

La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica

Conductivity as a predictive parameter of hardness in groundwater and spring water of Costa Rica

Yuliana Solís-Castro¹, Luis Alberto Zúñiga-Zúñiga²,
Darner Mora-Alvarado³

Fecha de recepción: 3 de mayo de 2017
Fecha de aprobación: 11 de agosto de 2017

Solís-Castro, Y; Zúñiga-Zúñiga, L; Mora-Alvarado, D. La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-1. Enero-Marzo 2018. Pág 35-46.

DOI: 10.18845/tm.v31i1.3495



- 1 Licenciada en Ingeniera Química. Laboratorio Nacional de Aguas. Área de Química en agua potable & Unidad de Investigación en agua, ambiente y salud. Costa Rica. Correo electrónico: ysolis@aya.go.cr
- 2 Licenciado en Química. Laboratorio Nacional de Aguas. Área Química en Agua Potable. Costa Rica. Correo electrónico: lzuniga@aya.go.cr
- 3 Licenciado en Microbiología y Química Clínica. Máster en Salud Pública. Director del Laboratorio Nacional de Aguas. Costa Rica. Correo electrónico: dmora@aya.go.cr

Palabras clave

Conductividad eléctrica; dureza total; dureza de calcio; agua para consumo humano.

Resumen

El presente estudio se elaboró con el objetivo de determinar las relaciones entre la conductividad, respecto a las concentraciones de dureza total y dureza de calcio en pozos y nacientes utilizados para consumo humano en Costa Rica. Se seleccionaron 1948 pozos y 2699 nacientes evaluados durante 2013-2015, en el marco del Programa Nacional de Vigilancia y Control de Calidad del Agua para Consumo Humano del Laboratorio Nacional de Aguas. Se definieron ámbitos de conductividad de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 549 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para pozos y de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 499 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para nacientes. Con base en los promedios se calculó la relación de la conductividad contra la dureza total y la dureza de calcio para cada tipo de fuentes de agua. Los resultados indican que, la relación de la conductividad con la dureza total del agua de los pozos obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) de 0,9931 y en las nacientes de 0,9958. Por otro lado, en el caso de la dureza de calcio se alcanzó un R^2 de 0,9922 y 0,9942 para pozos y nacientes respectivamente. La aplicación de las curvas de calibración obtenidas, utilizando el agua de 20 pozos y 20 nacientes muestreados en el 2016 y el 2017, logró comprobar y concluir que la conductividad (en situaciones normales) es buen indicador indirecto de las concentraciones de dureza total y dureza de calcio. Se recomienda la medición de la conductividad en campo para estimar la dureza total y de calcio en pozos y nacientes.

Keywords

Electrical conductivity; total hardness; calcium hardness; drinking-water.

Abstract

The aim of the study is to determine the relations between conductivity with total hardness and calcium hardness in groundwater and spring water used as drinking-water sources in Costa Rica. Firstly, 1948 wells and 2699 springs evaluated between 2013-2015 were selected from the Drinking-Water Quality Control Program of the National Water Laboratory. Secondly, conductivity ranges were defined for wells from 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 549 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 499 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for springs. Based on the averages, the relation of conductivity with total hardness and calcium hardness were calculated for each type of water source. According to the results, the correlation coefficient (R^2) between conductivity and total hardness was 0,9931 in wells and 0,9958 in springs. On the other hand, R^2 between conductivity and calcium hardness was 0,9922 in wells and 0,9942 in springs. Calibration curves were applied in 20 wells and 20 springs drinking-water samples between 2016 to 2017. The results showed that conductivity (in normal situations) is a good indirect indicator for total and calcium hardness in groundwater and spring water. Conductivity measured *in situ* is recommended to estimate total and calcium hardness in groundwater and spring water.

Introducción

La conductividad eléctrica (CE) del agua es una medida de la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica. En el Sistema Internacional de Unidades la CE se expresa como siemens por metro (S/m), pero por simplicidad se utiliza $\mu\text{S}/\text{cm}$ a una temperatura de 25°C. La conductividad del agua está relacionada con la concentración de las sales en disolución, cuya

disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua.

La dureza del agua representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos en el agua, fundamentalmente calcio (Ca) y magnesio (Mg) provenientes de la disolución de rocas y minerales. Su forma de expresión más conocida es en mg/L como carbonato de calcio (CaCO_3). Existen diferentes tipos de dureza [1]:

- Dureza total: se refiere a la concentración de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua.
- Dureza carbonatada o temporal: es la que se refiere específicamente a la producida por los hidrogeno carbonatos y carbonatos de calcio y magnesio.
- Dureza no carbonatada o permanente: es la producida por las sales de cloruro, sulfato y nitrito de calcio y magnesio.

