemas relacionados con la pérdida de suelo, disminución de la cubierta vegetal, tala clandestina de bosques, contaminación de suelos y acuíferos por basura, descarga de aguas negras directas al río, y desaparición de fauna silvestre, son el común denominador (Conagua, 2009).

Dado el deterioro continuo en la calidad del agua superficial de la cuenca del río Duero, el aprovechamiento del agua subterránea en la misma se ha incrementado de forma considerable. El Registro Público de Derechos de Agua (Repda) de la Conagua registra la existencia de un total de 150 pozos para el año 2000, pasando en el 2012 a 805 pozos, con volúmenes totales de extracción anual de aproximadamente 120 Mm³. En la cuenca, los acuíferos presentan condiciones de libre a semiconfinado, lo cual la hace altamente vulnerable a actividades antropogénicas.

En atención a dicha problemática, es que se desarrolla el presente estudio, con el objetivo principal de evaluar la actual problemática del agua subterránea y superficial en la cuenca, en términos de su calidad química, que impacta una importante actividad económica en el ámbito estatal en el sector agrícola, con el cultivo de frutillas, hortalizas y granos, que incluyen productos de exportación, como la fresa.

Metodología

Área de estudio. La cuenca del río Duero se ubica al noroeste del estado de Michoacán, en las coordenadas 19° 40' y 20° 15' latitud norte, y 101° 45' y 102° 45' longitud oeste. Pertenece a la Jurisdicción Administrativa núm. VIII Lerma-Santiago-Pacífico, dentro de la Región Hidrológica núm. 12 Lerma-Santiago, específicamente en la denominada Subregión Hidrológica Bajo Lerma. Tiene una superficie de aportación de 2 531.3 km², con un escurrimiento promedio anual de 250 millones de metros cúbicos. Tiene forma alargada y corre en dirección sureste-noroeste, cruzando cuatro microcuencas: la cañada de los Once Pueblos, los valles de Guadalupe y Zamora, para, finalmente llegar hasta la Ciénaga de Chapala (figura 1).

Análisis de la calidad del agua subterránea. Con el fin de determinar el esquema de distribución de la calidad química del agua subterránea para uso agrícola en la cuenca del río Duero, se realizó un muestreo hidrogeoquímico en 96 distintos tipos de aprovechamientos (20 manantiales y 76 pozos) durante el periodo abril-mayo de 2009.

Durante el muestreo se obtuvieron datos en campo de temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, y pH, utilizando un conductivímetro portátil de medición, marca HANNA Instruments, modelo HI 9635.

En la determinación de los principales elementos químicos (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻) necesarios para la obtención de las distintas facies y clases de agua, se siguieron patrones establecidos en el manual de *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater* (APHA, 1998) y fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Aguas del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Michoacán (CIIDIR-IPN-Michoacán).

Con el Diagrama de Piper se definieron las distintas facies químicas de agua prevalecientes en la cuenca. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien

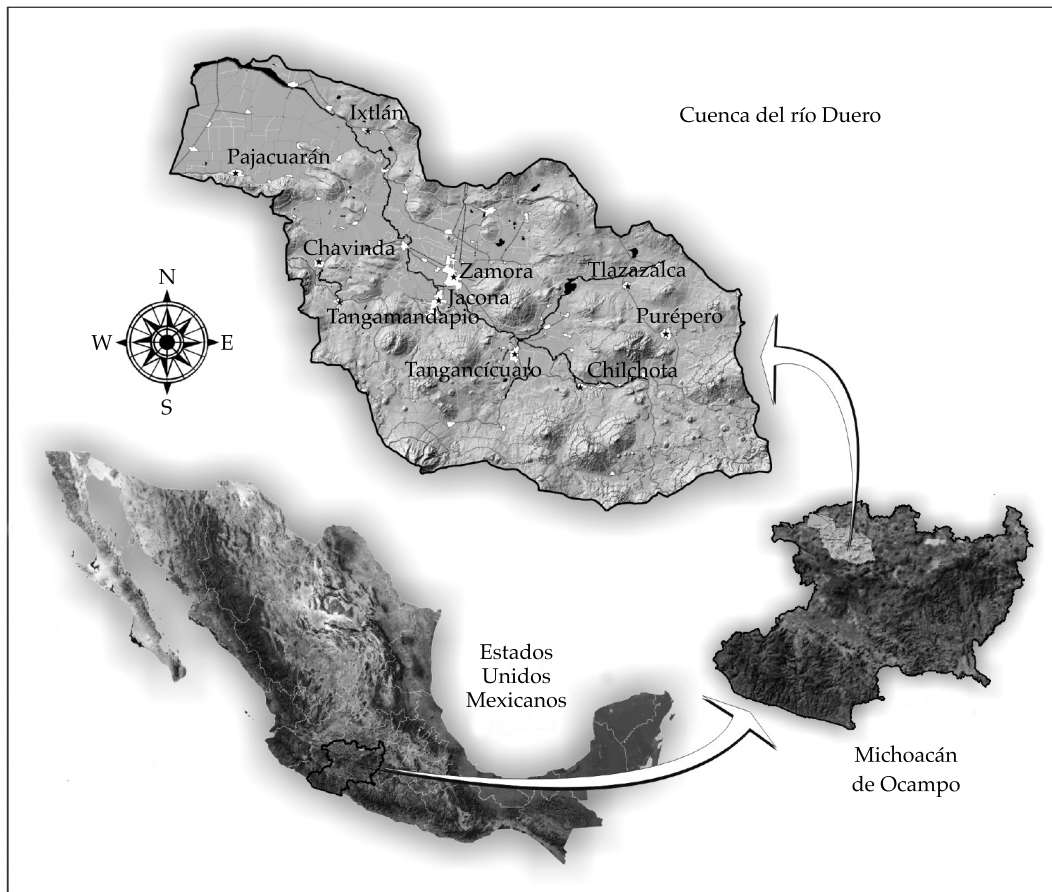


Figura 1. Mapa de localización de la cuenca del río Duero.

definidas. Las concentraciones de los iones dadas en meq/L, se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes, respectivamente.

Para definir el peligro de salinización o sodificación del suelo a partir de parámetros medidos en el agua de riego, se utilizó el esquema propuesto por el U.S. Soil Salinity Laboratory Staff, en 1954, conocido como Normas de Riverside. Este sistema se basa en la medida de la conductividad eléctrica del agua para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para definir el riesgo de sodificación o alcalinización, mediante la fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Donde las concentraciones de Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} están dadas en meq/L.

Se definen cuatro clases de riesgo de salinización y otras cuatro de riesgo de sodificación, resultando en total 16 clases de agua (C1-S1, C1-S2, etc.) cada una de las cuales tiene diferentes condicionantes para ser utilizada en regadío.

Se elaboraron los mapas de distribución de isovalores para los parámetros de conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), temperatura y relación de

adsorción de sodio (RAS), aplicando en todos los casos el método de interpolación Kriging.

Análisis de la calidad del agua superficial. Se muestrearon 35 sitios en el río Duero, incluyendo el cauce principal, afluentes secundarios y manantiales. Dentro de las variables ambientales se midieron la temperatura (°C), pH, oxígeno disuelto (ppm), % de saturación de oxígeno y nitratos (ppm) por medio de un multisensor (Hydrolab DataSonde 4X). Además, se recolectaron 2.5 L de muestra en el primer metro de profundidad para determinar la alcalinidad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅; en ppm), demanda química de oxígeno (DQO; en ppm), sólidos totales suspendidos (ppm) y fosfatos (APHA, 1998). Por último, se estimaron las bacterias coliformes fecales, mediante lo establecido en la NOM-112-SSA1-1994, y según Vanderzant y Spittstoesser (1992), empleando la técnica del número más probable (NMP).

Para la determinación del índice de calidad del agua (ICA), se incluyó la medición de ocho variables (temperatura, pH, oxígeno disuelto, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos, nitratos y sólidos totales suspendidos). Se siguió el método del Water Quality Index desarrollado por la National Sanitation Foundation (WQINSF), en donde la evaluación se realiza a partir de técnicas multiplicativas y ponderadas. Esto asigna un peso específico a cada una de las variables, según la importancia que tenga para la vida acuática y el ambiente. Se aplicó la ecuación propuesta por Brown *et al.* (1973):

$$ICA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Donde n son las ocho variables; w_i , el peso específico que se asigna a cada parámetro (i), que se pondera entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno; q_i , la calidad del parámetro (i), en función de su concentración, y cuya calificación oscila entre 0 y 100; PI representa la operación multiplicativa de las variables Q elevadas a la W .

Las gráficas de sensibilidad, en donde, como función de la concentración de la variable, se lee la calificación de la calidad y se obtienen de las referencias originales. En el caso de la interpretación se dividieron los sitios entre manantiales, donde se aplicó el criterio para uso de agua potable, y el cauce del río con el criterio de uso agrícola.

El valor ICA obtenido se acomodó en una escala entre 0 y 100, que califica la calidad, a partir del cual y en función del uso del agua, se puede estimar el nivel de contaminación. Esto permite interpretar y comunicar fácilmente los resultados en una escala sencilla, agrupando la calidad del agua de los ecosistemas acuáticos en seis intervalos: (E) Excelente; (A) Aceptable; (LC) Levemente Contaminada; (C) Contaminada; (FC) Fuertemente Contaminada, y (EC) Excesivamente Contaminada.

