

Determinación del Índice de Calidad en aguas subterráneas de la Ciudad de Rafaela (Departamento Castellanos, Provincia de Santa Fe).

Determination of the Water Quality Index in groundwater samples from Rafaela City (Castellanos Department, Santa Fe Province).

Cerri Carolina

Facultad Regional Rafaela
carocerri8@gmail.com

Farías Marisol

Facultad Regional Rafaela
marisolfarias200698@gmail.com

Chaves Abril

Facultad Regional Rafaela
abrilchaves0.2@gmail.com

Resumen

Debido al importante rol que cumple el agua en la vida de los seres humanos es fundamental la toma de conciencia sobre cómo preservarla, y su degradación debido a diversos factores naturales y antropogénicos. El Índice de Calidad de Agua (ICA) es un valor derivado de distintos parámetros que proporciona información acerca de la calidad de las aguas analizadas. El objetivo del presente trabajo es calcular dicho índice en aguas de pozos de Rafaela y, a partir del valor obtenido, clasificarlas en función a su aptitud para consumo humano. Para ello, se realizaron muestreos en distintos puntos de la zona en estudio y las muestras se caracterizaron físico y bacteriológicamente. El ICA permitió demostrar que la calidad del agua subterránea en estos puntos no es aceptable, lo que indica una degradación en su calidad.

Palabras claves: Índice de calidad, aguas subterráneas, Rafaela y zona.

Abstract

Due to the important role that water plays in human life, it is essential to raise awareness of how to preserve this resource, and the degradation it undergoes due to natural as well as anthropogenic factors. The water quality index is a value derived from different parameters that provides information about the quality of water. The purpose of this work is to calculate that index in the underground water in Rafaela and other nearby cities and, based on the obtained value, classify them according to their suitability for human consumption. To achieve this, many samples were taken in different parts of the study area and those samples were categorized physicochemically. The water quality index showed that underground water quality is not good for human consumption in any of those places, and that fact shows the decrease of their quality.

Keywords: Water quality index, underground water, Rafaela and surrounding areas.

Introducción

El agua es considerada como un recurso inagotable, debido a que siempre circula en la biosfera a través del ciclo hidrológico. Sin embargo, su cantidad utilizable en la tierra es fija y limitada (Garg 2012). Más del 97 % del agua de la Tierra es salada y su aprovechamiento es complejo, sólo el 3 % del agua en el planeta es dulce y de esa cantidad únicamente el 0,007 % es potable. Debido a esta situación, más de 1.100 millones de personas en el mundo carecen de acceso directo a fuentes de agua potable.

El agua subterránea, que es la principal fuente de agua para consumo humano en muchas zonas rurales, tiene su calidad determinada por la compleja interacción de factores ambientales y actividades antropogénicas (Bretcan 2022). Algunos autores explican que la calidad del agua subterránea en una región es una función de parámetros físicos y químicos que están fuertemente influenciados por procesos naturales como la química del agua en el área recargada, la mezcla de agua, la recarga de agua subterránea, la descarga y recarga de acuíferos, la trayectoria del flujo de agua y la interacción entre los minerales de

las rocas del acuífero y el agua, proceso de oxidación-reducción, tiempo de residencia del agua, intercambio iónico, condiciones climáticas y estructuras geológicas (Singh et al., 2017; Azhdarpoor et al., 2019; Soleimani et al., 2018).

La contaminación de las aguas subterráneas se ha convertido en uno de los problemas más graves del mundo en las últimas décadas (Umar et al. 2009). El deterioro de sus características causa diversas enfermedades, como la hepatitis E (Lee y Schwab 2005), la diarrea (Clasen et al. 2007), alteración de la función y desarrollo cerebral (Dillingham y Guerrant 2004).

Su monitoreo es esencial para la detección y evaluación de la degradación de este recurso en acuíferos altamente vulnerables para el diseño y la aplicación de estrategias de gestión sostenible (El-Hoz et al. 2014). Se han desarrollado varios índices de calidad del agua en todo el mundo, que pueden evaluar de forma rápida y precisa la calidad general del agua dentro de un área específica (Bharti y Katyal 2011). Inicialmente, Horton (1965) introdujo el índice de calidad del agua (ICA). Posteriormente, se propusieron otras ideas como mejoras al método original (Ewaid y Abed 2017). En todo el mundo, los investigadores han desarrollado y utilizado ICA con algunas variaciones estadísticas de diferentes parámetros fisicoquímicos (Dede et al. 2013; Sener et al. 2017; Solangi et al. 2019a). El método ICA se usa ampliamente para la evaluación del agua subterránea en todo el mundo debido a su capacidad de expresar completamente la información sobre su calidad y es una de las herramientas más efectivas y uno de los parámetros más importantes para su evaluación y gestión. Describe la calidad del agua en un término único, simple, reproducible y adimensional (Abbasi y Abbasi 2012). Esto puede ser de gran ayuda a la hora de elegir un método de tratamiento de agua adecuado para abordar el problema de la contaminación (Ewaid y Abed 2017).