Asimismo, las aguas pueden clasificarse de acuerdo a su contenido de dureza en [2]:

- Aguas blandas: < 60 mg/L
- Aguas ligeramente duras: (60-120) mg/L
- Aguas moderadamente duras: (120-180) mg/L
- Aguas duras: > 180 mg/L

Si bien es cierto, la dureza es uno de los componentes en el agua que generan la conductividad, existen otros iones capaces de incrementarla; por ejemplo, el agua cargada con cloruro de sodio como es el caso de la intrusión salina en acuíferos [2]. Sin embargo, en la mayoría de las aguas subterráneas (pozos y nacientes) existe una relación muy alta entre la conductividad y la dureza [3].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que las aguas duras pueden generar incrustaciones en los sistemas de distribución y que, por el contrario, las aguas blandas pueden corroerlos [4]. Por otro lado, la aceptabilidad puede variar de acuerdo a las poblaciones; se dice que el umbral gustativo del ion calcio se encuentra entre 100 mg/L y 300 mg/L dependiendo del anión asociado y que el umbral del magnesio es menor que el del calcio. No obstante, algunos consumidores pueden tolerar durezas mayores a 500 mg/L [5].

Varios estudios epidemiológicos han demostrado una relación entre el agua dura y la protección contra enfermedades cardiovasculares [4] [5] [6] [7]. En Costa Rica, en la “Zona Azul” de la Península de Nicoya se comprobó una relación entre la dureza del agua y la longevidad de la población [8]. Por el contrario, otros estudios han observado una relación positiva entre aguas muy duras y la prevalencia de Litiasis Renal en varias poblaciones a nivel mundial [9] [10].

El Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) cuenta con una base de datos donde se pueden consultar datos analíticos de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento en Costa Rica. Esto permite utilizar dichos datos para obtener información y su posible aplicación en busca de mejoras, tanto en interpretación como en simplificación de los criterios analíticos. De forma que, al observar algunos datos, se pueda inferir acerca de la calidad del agua y de otros posibles parámetros relacionados, como por ejemplo relacionar la conductividad con la dureza del agua.

A raíz de la vinculación de la dureza del agua con la salud del consumidor, y con el propósito de evitar la duplicación de esfuerzos disminuyendo el número de ensayos de laboratorio y minimizando, al mismo tiempo, el gasto económico, se realiza el presente estudio. Éste busca

definir la relación que exista entre conductividad y dureza en el agua proveniente de pozos y nacientes utilizadas como fuentes de abastecimiento en Costa Rica.

El objetivo principal del estudio es determinar las relaciones existentes entre la conductividad, con respecto a la dureza total y la dureza de calcio en pozos y nacientes utilizadas como fuentes de abastecimiento en Costa Rica.

Metodología

Para cumplir con el objetivo del estudio se aplicaron los siguientes pasos:

- Se utilizaron los datos generados por el Programa Nacional de Vigilancia y Control de Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica por el LNA.
- Se recompiló la información sobre conductividad, dureza total y dureza de calcio para todas los pozos y nacientes analizadas durante el periodo 2013-2015 en los acueductos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), acueductos municipales y acueductos Rurales.
- Se trabajó en un ámbito de conductividad de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 549 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para pozos y de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 499 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para nacientes.
- Se determinó la cantidad de pozos y nacientes en función de los ámbitos de conductividad antes señalados.
- Se determinó el porcentaje de dureza de calcio y dureza de magnesio presente en la dureza total para diferentes ámbitos de conductividad, para los pozos y nacientes por separado.
- Para los pozos, se promedió la conductividad, la dureza total y la dureza de calcio de acuerdo a los siguientes ámbitos de conductividad: (50-99) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (100-149) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (150-199) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (200-249) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (250-299) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (300-349) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (350-399) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (400-449) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (450-499) $\mu\text{S}/\text{cm}$ y (500-549) $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Para las nacientes, se promedió la conductividad, la dureza total y la dureza de calcio de acuerdo a los siguientes ámbitos de conductividad: (25-49) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (50-99) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (100-149) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (150-199) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (200-249) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (250-299) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (300-349) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (350-399) $\mu\text{S}/\text{cm}$, (400-449) $\mu\text{S}/\text{cm}$ y (450-499) $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Con los promedios se calculó la relación de la conductividad versus la dureza total y de la conductividad versus la dureza de calcio, para los pozos y nacientes por separado.
- La dureza de magnesio se calculó matemáticamente a partir de la dureza total y la dureza de calcio.
- Las relaciones matemáticas obtenidas se aplicaron a 20 resultados analíticos de conductividad para pozos y 20 para nacientes, realizados desde marzo del 2016 hasta marzo del 2017. Los resultados teóricos obtenidos de dureza total y dureza de calcio y los resultados analíticos para dichos parámetros, permitieron calcular la diferencia entre los mismos.