Dado que se cuenta con información previa de algunas de las variables (López *et al.*, 1990), se hizo una comparación de la información de manera gráfica y se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para determinar si hay diferencias significativas estadísticas. Se determinaron las diferencias mediante la prueba de Tukey, con un intervalo de confianza del 95% ($P < 0.05$), por medio del programa SPSS Statistics, ver. 17.0 (2008).

Resultados

Agua subterránea

La figura 2 muestra la localización dentro de la cuenca de los 76 pozos y 20 manantiales muestreados.

Los resultados de los análisis químicos realizados en manantiales y pozos se muestran en el cuadro 1 y 2, respectivamente.

Para tener una idea preliminar de la calidad química del agua para uso agrícola se obtuvieron mapas de isovalores para los parámetros de conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD) y temperatura (T). La figura 3 muestra la configuración de los mismos en la cuenca.

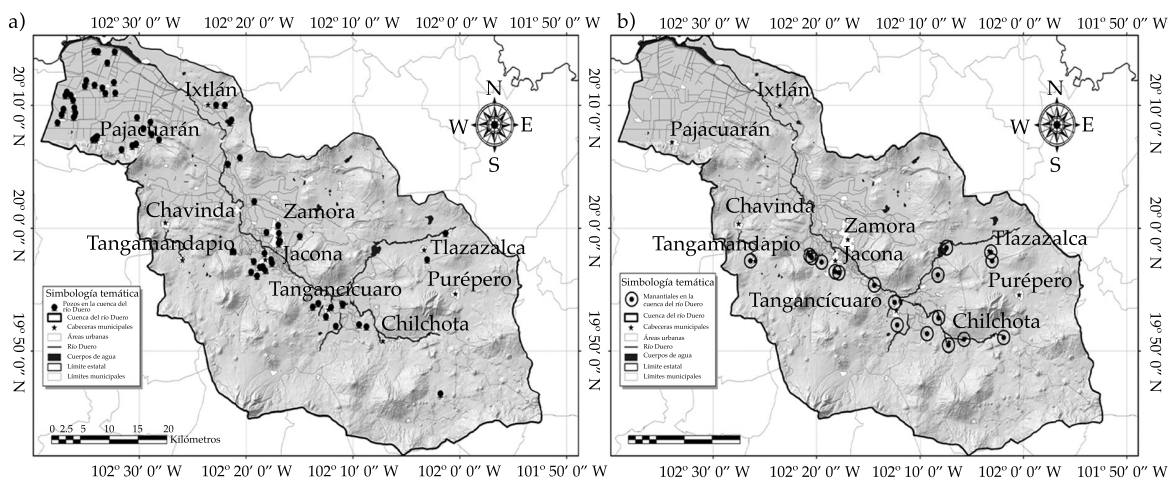


Figura 2. Localización dentro de la cuenca de los distintos aprovechamientos de aguas subterráneas muestreados: a) pozos, b) manantiales.

Cuadro 1. Resultados de análisis físico-químicos a muestras de agua de manantiales.

Manantial	CE (µs)	STD (ppm)	T °C	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ⁼ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
Carapan	131	93	18.2	23.3	17.9	7.2	8.2	9.2	110.5	0	2.1
Tanaquillo	148.6	105.8	17.5	25.3	19.3	7.2	10.2	11.3	111.5	0	2.6
Chilchota	191	133	19.4	25.4	23.4	8	9.7	11.3	114.9	0	5.9
Nogales	138.2	96.5	18.1	23.1	21.3	7.8	9.6	8.5	116.1	0	2.2
Etúcuaro	153	107.5	19.4	25.1	21.3	7.5	9.9	13.5	112.8	0	2.8
Telonzo	178	105.8	23.7	24.9	27.4	9.5	10.5	13.9	132.1	0	2.3
Tangaman	181	126.7	22.9	26.8	25.6	9	10.7	12.3	128.9	0	6.8
Estancia	190	133.2	22.9	25.2	25.6	8.2	10.2	10.1	128.3	0	2.4
Orandino	139	98	21.9	23.5	29.8	8.2	9.8	11.5	125.7	0	2.3
Verduzco	155	108	21.1	26.5	28.8	8.2	10.2	12.8	128.5	0	2.5
Platanal	190	133.2	22.5	28.5	27.9	7.3	10.8	12.8	129.1	0	2.3
Camécuaro	243	170	22.4	30.8	28.7	8.1	10.6	20.9	126.1	0	3.4
Cupatziro	101	78	18.3	28.8	26.7	6.4	11.1	12.2	129.6	0	2.2
San José	85	60	18.2	21.5	18.4	6.4	8.9	7.8	103.3	0	4.9
Antonio	253	179	22.5	31.1	33.2	8.1	12.9	13.5	155.4	0	3.4
Albercas	236	166	22.5	43	37.2	10.1	13.3	19.9	182.3	0	9.7
Yerbab	324	228	22	43.3	38.6	10.7	13.6	15.6	183.1	0	9.3
Urepetiro	386	270	29.4	47.5	51.9	9.2	13.6	29.9	197.9	0	5.5
Bosque	196	138	20.4	40.6	40.3	8.2	14.7	12.4	195.0	0	1.1
Calicanto	232	163	23	20.3	21.6	9.6	15.6	12.8	129.9	0	3.1

Cuadro 2. Resultados de análisis físico-químicos a muestras de agua de pozos.

Pozos	CE (μ s)	STD (ppm)	T° C	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ⁼ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
Morelos	120.7	84.7	17.5	20.1	15.2	6.2	8.4	7.1	101.7	0	2.2
Bombas	404	283	19.7	38.5	36.4	10.4	22.8	14.2	182.6	0	20
Llano	246	173	20	31.9	28.8	9.9	14.3	19.1	138.2	0	8.9
Cuates	144	100.9	19	32.6	31.2	9.2	12.1	19.3	134.0	0	8.6
Palmar	251	176	21	32.9	30.4	9.5	12.6	19.9	137.1	0	9
Tlazazalca	363	255	23.5	46	35.1	10.9	13.2	15.6	211.0	0	2.2
Parocuello	428	300	27.5	48.2	52.6	9.2	15	37.6	189.6	0	7.4
Tenería	207	147	22.5	40.6	50.8	8.2	13.3	21.3	188.8	0	2.4
Camelinas	365	254	22.6	53.2	56.2	10.1	11.3	53.9	182.9	0	5.9
Loma	389	273	21.6	32.3	45.3	11.7	16.8	13.2	199.1	0	2.5
Duarte	490	343	20.2	40.1	51.3	19.2	14.3	10.3	225.0	0	20.5
Moral	492	345	22	35.8	52.5	17.4	23.5	17.0	210.0	0	26.8
Maguey	530	370	19.9	34.5	45.5	18.3	27.6	17.7	235.0	0	5
Tosca	405	286	24.5	66.4	57.9	10.1	19.8	45.4	205.0	0	17.3
Llano	512	359	20.7	45.3	35.6	18.3	25.9	18.4	245.0	0	19.2
Cofradía	145	102	21.1	41.7	20.7	8.2	14.2	10.6	165.0	0	2.4
Porvenir	414	293	29.6	55.3	70.2	4.8	16.6	18.5	235.0	0	6.8
Floresta	331	212	27	45.8	50.6	7.3	16.5	12.1	225.3	0	2.2
DUM	557	266	23.5	45.5	50.2	16.5	42.3	21.3	310.0	0	10.6
Gortari	766	452	22.2	58	95	22.9	57.5	43.2	369.6	0	40.6
Arbole	520	333	23.2	50.2	72	22.9	45.5	22.0	324.0	0	39.2
Jericó	366	235	26.7	47.8	55.5	9.2	37.6	12.1	268.2	0	22.3
Villa	870	609	31.9	55.9	61.5	17.5	26.1	21.6	298.0	0	5.5
Agustín	1 105	774	27.7	59.5	58.3	22.9	38.5	28.7	294.0	0	39.7
Riveras	741	518	23.1	52.7	54.5	20.1	36.9	25.5	295.1	0	25.3
Peñita	1 021	715	25.4	61.4	65.9	28.6	38.6	40.8	354.5	0	15.9
Realejo	717	503	24.5	52.3	58.3	17.4	45.4	22.3	315.4	0	19
Nuevo	476	334	30.3	45	55	12.8	29.1	9.6	280.3	0	0
Unidad	141	99	22.7	28.7	23.8	6.4	8.5	5.7	130.4	0	0
Bosque	372	261	24.5	34.3	36.9	8.6	12.9	13.8	164.9	0	2.4
Entierro	203	142	22.3	28.2	32.5	8.2	10	12.8	139.9	0	1.4
Pivac	1 417	997	20.6	53.2	81.3	42	55.6	26.6	250.9	0	191
Hacienda	305	240	27.2	42.1	45.6	7.2	12.2	8.2	208.9	0	0
Calera	570	399	37.9	45	65	9.5	16.8	10.3	244.0	0	0
Luis G.	1 520	1 367	22.9	330	84.5	23.6	63.4	58.8	887.1	0	125
Ixtlán	830	580	43.5	195.5	48.2	2.7	11.5	74.4	363.7	0	32.8
Chinela	2 030	1 510	23.3	380.8	95.2	26.6	65.1	355.3	450.0	0	149
Conce	750	523	34.2	190.7	66.4	7.3	13.4	65.4	425.0	0	19.9
Geyser	2 630	1 860	43	83.7	84	11	18.5	25.6	330.8	0	7.9
Sauceda	368	255	32.3	52.6	55.2	6.4	12.1	12.1	210.3	8.9	2.6
Sauceda 2	609	426	34.4	619.7	166.7	3.7	21.3	723.9	67.5	17.6	348
Rastro	1 006	706	24.6	212.4	22.7	17.5	38.4	26.9	639.1	0	4

Cuadro 2 (continuación). Resultados de análisis físico-químicos a muestras de agua de pozos.

Pozos	C E (μ S)	STD (ppm)	T° C	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ⁼ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
Esquinas	436	308	26	78.2	7.8	4.9	10.0	31.9	201.3	0	9.6
J. Rosario	673	473	25	115	15.6	9.7	36.1	53.2	482.0	0	14.4
L. Ordaz	1 315	935	23.5	133.4	11.7	45.0	140.3	53.2	1 122.6	0	19.2
Tule	1 530	1 145	23.3	207	11.7	45.0	128.3	39.0	1 134.8	0	14.4
Luis Ríos	1 444	1 016	22.3	186.3	11.7	36.5	120.2	39.0	933.5	0	24.0
J. Zepeda Z.	1 510	1 189	21.9	243.8	11.7	36.5	150.3	42.6	1 104.3	0	19.2
A. Gamez	1 500	1 079	23.3	225.4	11.7	36.5	108.2	81.6	982.3	0	9.6
Pajacu	1 412	991	24.4	151.8	11.7	42.6	156.3	53.2	921.3	0	14.4
M. Estrada	592	416	24.3	92	7.8	9.7	36.1	28.4	384.4	0	14.4
E. Barajas	1 457	1 030	23.7	230	11.7	34.0	24.0	46.1	921.3	0	28.8
A. Rodríguez	1 377	973	24	167.9	11.7	40.1	112.2	53.2	890.7	0	9.6
M. Navarro	1 520	1 080	25	209.3	11.7	38.9	112.2	53.2	1 018.9	0	9.6
Gregorio	315	230	24	48.3	7.8	8.5	20.0	24.8	183.0	0	9.6
J. Morales	1 178	827	21.9	140.3	11.7	32.8	12.0	31.9	616.2	0	38.4
R. Garibay	885	625	23.5	119.6	7.8	19.5	88.2	31.9	347.8	0	172.9
Pajacu	345	241	32.2	43.7	7.8	9.7	36.1	14.2	213.5	0	4.8
Viejo	367	257	32.7	55.2	7.8	21.9	12.0	21.3	231.8	0	4.8
Morales	875	616	26.8	121.9	7.8	23.1	12.0	31.9	488.1	0	33.6
R. Ríos	475	330	36.4	71.3	11.7	4.9	16.0	70.9	207.4	0	9.6
A. Ríos	495	345	34.5	71.3	11.7	6.1	10.0	63.8	183.0	0	24.0
Higuera	475	330	33.9	69	11.7	6.1	12.0	53.2	207.4	0	19.2
G. Morales	455	317	37.2	69	7.8	6.1	10.0	53.2	207.4	0	9.6
J. Padilla	512	359	32	71.3	11.7	8.5	16.0	49.6	237.9	0	28.8
E. Jiménez	360	252	33.3	50.6	7.8	7.1	12.0	24.8	201.6	0	4.8
Paracho	339	239	30.2	48.3	7.8	8.5	12.0	17.7	158.6	0	4.8
M. Valdez	1 580	1 337	25.3	354.2	7.8	24.3	78.2	46.1	1 372.7	0	14.4
A. Bravo	1 810	1 392	23.9	324.3	11.7	34.0	126.3	53.2	1 336.1	0	115.3
R. Toribio	1 850	1 418	24.7	301.3	11.7	34.0	124.2	166.7	1 049.4	3	153.7
R. Ávalos S.	1 520	1 200	30.6	239.2	11.7	30.4	116.2	102.8	988.4	0	57.6
Meza	935	656	22.9	119.6	7.8	20.7	64.1	53.2	555.2	3	48.0
J. González	1 540	1 115	25.3	216.2	11.7	32.8	114.2	60.3	1 098.2	0	28.8
Buenrostro	1 132	835	24.7	147.2	11.7	26.8	92.2	63.8	780.9	3	14.4
V. Arévalo	1 540	1 129	25.3	188.6	11.7	37.7	146.3	46.1	1 177.5	3	9.6
D. Gómez	1 500	1 054	22.7	200.1	7.8	38.9	102.2	35.5	1 000.6	0	67.2

Se obtuvieron rangos de valores de CE, de 101 a 2 630 μ S/cm; los valores más bajos que representan una mejor calidad química del agua subterránea se distribuyen en las estribaciones de las sierras de mayor altitud, localizados en la porción sur-sureste de la cuenca; en tanto que los valores más altos se

registraron al NW del área de estudio, que se relacionan con la zona de influencia del campo geotérmico de Ixtlán de los Hervores, así como con la porción central orientada en el sentido de la falla geológica Pajacuarán.

En relación con STD, los rangos oscilaron entre 60 y 1 800 mg·l⁻¹, coincidiendo los valores

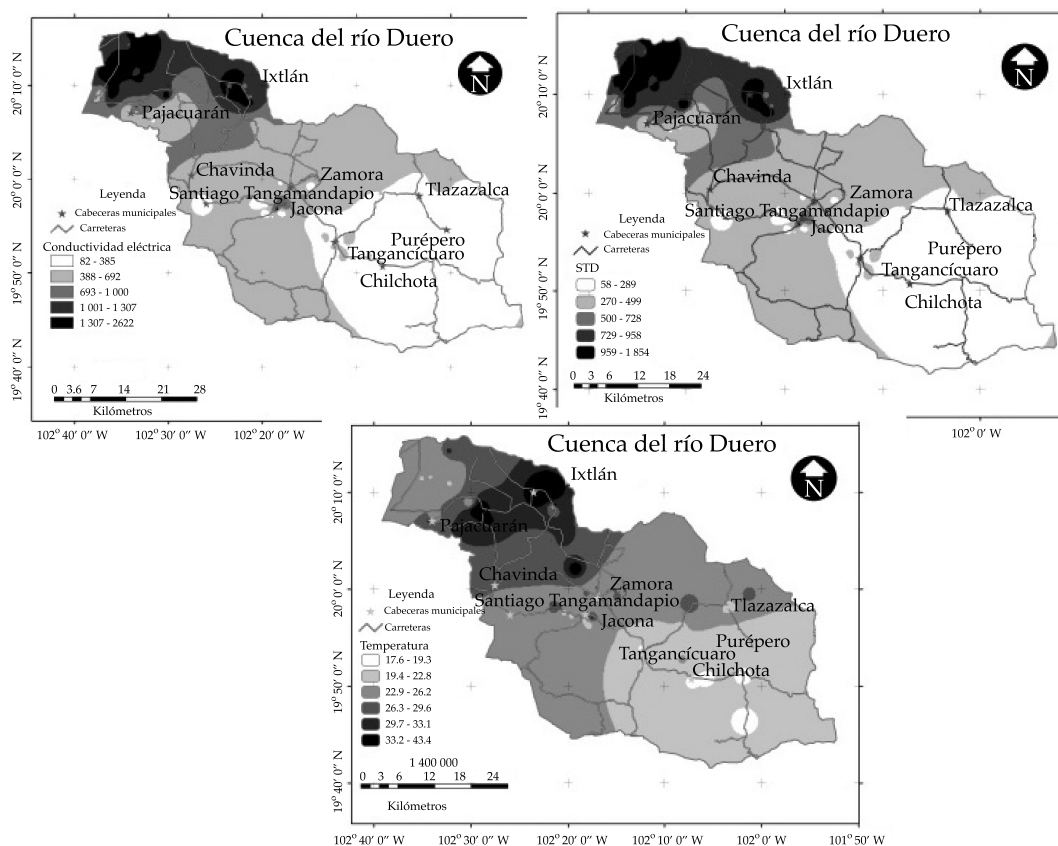


Figura 3. Mapas de isovalores para los parámetros de CE, STD y T.

más bajos con las estribaciones de los cerros de mayor altitud, aumentando su concentración de manera gradual hacia los valles; lo anterior es una guía de la presencia de agua de mejor calidad asociada con el tipo de acuífero en explotación.

El área de mayor concentración se relaciona con la zona de influencia del campo geotérmico de Ixtlán de los hervores, así como con la porción central orientada en el sentido de la falla geológica Pajacuarán.

La relación de conductividad eléctrica (CE) es directamente proporcional al contenido de sólidos totales disueltos en el agua subterránea y éstos se incrementan con la evolución del agua subterránea, o por efecto de la contaminación natural o antropogénica.

La temperatura puede influir en el incremento o decremento de la solubilidad de las sustancias presentes (Porrás-Martín *et al.*,

1985), en específico su conductividad eléctrica; en la cuenca, los valores obtenidos fueron entre 17.5 y 43 °C. Las temperaturas más frías se ubican hacia las estribaciones volcánicas, coincidiendo con la alta concentración de manantiales. Los valores mayores se asocian con el sistema estructural de la porción norte, que dan lugar a condiciones geotérmicas locales. En esencia, estas anomalías de temperatura están relacionadas con el esquema geológico-estructural de la región.