Para la determinación analítica de la conductividad, dureza total y dureza de calcio se utilizaron las siguientes técnicas:

- Para la determinación de la conductividad se utilizó la técnica electrométrica.
- Para la determinación de la dureza total y la dureza de calcio, la técnica utilizada fue la valoración volumétrica con EDTA.

Resultados y discusión

Cantidad y porcentaje de fuentes analizadas por ámbito de conductividad

La mayoría de las fuentes de abastecimiento presentan conductividades que oscilan alrededor de (50-549) $\mu\text{S/cm}$ para pozos y de (25-499) $\mu\text{S/cm}$ para nacientes, salvo algunas excepciones. Por este motivo, se escogieron resultados analíticos cuyas conductividades oscilaban dentro de estos ámbitos. Se utilizó 1946 y 2699 reportes analíticos para pozos y nacientes respectivamente.

En la figura 1 y la figura 2 se representan los porcentajes correspondientes a la cantidad de muestras utilizadas en el estudio según los diferentes ámbitos de conductividad para pozos y nacientes respectivamente. En la figura 1 se puede observar que un alto porcentaje de los pozos presentan conductividades en el ámbito de (150-199) $\mu\text{S/cm}$, en tanto que un porcentaje mínimo presentan conductividades menores a 149 $\mu\text{S/cm}$ y mayores a 450 $\mu\text{S/cm}$. En el caso de las nacientes, las conductividades se destacan principalmente entre (100-199) $\mu\text{S/cm}$, además se observa una baja representación para conductividades mayores a 250 $\mu\text{S/cm}$ (figura 2).

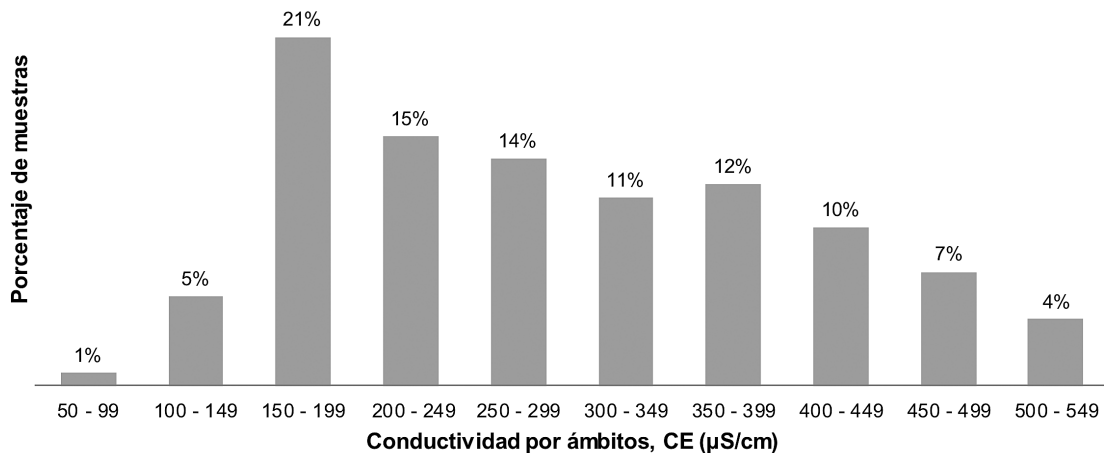


Figura 1. Porcentaje de muestras analizadas para los diferentes ámbitos de conductividad para los pozos.