La figura 4 muestra la distribución de isovalores de RAS para la cuenca. Los valores obtenidos de RAS oscilaron entre 1 y 32 meq·l⁻¹, lo que refleja que, en términos del elemento sodio, la mayoría de los aprovechamientos representan un grado bajo de peligrosidad. Destaca la zona de la ciénaga con valores máximos y la parte alta de la cuenca con los valores menores.

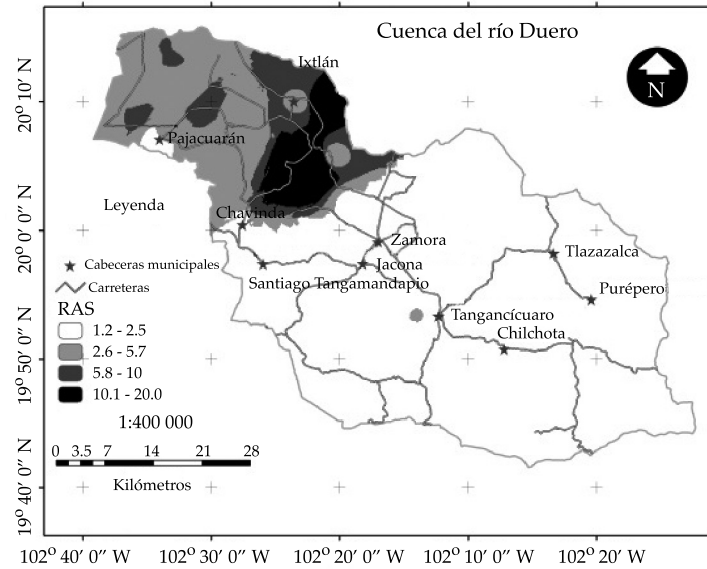


Figura 4. Mapa de isovalores de la relación de adsorción de sodio (RAS) en la cuenca.

En relación con la clase de agua presente, la figura 5 muestra la ubicación de manantiales y pozos, respectivamente, en el diagrama referido.

El agua de manantiales se clasifica principalmente como del tipo C1-S1, con bajo peligro de salinización y sodización, aptas para utilizarse en el riego agrícola sin restricción. Es decir, son aguas de excelente calidad química. Las clases de agua para los pozos

son predominantemente del tipo C2-S1 con salinidad media y bajas en sodio, pudiéndose utilizar en mayor medida en riego agrícola. La mayoría de ellos se ubican en un ambiente geológico de tipo fluvial.

En la región lacustre se encontraron aguas del tipo C3-S1, con peligrosidad alta a la salinización, por lo cual su uso debe restringirse al riego de productos tolerantes a dicha condición. Finalmente, el ambiente lacustre

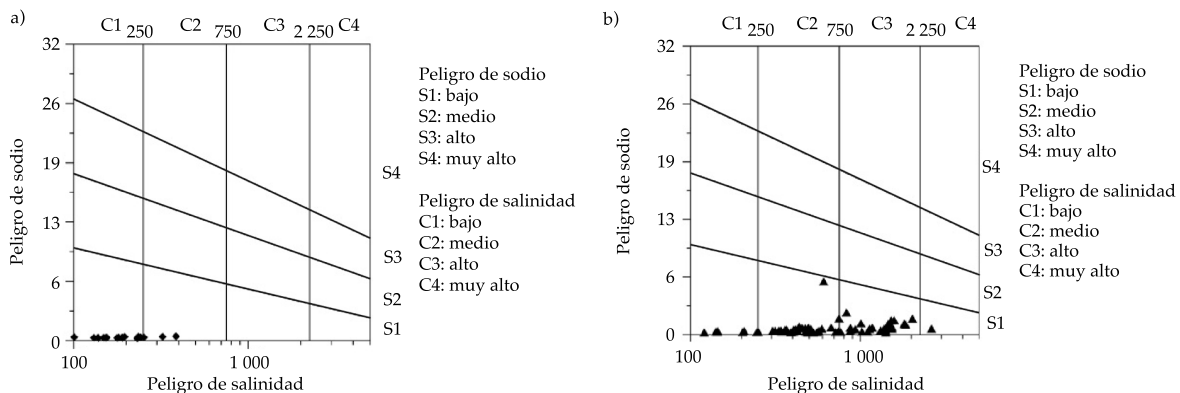


Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo de aguas subterráneas en el diagrama de H. Riverside: a) manantiales y b) pozos.

influenciado por hidrotermalismo, la clase de agua predominante, es C3-S3, con salinidad muy alta y peligro de sodio alto, por lo que su uso en la agricultura se debe restringir.

Lo anterior demuestra la interacción agua-roca como mecanismo de control de la calidad química del agua subterránea en la

cuenca hidrológica del río Duero para uso primordialmente agrícola (figura 6).

Por otra parte y con la utilización del diagrama de Piper, se puntualizaron las distintas facies químicas de agua presentes en la cuenca. La figura 7 muestra su distribución en el diagrama respectivo.

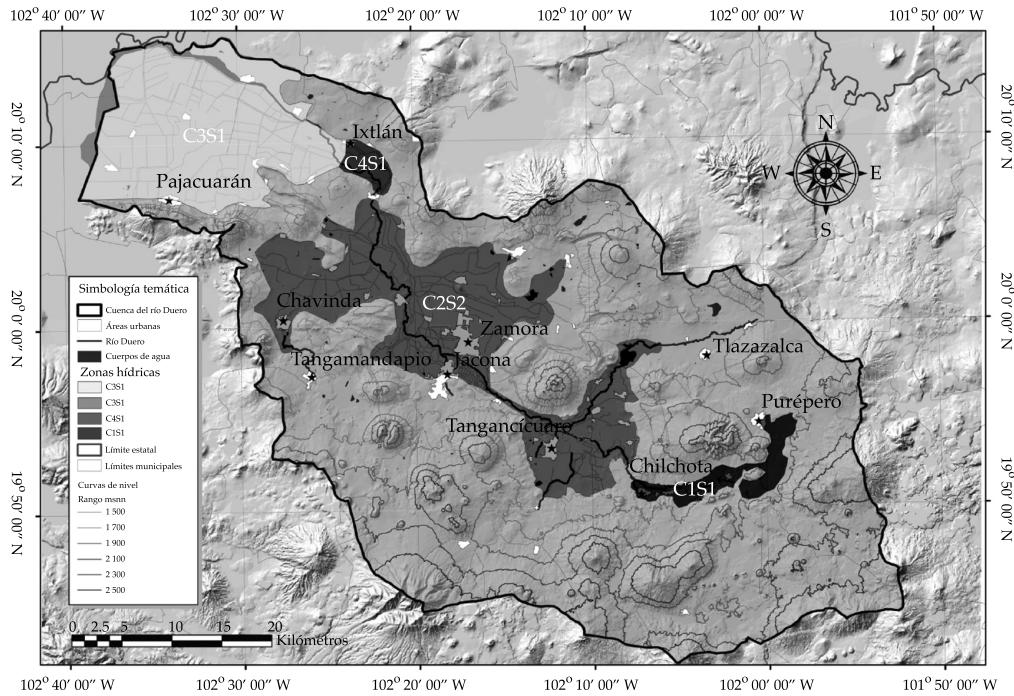


Figura 6. Distribución de las distintas clases de agua en la cuenca asociado con el ambiente geológico.

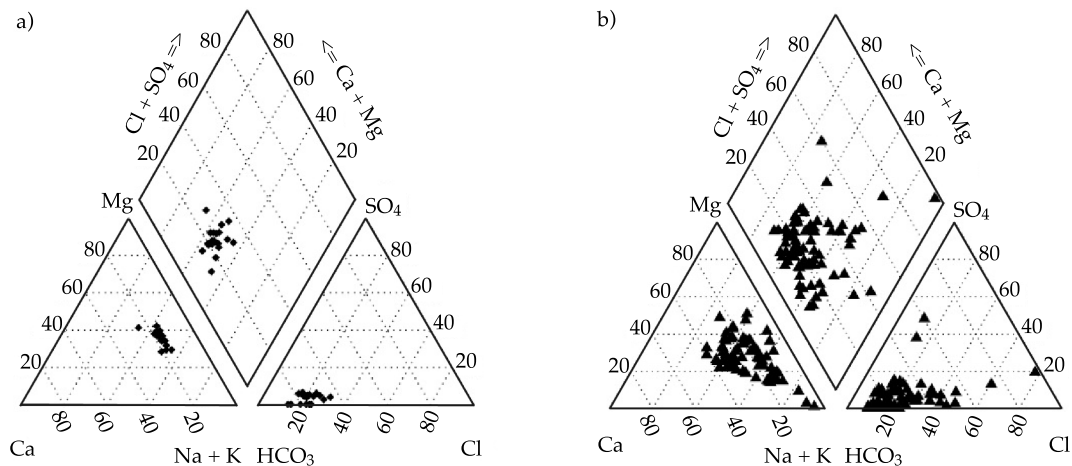


Figura 7. Ubicación del muestreo hidrogeológico en el diagrama de Piper: a) manantiales y b) pozos.

En general, tanto el agua de manantiales como de pozos se clasifica como de tipo bicarbonatada-sódica, que corresponde con aguas poco evolucionadas, consideradas como típicas de ambientes geológicos volcánicos.

Agua superficial

La figura 8 muestra la ubicación de los sitios de muestreo a lo largo del cauce del río Duero.

En cuanto a las variables ambientales, los valores de oxígeno disuelto fueron relativamente bajos a lo largo de todo el río (cuadro 3). El pH resultó tendiente a la acidez, aunque con cantidades muy aproximadas al valor neutro. Los valores de la conductividad eléctrica aumentaron de manera gradual, conforme se dirige de la parte alta a la parte baja de la cuenca.

De manera similar, la alcalinidad cambia de aguas blandas en la parte superior ($0-75 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a aguas duras en la parte baja de la cuenca ($150-300 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, con la clasificación de Sawyer

y McCarty, 1967). Otras variables, como el DBO_5 , presentan patrones de fluctuaciones, los cuales muestran procesos de dilución hacia la parte alta y procesos de sedimentación en la parte baja. Por su parte, aquellas variables que representan nutrientes derivados de drenajes y de residuos de fertilizantes de la agricultura indican sitios de mayor impacto por estas actividades, en especial en los valles (cuadro 3).

La interpretación de los valores ICA en los ocho manantiales analizados, en términos de su uso en la categoría de agua potable, indica que sólo el manantial de Carapan (origen del río Duero) muestra condiciones de excelente calidad (92 puntos; figura 9). La localidad del manantial de La Luz presenta contaminación leve. El resto de los manantiales, como es el caso de Camécuaro, Orandino y San José de Gracia, se clasifican como contaminados, destacando en particular la presencia de bacterias coliformes fecales.

En lo que respecta al cauce del río, se implementó la interpretación del índice en el

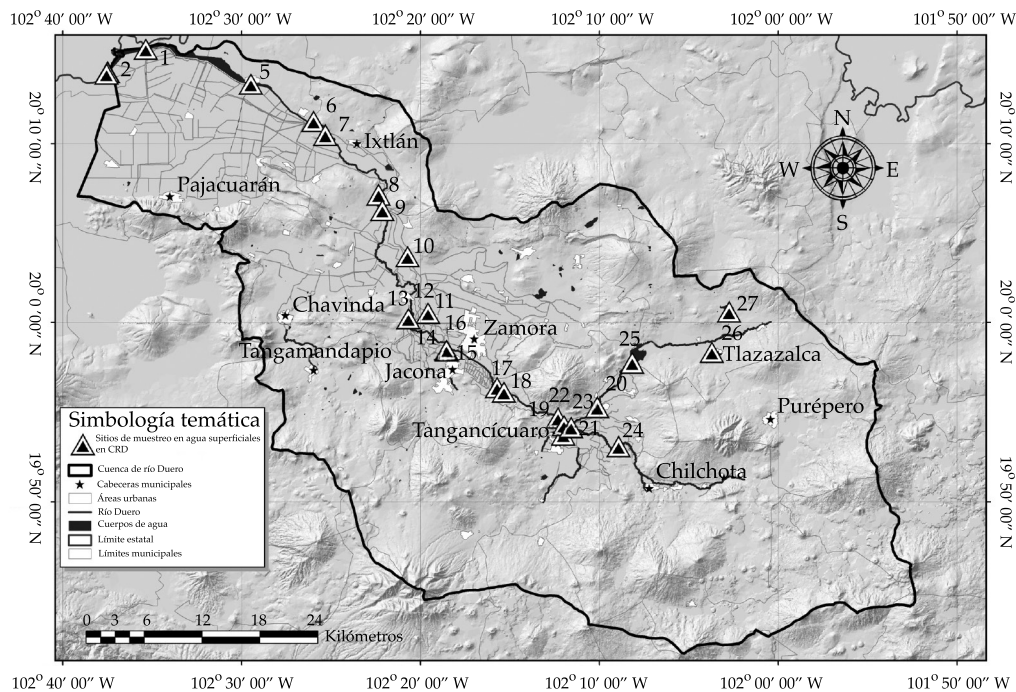


Figura 8. Localización de los sitios de muestreo en el cauce del río Duero.

Cuadro 3. Variables ambientales del río Duero: Temp = temperatura, OD = oxígeno disuelto, STS = sólidos totales suspendidos, Alc = alcalinidad, DBO = demanda bioquímica de oxígeno a cinco días, DQO = demanda química de oxígeno, C. fecales = coliformes fecales e ICA = índice de calidad del agua.

Muestra	Temp (°C)	% OD	OD (ppm)	STS (ppm)	pH	Alc total (ppm) como CaCO ₃	DBO ₅ (ppm)	DQO (ppm)	Fosfatos (ppm)	Nitratos (ppm)	C. fecales (NMP/100 mL)	ICA
Manantiales												
Carapan	16.18	86.2	5.1	0.1	6.44	178.3	0	0	0	0	0	92
Tacuro	16.6	57.3	4.08	0.11	6.92	189.8	1.6	2.4	0.7	7.97	24 000	60
San José de Gracia	17.97	75.5	5.13	0.08	6.45	58.2	0	0	0.34	16.83	930	68
Chilchota	16.73	57	4.02	0.11	6.7	179.1	1.1	1.6	0.79	19.05	240 000	56
Santo Tomás	16.3	55.5	4	0.12	6.65	184.5	0	0	0.75	3.54	2 300	64
Camécuaro	20.33	61.8	4.11	0.13	6.93	85.2	1.1	7	0.37	9.3	2 400	64
Orandino	22.97	59.8	3.78	0.1	7.73	237.9	0	0	0.32	3.99	230	69
La Luz	20.45	66.6	4.37	0.11	6.78	82	0	0	0.34	3.99	230	71
Cauce del río												
Presa La Yerbabuena	23.92	46.7	2.91	12.08	7.17	146.7	3.2	35	1.14	0	40	63
Río Tlazazalca	19.92	39.4	2.62	25.1	6.89	85.2	24.6	71	3.5	17.72	460 000	38
Presa Urepetiro	23.38	33.7	2.12	15.33	6.95	145.6	6.9	45	0.69	7.53	4 300	47
Duero ADV Gpe.	17.59	54.9	3.84	11.6	6.81	94	4.3	6	0.91	7.09	15 000	55
Duero DV Gpe.	18.79	63	4.32	11.83	6.59	94	4.3	6.2	0.81	7.97	23 000	55
Río Sagrario	19.87	39.4	2.54	18.07	6.66	116.5	9.4	37	3.64	28.35	2 400 000	39
Río Urepetiro	19.2	62.3	4.24	18.99	6.6	100.9	8.6	36	0.82	4.43	9 000	55
Las Adjuntas	17.88	57.2	4.03	12.41	6.63	99.2	3.9	13	0.91	6.09	93 000	54
Unión Tangacícuaru	17.92	58	4.01	12.28	6.48	93.8	3.6	9.8	1.03	6.65	23 000	54
El Platanal	19.16	67.1	4.57	14.74	6.82	173.8	3.5	15	0.98	15.95	43 000	56
El Platanal-libramiento	18.57	68.5	4.72	12.22	6.71	102.5	0.5	9.5	0.75	14.62	9 000	62
Unión río Duero-río Celio	19.13	63.7	4.27	12.53	6.45	85.2	4.4	32	0.8	15.51	23 000	53
Río Duero	19.08	52	3.55	12.62	6.57	95	4.5	20.5	0.91	8.64	43 000	51
Río Celio	20.26	60.5	3.98	11.31	6.78	85	0.8	1.3	0.59	5.98	43 000	60
Puente Los Espinos	20.78	76.1	5.02	13.54	6.58	171.3	10.8	26.5	4.78	7.53	93 000	51
Antes planta tratamiento	20.53	69.2	4.55	13.58	6.51	156.9	4.4	23	1.7	15.95	93 000	52
Después planta tratamiento	25.7	84.8	5.04	39.04	7.56	280.5	53.5	122	4.96	14.18	24 000	48
Dren A	20.81	65.7	4.16	15.02	6.47	125.4	6	10.8	1.96	7.97	93 000	51
Dren Colongo	20.85	51.1	3.37	14.58	6.61	107.9	5.7	25	1.16	7.53	460 000	49
La Estanzuela	20.93	46.3	2.99	14.73	6.6	144.1	6.9	20	2.02	13.29	93 000	45
Dren Camucuat	23.21	14	0.8	42.36	6.78	114.4	4	40	2.28	3.54	110 000	44
San Cristóbal	21.57	63.9	4.06	16.1	6.8	137.2	5.4	26	2.59	8.2	110 000	51
El Capulín	22.26	38.4	2.46	16.44	6.65	149.2	8.4	55	1.39	7.31	46 000	44
Puente Cumuato	24.53	55.7	3.32	23.97	6.81	130.5	6.2	35.5	2.0175	6.53	230	53
Duero-Ibarra	23.66	59.9	3.68	18.2	6.59	136	3.2	17.5	0.89	3.32	40	64
Río Lerma	23.42	47.4	2.48	22.17	6.66	201.5	3.9	26.8	3.04	8.64	110 000	46
Unión Duero-Lerma	23.43	25.4	1.53	21.47	6.72	106	5.9	21.5	1.39	10.19	46 000	42