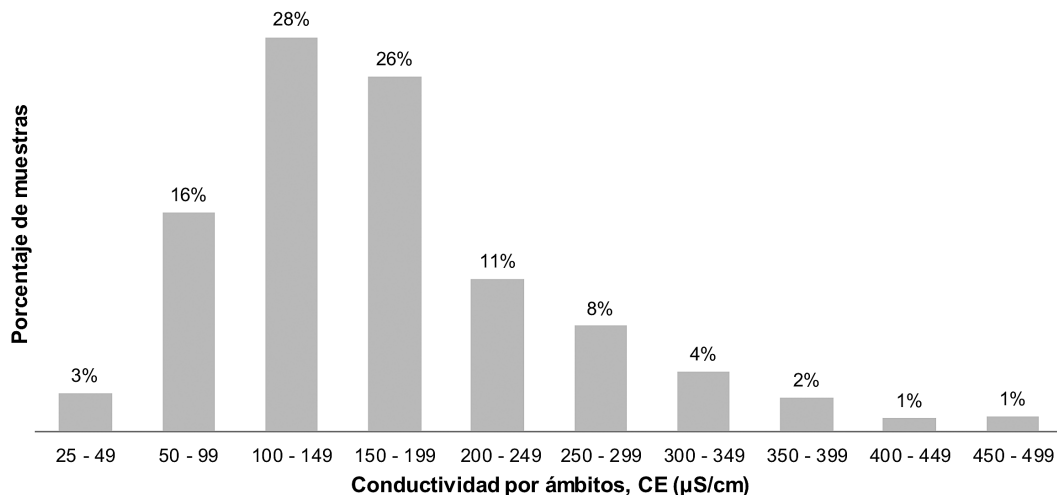


Figura 2. Porcentaje de muestras analizadas para los diferentes ámbitos de conductividad para las nacientes.

Composición porcentual de la dureza total expresado como dureza de calcio y dureza de magnesio

Dado que, típicamente la dureza total corresponde a la suma de la dureza de calcio y la dureza de magnesio, se decidió calcular para los diferentes ámbitos de conductividad especificados, el porcentaje que corresponde a cada una de ellas. Para el caso de los pozos, se observa en la figura 3 que la proporción de dureza de calcio y dureza de magnesio se mantiene prácticamente constante a lo largo de los ámbitos de conductividad, para un promedio de 68% de dureza de calcio y 32% de dureza de magnesio. En cuanto al agua de las nacientes (figura 4), se da un aumento en la dureza de calcio conforme aumenta la conductividad de la misma y por tanto una disminución de la dureza de magnesio.

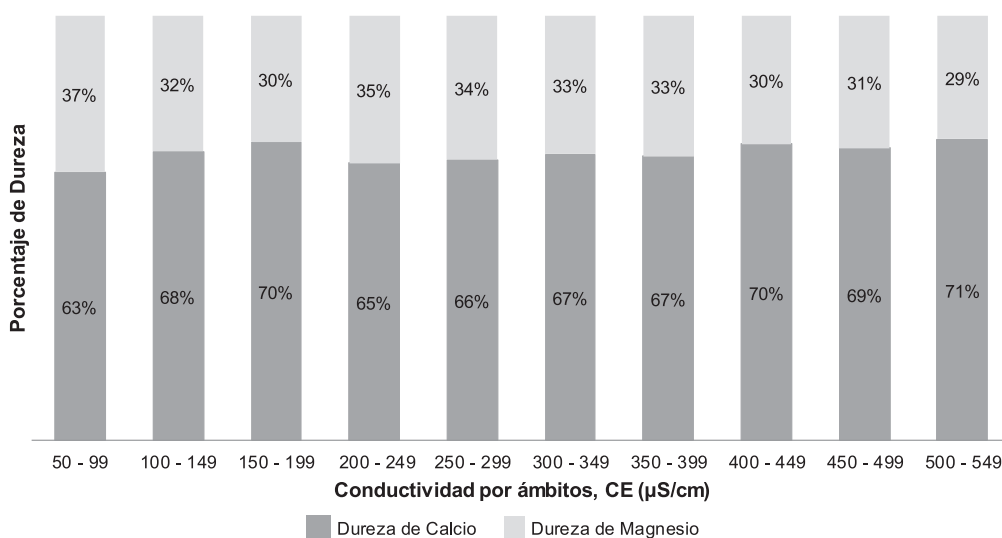


Figura 3. Porcentaje de dureza de calcio y dureza de magnesio en la dureza total para los diferentes ámbitos de conductividad en los pozos.