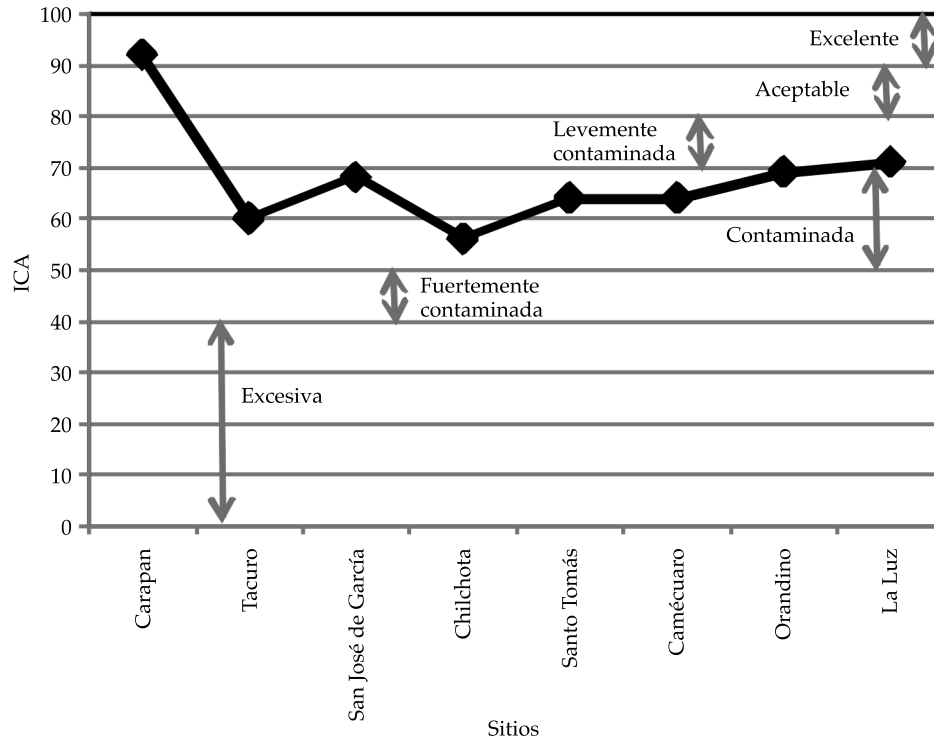


Figura 9. Variación del ICA para el uso de agua potable en los manantiales del río Duero.

aspecto agrícola, quedando los diferentes sitios en la condición de levemente contaminado y contaminado. Destacan como los sitios de mayor contaminación el río Tlazazalca y río El Sagrario en Tangancícuaro, este último recibiendo las descargas domésticas de la capital municipal y de actividades agropecuarias, lo que degrada su calidad del agua de manera importante. Otros lugares con valores bajos del ICA son la presa Urepetiro, La Estanzuela, dren Camucuat y El Capulín (figura 10).

El análisis de las fluctuaciones del valor del ICA a lo largo del trayecto del río refleja procesos de concentración de contaminantes y de su dilución por la entrada de aguas menos deterioradas, como de los manantiales. Cabe destacar que en la parte final del trayecto, antes de la desembocadura en el río Lerma, cambia de contaminado en El Capulín, a levemente contaminado en Cumuato e Ibarra, porque esta zona es más léntica y se tiene un proceso de sedimentación.

Un comparativo realizado para los últimos 20 años muestra el avance del deterioro que manifiesta el río Duero en términos de calidad de agua. Por ejemplo, el oxígeno disuelto en algunos tramos distribuidos a lo largo del río disminuye, rebasando los límites de tolerancia de los organismos acuáticos (La Estanzuela y Briseñas).

La figura 11 muestra tal tendencia, comparándose valores actuales con datos reportados por López (1988) para esas localidades. También se registra un incremento en los valores de turbidez de hasta dos órdenes de magnitud en algunos sitios (López obs. pers.), lo que está directamente relacionado con la erosión y descargas.

Por su parte, los nutrientes también aumentaron al comparar cuatro años. Destaca en particular que la diferencia entre los años se da principalmente entre los tres primeros, que fueron monitoreados de manera seguida en la década de 1980 y el valor obtenido en

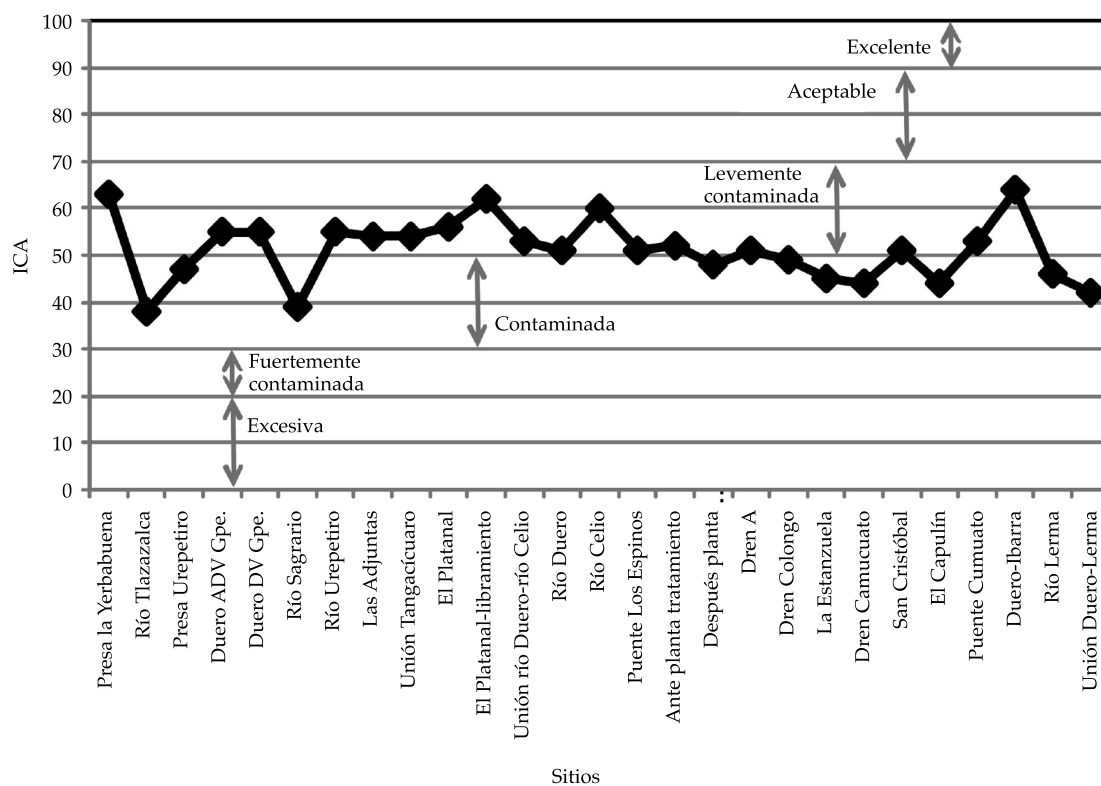


Figura 10. Variación del ICA para el uso de agua de riego en diferentes sitios del cauce del río Duero.

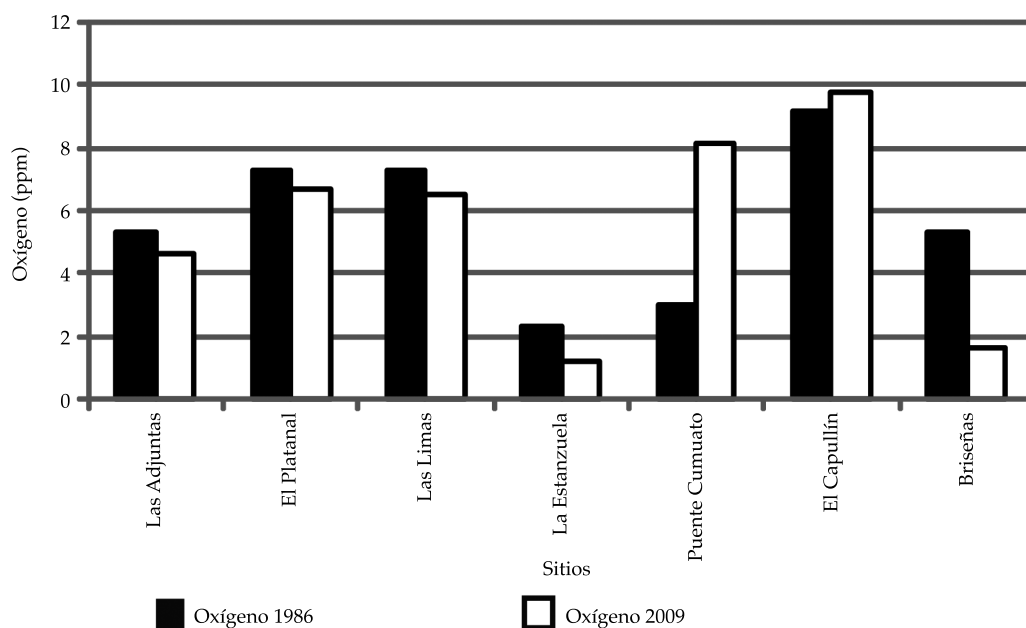


Figura 11. Cambios en el tiempo de la concentración de oxígeno disuelto (ppm).

el 2009, indicando una diferencia estadística importante ($F = 15.73$, $p = 0.0001$) (cuadro 4).

Discusión

Los problemas de contaminación de cuencas en México se han agudizado al paso del tiempo. Su deterioro se ve reflejado en los afluentes y reservorios, los cuales indican el estado de salud de la cuenca, de lo que pasa en ella. Esto es especialmente importante debido a que gran parte de la actividad económica que se desarrolla depende de la calidad del agua disponible en las cuencas. Para describir esta calidad se pueden tener diferentes aproximaciones, desde la clasificación en escalas de uno hasta tres parámetros, el análisis de diferentes parámetros de una manera individual o multivariada, por medio de estadísticos de agrupación u ordenación, hasta la implementación de índices.