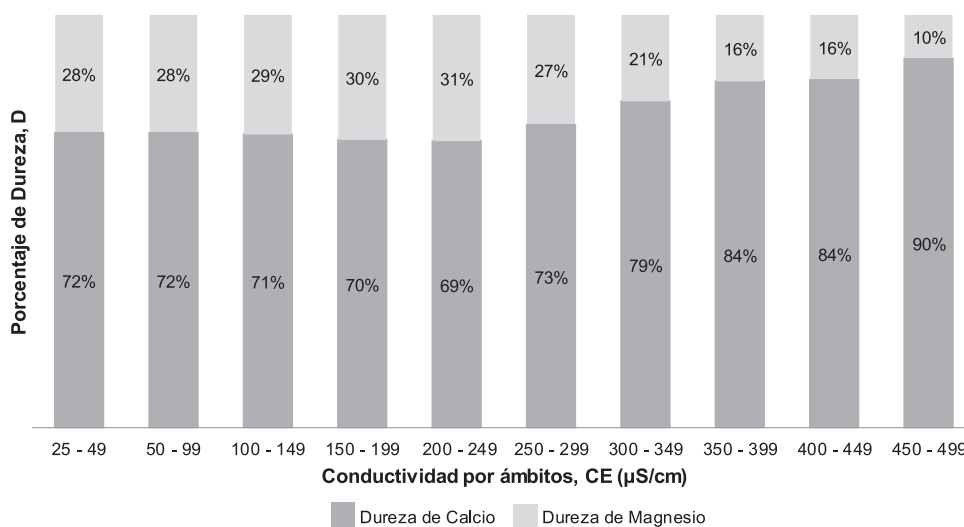


Figura 4. Porcentaje de dureza de calcio y dureza de magnesio en la dureza total para los diferentes ámbitos de conductividad en las nacientes.

Relación de la conductividad con la dureza total para los pozos y las nacientes

Al graficar las conductividades promedio versus las durezas totales para los pozos y las nacientes se generan curvas que muestran la relación existente, en donde, la curva de mejor ajuste fue lineal para ambos tipos de fuente. En el caso de los pozos, la relación resultante de la figura 5 se muestra en la ecuación 1 cuyo coeficiente de correlación (R^2) es de 0,9931. En la figura 6 se presenta la relación para las nacientes (ecuación 2) la cual tiene un R^2 de 0,9958.

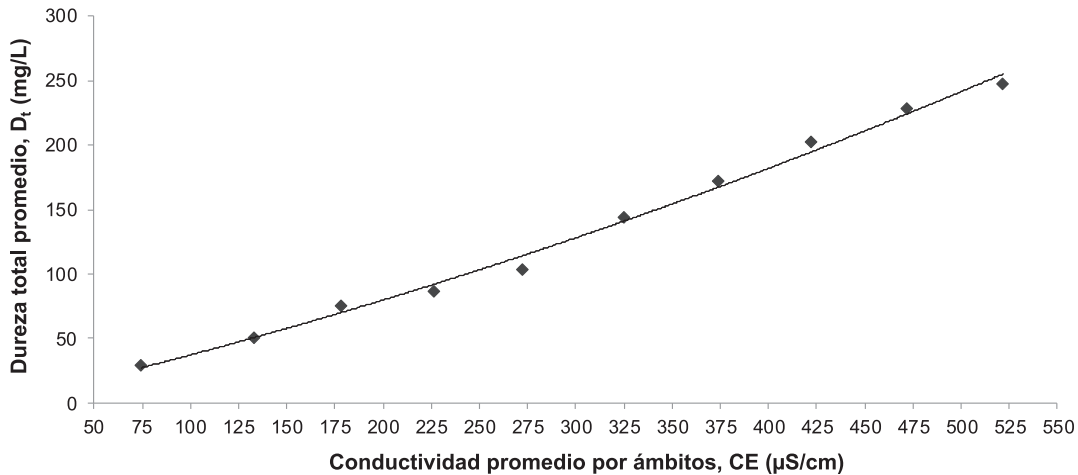


Figura 5. Conductividad promedio por ámbitos versus dureza total promedio para los pozos.

$$D_t = 0,0003 * CE^2 + 0,3418 * CE + 0,2710 \quad (1)$$

donde:

D_t : dureza total, mg/L.

CE: conductividad eléctrica, µS/cm.

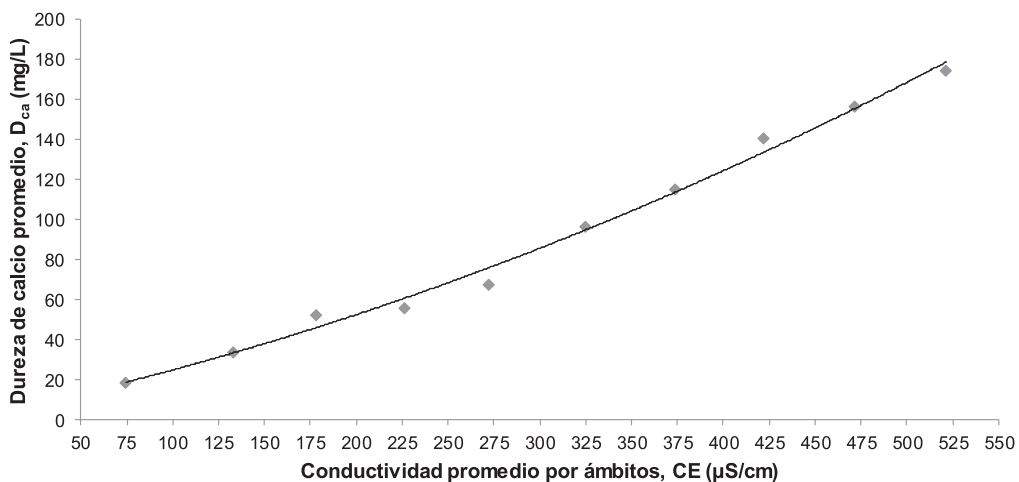


Figura 6. Conductividad promedio por ámbitos versus dureza total promedio para las nacientes.

$$D_t = 0,4927 * CE - 10,2321 \quad (2)$$

donde:

D_t : dureza total, mg/L.

CE: conductividad eléctrica, $\mu\text{S/cm}$.

Relación de la conductividad con la dureza de calcio para los pozos y las nacientes

Las gráficas de la relación entre la conductividad y la dureza de calcio para los pozos y las nacientes se muestran en la figura 7 y figura 8 respectivamente. Además, se presentan las respectivas ecuaciones polinómicas de segundo orden con coeficientes de correlación de 0,9922 y 0,9942.

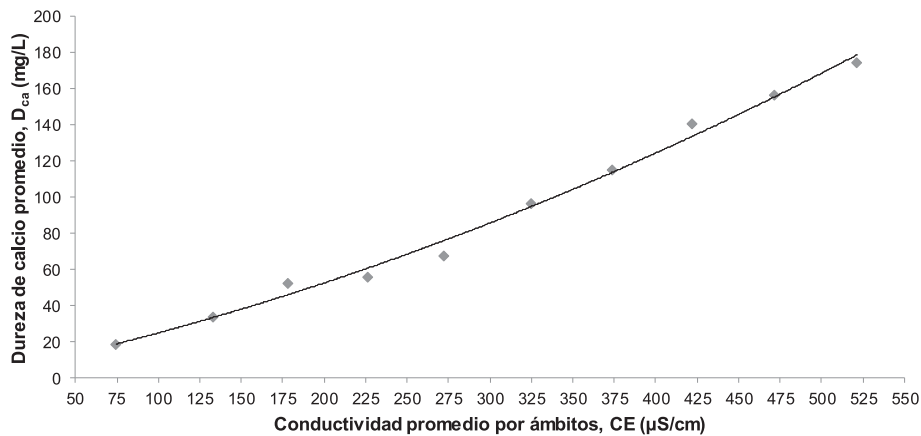


Figura 7. Conductividad promedio por ámbitos vs dureza de calcio promedio para los pozos.

$$D_{Ca} = 0,0003 * CE^2 + 0,1935 * CE + 2,9640 \quad (3)$$

donde:

D_{Ca} : dureza de calcio, mg/L.

CE: conductividad eléctrica, $\mu\text{S/cm}$.

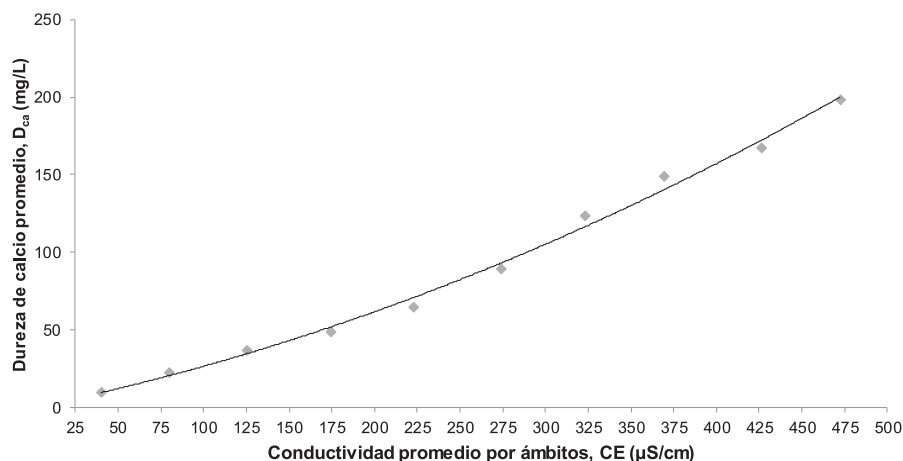


Figura 8. Conductividad promedio por ámbitos vs dureza de calcio promedio para las nacientes.

$$D_{Ca} = 0,0004 * CE^2 + 0,2250 * CE - 0,2439 \quad (4)$$

donde:

D_{Ca} : dureza de calcio, mg/L.