El organismo encargado de monitorear la calidad del agua en México es la Conagua, la cual emplea índices de acuerdo con parámetros químicos. Antes del año 2002, la Conagua utilizó un índice de calidad del agua basado en un promedio ponderado de los índices de calidad de 18 parámetros representados en una escala de 0 a 100. El uso de este método colocó

73% de las corrientes de agua superficial en la condición de contaminado (Conagua, 2001).

Posterior al 2002, la Conagua decidió cambiar la forma en que se establece la calidad del agua de aguas superficiales. Para ello utiliza principalmente de manera independiente los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST) (Conagua, 2011). El valor resultante de estos parámetros se contrasta con un criterio de clasificación de la calidad del agua. A pesar de que es una forma más sencilla, rápida y efectiva —en términos de costos— de obtener una valoración de dicha calidad, también presenta ciertas limitantes.

La principal limitante en el caso del DBO y DQO es que determina aquellos efectos debido a los cambios en las descargas orgánicas, implicando que la calidad está siendo definida en relación con la contaminación por materia orgánica. Los SST indican, sin discriminar, la presencia de diferentes elementos: limo, arcillas, sedimentos de escorrentías, plancton, desechos industriales y de aguas residuales, entre otros, presentes en el agua. Esto crea una tendencia a mostrar que el panorama en general es mejor de lo que realmente está (SEPA, 2013). Para corroborar lo anterior, cuando se realiza el análisis de la situación de la calidad del agua

Cuadro 4. Análisis Tuckey HSD para comparaciones múltiples en cuatro años de la variable nitratos en seis sitios de muestreo.

(I) Años	(J) Años	(I-J)	Error estándar	Sig.	Límite inferior	Límite superior
1984	1985	0.2298	0.4185	0.946	-0.9416	1.4013
	1986	-0.4408	0.4185	0.721	-1.6323	0.7306
	2009	-1.7632*	0.4185	0.002	-2.9346	-0.5917
1985	1984	-0.2298	0.4185	0.946	-1.4013	0.9416
	1986	-6.71E-01	0.4185	0.4	-1.8421	0.5008
	2009	-1.9930*	0.4185	0.001	-3.1644	-0.8216
1986	1984	0.4408	0.4185	0.721	-0.7306	1.6123
	1985	6.71E-01	0.4185	0.4	-0.5008	1.8421
	2009	-1.3223*	0.4185	0.23	-2.4938	-0.1509
2009	1984	1.7632*	0.4185	0.002	0.5917	2.9346
	1985	1.9930*	0.4185	0.001	0.8216	3.1644
	1986	1.3223*	0.4185	0.023	0.1509	2.4938

* significativo al 0.05

con estos criterios en el año 2004, se tuvo un cambio a tan sólo un 17.4% de los ecosistemas acuáticos con algún grado de contaminación (Conagua, 2004).

En el caso del río Duero, también se identifican diferencias al aplicar los distintos criterios con respecto al ICA. En los manantiales, el DBO, DQO y SST dan la clasificación de Excelente, mientras que en el ICA sólo el de Carapan alcanza dicha categoría, y la mayoría está al nivel de Contaminado. Esto se relaciona en buena medida con la presencia de coliformes fecales, incluso *Escherichia coli*, que se utilizan como indicadores de posible contaminación por patógenos. Además, los nutrientes —nitratos y fosfatos— en algunos casos alcanzaron valores elevados y están ligados con procesos de eutroficación.

En el cauce del río, aun con un criterio menos estricto —uso agrícola— y equiparando las categorías —dándoles el nombre equivalente—, no hay concordancias entre los indicadores. Incluso se llega en el sitio de la unión del Duero con el Lerma a tener cada indicador una categoría diferentes (DBO: Buena Calidad; DQO: Aceptable; SST: Excelente, e ICA: Contaminada). También cambian las proporciones por criterio; mientras que en el DBO se tiene un 26% de sitios catalogado como aceptable, en el DQO es 48% y en el ICA 63%. Por su parte, 4% de sitios está contaminado de acuerdo con el DBO; 19% en el DQO, y 37% en el ICA.

Esto no significa que se esté siguiendo un criterio erróneo, de antemano se ha reconocido el valor del DBO como indicador y se ha registrado durante extensos periodos de tiempo en diferentes países como el caso de Inglaterra (Callow, 1990). Ellos incluyen además parámetros físicos con los que se cuentan en México, como el flujo del río y la temperatura, al igual que nutrientes como el nitrógeno amoniacal y el fósforo total. Ambos se relacionan con fertilizantes, ganadería, y aguas residuales industriales y domésticas (SEPA, 2013). Por su parte, si bien los ICA proveen valores significativos que indican la salud del recurso hídrico, y crean un criterio

para medir y calcular la calidad del agua, también presentan imprecisiones.

El ICA propuesto (NSFWQI) se ha señalado como no muy objetivo, porque un grupo de expertos califica y escala los parámetros de calidad del agua que se utilizan —apodado como método Delphi— y dicho escalamiento puede cambiar en la apreciación de otro grupo (Lumb, 2011). Incluso el índice se ha modificado para atender las necesidades específicas de los estados, como en el caso de Oregon (OWQI; Cude, 2008) e Iowa en los Estados Unidos (IDNR, 2013). Su implementación en el presente trabajo parte no sólo de su aún común implementación, además de su formulación multiplicativa que le da robustez en cuanto al mejor ajuste a las opiniones de los expertos, sino a la disponibilidad de la información para incorporar un mayor número de sitios.

Más aún, el ICA en sus diferentes modalidades proporciona una visión parcial sobre la salud de los ecosistemas acuáticos. Cuando se desea evaluar el estado de los ecosistemas es importante incorporar de manera adicional el uso de índices biológicos; entre los más utilizados se encuentran el Índice Biótico Estendido (IBE) y el Índice de Integridad Biótica (IBI), basado en macroinvertebrados y peces, respectivamente. Estos índices se han propuesto en diferentes ocasiones para cuerpos de agua mexicanos (Weigel et al., 2002; López et al., 2007; Mathurieu et al., 2011). Ante esta situación se debe establecer un esfuerzo conjunto para monitorear de forma integral los ecosistemas acuáticos, aunque no sea de manera continua, pero sí con cierta periodicidad.

En la cuenca del río Duero es muy clara la tendencia a un creciente proceso de degradación, según se demostró en el análisis temporal. Esto es crítico, dado que la principal actividad económica de la región es la agricultura. En el ámbito nacional, se distingue por ser la principal productora de fresa, y en los últimos tres años, en cultivos de frutillas, como zarzamora, arándanos y frambuesa.

Entre las problemáticas que afectan a estos cultivos se tiene principalmente la calidad

del agua para su riego. El mercado externo requiere productos con alta inocuidad. Tiempo atrás, el agua de riego utilizada era la del río, sin embargo hoy en día esto es imposible por el deterioro de su calidad.

La problemática sentida en la calidad del agua superficial fue el detonador de la apertura de una gran cantidad de pozos profundos para explotar el agua subterránea, pasando de un registro de 150 aprovechamientos para el año 2000 a 805 en la actualidad (REPD-CONAGUA). La apertura de estas concesiones se ha realizado sin planeación alguna, como lo demuestra la alta concentración de pozos, pudiéndose encontrar hasta 20 pozos por áreas de 4 km². La figura 12 muestra esta problemática, definiéndose tres niveles: baja (0-2), moderada (3-4) y alta (> 4); como consecuencia, se inicia un círculo vicioso de perforación de pozos que puede propiciar su agotamiento.

Aunado a lo anterior está la calidad del agua subterránea, que si bien en términos generales es buena para la cuenca, hay sitios donde la gran presencia de sales (en los alrededores de Ixtlán) llega a causar problemas de salinización de los suelos. En estos casos se requiere un pretratamiento.

Conclusiones

El estudio hidrogeológico del agua subterránea en la cuenca demostró la interacción agua-roca como mecanismo de control de su calidad química para uso primordialmente agrícola. La clase de agua predominante es C1-S1, baja en salinidad y en sodio, pudiéndose utilizar en la mayor parte de los cultivos, así como en cualquier tipo de suelos, sin desarrollar peligro por salinidad y sodicidad.