CE: conductividad eléctrica, μ S/cm.

Cálculo de la dureza de magnesio para los pozos y las nacientes

Como ya se mencionó anteriormente, la dureza total está mayoritariamente compuesta por dureza de calcio y dureza de magnesio. Por lo tanto, para el cálculo de la dureza de magnesio se debe utilizar la ecuación 5.

$$D_{mg} = D_t - D_{Ca} \quad (5)$$

donde:

D_{mg} : dureza de magnesio, mg/L.

D_t : dureza total, mg/L.

D_{Ca} : dureza de calcio, mg/L.

Aplicación de las curvas de calibración obtenidas

Las curvas de calibración obtenidas anteriormente se aplicaron a 20 pozos y 20 nacientes utilizados por acueductos de AyA, rurales y municipales. Estas fuentes de abastecimiento fueron seleccionadas al azar, cuyos análisis se realizaron desde marzo del 2016 a marzo del 2017.

Posteriormente se calculó la diferencia de los resultados teóricos y los utilizando la ecuación 6:

$$\text{Diferencia} = |V_{teo} - V_{exp}| \quad (6)$$

donde:

V_{teo} : Valor teórico (determinado con las curvas de calibración).

V_{exp} : Valor experimental (determinado analíticamente).

La diferencia de los resultados, tanto para la dureza total y la dureza de calcio en pozos y nacientes se muestran respectivamente en el cuadro 1 y cuadro 2. Como se puede observar las diferencias promedio son bajas; no obstante, esta diferencia puede deberse a la presencia de otros aniones o cationes que también contribuyen a la conductividad. Además, esta última se ve afectada por la temperatura y las incertidumbres correspondientes a la determinación, por lo cual los valores teóricos de las durezas se ven afectados indirectamente.

Cuadro 1. Conductividad, durezas teóricas y experimentales para la aplicación de las relaciones en pozos.

#	CE (μ S/cm)	Dureza total (mg/L)		Dif.	Dureza de calcio (mg/L)		Dif.
		Teo.	Exp.		Teo.	Exp.	
1	56	20	24	4	15	20	5
2	171	67	73	6	45	34	11
3	335	148	139	9	101	109	8
4	106	40	46	6	27	26	1
5	440	209	193	16	146	117	29

Continúa...

Continuación

#	CE (µS/cm)	Dureza total (mg/L)		Dif.	Dureza de calcio (mg/L)		Dif.
6	332	147	131	16	100	79	21
7	376	171	181	10	118	153	35
8	254	106	101	5	71	54	17
9	145	56	66	10	37	34	3
10	189	76	75	1	50	38	12
11	251	105	103	2	70	62	8
12	68	25	30	5	18	16	2
13	268	113	121	8	76	85	9
14	359	162	133	29	111	91	20
15	429	202	220	18	141	139	2
16	124	47	48	1	32	26	6
17	500	246	248	2	175	181	6
18	452	216	222	6	152	123	29
19	287	123	120	3	83	94	11
20	269	114	107	7	77	65	12
Promedio				8			12

Cuadro 2. Conductividad, durezas teóricas y experimentales para la aplicación de las relaciones en nacientes.

#	CE (µS/cm)	Dureza total (mg/L)		Dif.	Dureza de calcio (mg/L)		Dif.
		Teo.	Exp.		Teo.	Exp.	
21	107	42	50	8	28	28	0
22	161	69	77	8	46	52	6
23	144	61	58	3	40	30	10
24	115	46	46	0	31	30	1
25	251	113	117	4	81	91	10
26	167	72	79	7	48	48	0
27	220	98	91	7	69	56	13
28	101	40	46	6	27	30	3
29	218	97	87	10	68	52	16
30	60	19	20	1	15	16	1
31	189	83	99	16	57	56	1
32	339	157	169	12	122	121	1
33	92	35	34	1	24	18	6
34	186	81	64	17	55	46	9
35	98	38	34	4	26	20	6
36	139	58	55	3	39	34	5
37	30	5	9	4	7	6	1
38	111	44	49	5	30	28	2
39	316	145	154	9	111	120	9
40	267	121	114	7	88	87	1
Promedio				7			6