La problemática principal en la cuenca con respecto al recurso hídrico es la mala calidad

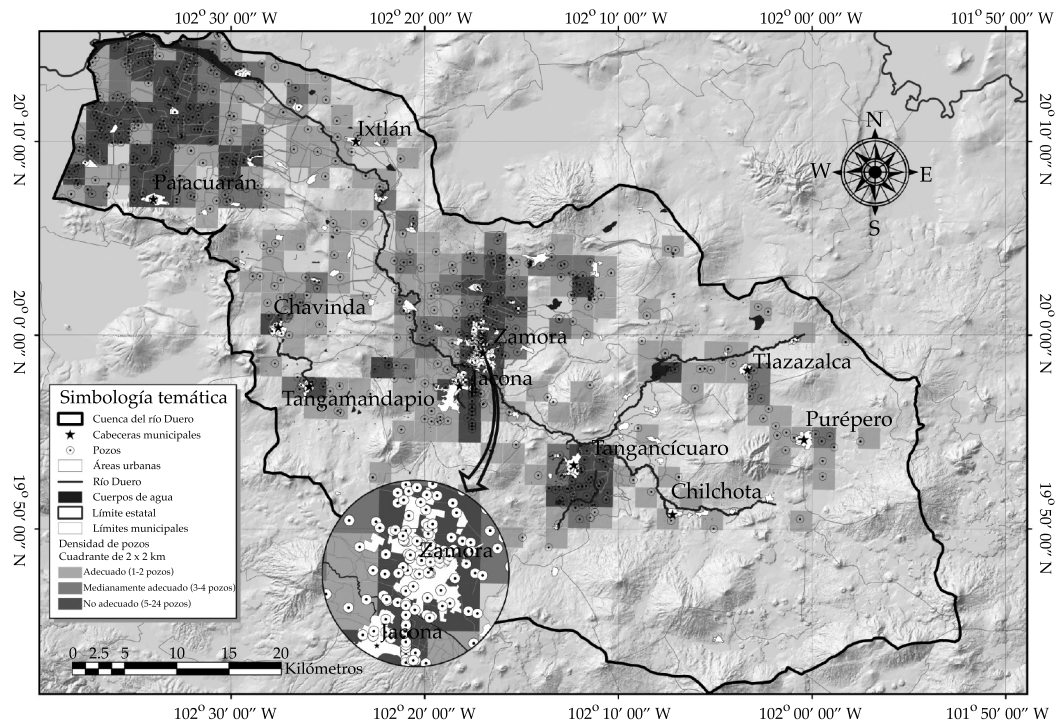


Figura 12. Densidad de pozos por cuadrantes de 2 x 2 km en la cuenca del río Duero. La imagen muestra la marcada sobre posición de dominios entre ellos.

del agua del río Duero, relacionada con las descargas directas de aguas residuales, por lo general de origen urbano, detectadas a lo largo del río. Es resultado de la falta de compromiso por parte de las autoridades municipales por cumplir con su responsabilidad de saneamiento y se complica de acuerdo con el esquema normativo, que permite se mezcle el agua de manantiales con las descargas urbanas. También un factor decisivo es la poca coordinación entre autoridades en los tres niveles de gobierno para el desarrollo de acciones, y una escasa o nula cultura del agua entre los pobladores de la cuenca.

Agradecimientos

Este proyecto se realizó gracias al financiamiento otorgado por la Comisión Nacional del Agua en el estado de Michoacán y el Instituto Politécnico Nacional. Se agradece el apoyo otorgado por la Comisión de Cuenca del Río Duero.

Recibido: 18/09/2011

Aceptado: 20/02/2013

Referencias

- APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed. New York: APHA, 1998.
- BROWN, R.M., McCLELLAND, N.I., DEININGER, R.A., and LANDWEHR J.M. *Validating the WQI*. The paper presented at national meeting of American Society of Civil Engineers on Water Resources Engineering. Washington, D.C.: 1973.
- CALLOW, P. River Water Quality. British Ecological Society. *Ecological Issues*. Vol. 1, 1990, pp. 1-43.
- CONAGUA. *Programa Hidráulico Nacional 2001-2006*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2001.
- CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México, 2004*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2004.
- CONAGUA. *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*, México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- CONAGUA. *Programa detallado de acciones para el proyecto emblemático Saneamiento Integral de la Cuenca del Río Duero*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2009, 142 pp.
- CUDE, C.G. *Interpretation and communication of water quality data using the Oregon water quality index (OWQI)*. Portland: State of Oregon Department of Environmental Quality, Laboratory and Environmental Assessment Division, 2008, www.deq.state.or.us/lab/wqm/wqindex.htm
- IDNR. 2013. <http://www.igsb.uiowa.edu/wqm/Data/WQI/WqiMonthly.htm>.
- LEÓN, A.C.L., GUZMÁN, A.M. y CONTRERAS, S.B. *Estudio ictiológico del río Duero. Michoacán, México*. IX Congreso Nacional de Zoología, Villahermosa, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 1987.
- LÓPEZ, E.S. *Ecología y biología de Goodea atripinnis Jordan (Pisces: Goodeidae) en el río Duero, Michoacán*. Tesis profesional. México, D.F.: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 1988.
- LÓPEZ, H.M., GUZMÁN, A.M. y OLIVA, G.I. *Caracterización biológica y fisicoquímica del río Duero*. Guadalajara, México: Seminario Internacional La Tierra, Guadalajara, Centro de Ciencias de la Tierra, Instituto de Limnología, Universidad de Guadalajara, 1990.
- LÓPEZ, H.M., RAMOS, M.G., CARRANZA, F.J. Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala, México. *Hidrobiológica*. Vol. 17, núm. 1, 2007, pp. 17-30.
- LUMB, A.T., SHARMA, C., BIBEAL, J.F. A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*. Vol. 3, No. 1, 2011, pp. 11-24.
- MATHURIAU, C., MERCADO-SILVA, N., LYONS, J. y MARTÍNEZ-RIVERA, L.M. Los peces y macroinvertebrados como bioindicadores para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos en México: estado actual y perspectivas. Cap. 32. En: *Los retos de la investigación del agua en México*. Úrsula, O.S. (editora). 2011, pp. 363-374.
- MITCHELL, M. and STAPP, W.B. *Field Manual for Water Quality Monitoring*. Twelfth Edition, 2000.
- NOM-112-SSA1. Bienes y servicios. *Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable*, 1994.
- NORMAS RIVERSIDE, U.S. *Soild Salinity Laboratory*, 1954.
- PACHECO-VEGA R. Construyendo puentes entre la política ambiental y la política de tratamiento de aguas en la cuenca. *Economía, Sociedad y Desarrollo*. Vol. VI, núm. 4, 2007, pp. 995-1024.
- PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2006-2012. Disponible en *World Wide Web*: www.presidencia.gob.mx.
- PORRAS-MARTÍN, J., LÓPEZ-GUERRERO, P.N., ALVAREZ-FERNÁNDEZ, C., FERNÁNDEZ-URÍA, A. y GIMENO, M.V. *La composición química de las aguas subterráneas naturales*. Instituto Geológico y Minero de España. Informe Técnico, 1985, 80 pp.
- SAWYER, C.N., and McCARTY, P.L. *Chemistry for sanitary engineers*. New York: McGraw-Hill, 1967.
- SEPA. *Trends in Scottish river water quality*. Scottish Environment Protection Agency, 2013, Disponible en *World Wide Web*: http://www.sepa.org.uk/science_

and_research/data_and_reports/water/scottish_river_water_quality.aspx.

VANDERZANT, C., and SPITTSTOESSER, D.F. *Compendium of methods for the microbiological examination of foods*. 3rd. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association Inc., 1992.

WEIGEL, B.M., HENNE, L.J., MARTÍNEZ-RIVERA, L.M. Macroinvertebrate-based index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico. *Journal of the North American Benthological Society*. Vol. 21, No. 4, 2002, pp. 686-700.

Abstract

SILVA, J.T., MONCAYO, R., OCHOA, S., ESTRADA, F., CRUZ-CÁRDENAS, G., ESCALERA, C., VILLALPANDO, F., NAVA, J., RAMOS, A. & LÓPEZ, M. Groundwater and surface water quality in the Duero River basin, Michoacan. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 127-146.

This work describes the chemical quality of groundwater and surface water resources in the Duero River basin. The groundwater was analyzed by a hydrogeochemical study of 97 water sources (20 springs and 76 wells) during the dry season. The Water Quality Index (NSFWQI) was used for 35 surface water sites, with eight variables divided according to springs and the river. The overall groundwater quality was good and was associated with the basin's rocks and geology. The predominant class was C1-S1, with low salinity and sodium, useful for most crops and any soil types, with no risks due to salinity and sodicity. Based on the NSFWQI values obtained for potable water, most of the springs were classified as contaminated, except for the Carapan spring (excellent quality, 92 points). On the main river channel, with agriculture use, 75% of the sites were determined to be contaminated and the rest slightly contaminated. The comparison of nitrates over 20 years presented a statistically significant difference ($F = 15.73$, $p = 0.0001$), indicating a significant increase in nutrients in the river. Finally, despite a positive water balance, the increasing deterioration in the quality of the water in the river leads to groundwater extraction and the resulting overexploitation of the aquifer.

Keywords: hydrogeochemical analysis, pollution, overexploitation, water quality index.

Dirección institucional de los autores

Dr. José Teodoro Silva

Dr. Rodrigo Moncayo

M.C. Salvador Ochoa

M.C. Francisco Estrada

M.C. Gustavo Cruz Cárdenas

M.C. Carlos Escalera

Arq. Fabián Villalpando

Biól. Jaime Nava

Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional, Unidad Michoacán-Instituto
Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN-Michoacán)

Justo Sierra 28

59510 Jiquilpan, Michoacán, México

Teléfono: +52 (353) 5330 218

tsilva09@hotmail.com

rmoncayo@hotmail.com

sochoae@colpos.mx

ingestrada01@hotmail.com

gcruz@colpos.mx

cescalera@ipn.mx

fvillalpando@ipn.mx

jnavav@ipn.mx

Dr. Alfredo Ramos

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica,
A.C. (IPICYT)

Camino a la Presa San José 2055

28216 Lomas, 4ª Sección, San Luis Potosí, San Luis Potosí,

México

jalfredo@ipicyt.edu.mx

Dr. Martín López

Laboratorio de Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, delegación Coyoacán

04510 México, D.F., México

Teléfono: +52 (55) 5622 5815

mlopez@hotmail.com