Conclusiones

- De los 1946 pozos estudiados el 21 % se ubican en el intervalo de conductividad que va de 150 a 199 $\mu\text{s/cm}$, seguido de un 15 % y 14 % en los intervalos de 200 $\mu\text{s/cm}$ a 249 $\mu\text{s/cm}$ y de 250 a 299 $\mu\text{s/cm}$.
- Con respecto a los 2699 nacientes analizados, el 28 % y el 20 % de estos se ubicaron en los intervalos de 100 $\mu\text{s/cm}$ a 149 $\mu\text{s/cm}$ y de 150 $\mu\text{s/cm}$ a 199 $\mu\text{s/cm}$, respectivamente.
- En los pozos la composición porcentual entre la dureza de calcio es del 68 % en promedio y de 32 % de dureza de magnesio. En resumen, la relación entre la dureza de calcio y magnesio es de 2 a 1.
- En las nacientes la proporción es semejante; no obstante, conforme aumenta la conductividad, menor es la proporción de la dureza de magnesio con respecto a la dureza de calcio.
- La relación de la conductividad y la dureza total en los pozos y las nacientes generaron curvas de ajuste polinómica de segundo orden y lineal respectivamente. El coeficiente de correlación (R^2) para los pozos es de 0,9931 y el de las nacientes es de 0,9958.
- Con respecto a las curvas de calibración de la conductividad y la dureza de calcio, los coeficientes de correlación son de 0,9922 para los pozos y de 0,9942 las nacientes.
- Las aplicaciones de las curvas de calibración en agua de pozos indican que los resultados técnicos obtenidos de dureza total y dureza de calcio por medio de los datos de conductividad se acercan en mucho a los obtenidos en los métodos analíticos, para una diferencia promedio de 8 mg/L en la dureza total y 12 mg/L en la dureza de calcio.
- En el caso de las 20 nacientes en donde se aplicó las durezas teóricas y las durezas experimentales o analíticas, las diferencias fueron de 7 mg/L en la dureza total y 6 mg/L en la dureza de calcio.

Recomendaciones

Se sugiere medir en campo la conductividad del agua de pozos y nacientes para estimar la dureza total y la dureza de calcio. En aquellos casos que lo ameriten, los resultados deberán ser ratificados con las técnicas analíticas correspondientes.

Estas correlaciones entre la conductividad y la dureza del agua no deben aplicarse en aguas subterráneas con tendencia a la salinización u otro tipo de aguas especiales.

Referencias

- [1] Roberto Rodríguez, Sergio Rodríguez. La Dureza del Agua. México. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN); 2010:1-35.
- [2] WHO. Hardness in drinking water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking Water Quality. Geneva. World Health Organization, 2011.
- [3] Laboratorio Nacional de Aguas. Programa de Vigilancia y Control de Calidad del Agua. La Unión. LNA; 2014; SP.
- [4] OMS. Guías para la Calidad del Agua Potable. Ginebra. Tercera ed: Organización Mundial de la Salud, 2013.
- [5] Darner Mora Alvarado, Carlos Felipe Portugués, Nuria Alfaro Herrera. Relación entre la Dureza del Agua y las Cardiopatías Isquémicas en Costa Rica. La Unión. Laboratorio Nacional de Aguas; 2002;1-13.
- [6] Luoma, H. et al "Risk of Myocardial infarction in Finnish men in Relation to fluid; Magnesium and Calcium Concentration Water". Acta Médica Scandinavica. Vol 213; 1983:71.

- [7] Altura, BM, Altura Bt. New Perspectives on the Role of Magnesium in the Pathophysiology of Cardiovascular System In Clinical Aspects Magnesium; 1987: 224-226.
- [8] Darner A. Mora Alvarado, Carlos F. Portugués Barquero, Michael Hernández Miraltes. Diferencias de dureza del agua y las tasas de longevidad en la Península de Nicoya y los otros distritos de Guanacaste Cartago. Revista Tecnología en Marcha. Vol 28, N°3; 2015: 3-14.
- [9] Martha Medina Mussaret Zaidi, Elizabeth Real-de León, Sergio Orozco. Prevalencia y factores de Riesgo en Yucatan, México para litiasis Orinarias. México. Revista de Salud Pública. Vol 44, Vol 6; 2002: 541-545.
- [10] Iguchi M. UmeKawat, Kohri Kurita. Prevalence of urolithiasis in Kaizuka City, Japan. An Epidemiology study urinary stones. Int.J.Urol; 1996:285-281.