Metodología

Muestras de agua subterránea:

Con el fin de efectuar el presente estudio, se analizaron muestras de aguas procedentes de pozos de la localidad de Rafaela ubicada en la región centro-oeste de la Provincia de Santa Fe. Rafaela está inserta en la región pampeana agroganadera e industrial que concentra la mayor parte de la población de Argentina y donde se desarrollan las actividades económicas de mayor relevancia. Su ubicación estratégica la sitúa en un punto central con relación a importantes centros urbanos del país. Cabecera del departamento Castellanos, se ubica en las coordenadas 31° 15' de latitud Sur y 61° 21' de longitud Oeste, sobre la llanura pampeana, a una altitud de 100 metros sobre el nivel del mar. Su superficie total es de 156,6 km² (15.660 Has.).

Se analizaron 20 muestras de agua subterránea de distintos pozos de la Ciudad y se caracterizaron fisicoquímicamente a través de los siguientes análisis: Arsénico Total, Dureza Total, Nitrato, Cloruro, Sulfato, pH, Sólidos Totales y bacteriológicamente mediante la determinación de Coliformes Totales. Se utilizó, para los parámetros analizados, la metodología propuesta por APHA, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (2017).



Figura 1 - Mapa de localización de la zona en estudio. Fuente: www.rafaela.gob.ar

Cálculo del ICA:

El procedimiento de cálculo consta de cuatro etapas.

1. En la primera etapa, a cada uno de los parámetros se les asignó un peso (w_i) acorde con su importancia relativa en la calidad del agua para consumo humano, así como de las condiciones geohidrológicas de la zona de estudio. La ponderación máxima fue de cinco y, en este caso, se le asignó a sólidos totales disueltos, nitratos, arsénicos y coliformes totales en función de los efectos adversos en la salud humana que estos provocan. Para la dureza total y el ion sulfato la ponderación fue de tres; cloruros de cuatro y al pH se le dio la ponderación mínima por su escasa variación.

Parámetros	wi	Wi
pH	1	0,03
Sólidos Totales (mg/L)	4	0,13
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	3	0,10
Cloruros (mg Cl ⁻ /L)	4	0,13
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	3	0,10
Nitrato (mg NO ₃ ⁻ /L)	5	0,17
Coliformes Totales	5	0,17
As (mg As/L)	5	0,17

Tabla 1 - Pesos relativos de los parámetros según su importancia para la salud humana.

2. En la segunda etapa, el peso relativo (Wi) de cada parámetro (Tabla 1) se calculó utilizando la ecuación (1) del método del peso aritmético.

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

donde wi es el peso de cada parámetro, n es el número de parámetros y Wi es el peso relativo.

3. En la tercera etapa, se determinó una escala de calificación/valoración de calidad (qi) para cada parámetro dividiendo la concentración resultante de cada muestra de agua analizada (Ci) por su respectivo límite máximo permisible (Si) de acuerdo con el Código Alimentario Argentino y multiplicando el resultado por 100. La ecuación utilizada es la que se expone a continuación (2):

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

donde qi es la clasificación de calidad, Ci es la concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en miligramos por litro, y (Si) es el estándar del C.A.A. para cada parámetro químico en miligramos por litro.

4. Para calcular el ICA, primero se determinó el SI para cada parámetro químico utilizando la ecuación (3):

$$SI_i = W_i \times q_i \quad (3)$$

donde SIi es el subíndice del i-ésimo parámetro, qi es la calificación basada en la concentración del i-ésimo parámetro y n es el número de parámetros. Posteriormente, se utilizó la ecuación (4), efectuando la sumatoria de todos los SIi para determinar el valor del ICA.

$$ICA = \sum SI_i \quad (4)$$

Los valores calculados del ICA generalmente se clasifican en cinco categorías (Tabla 2): en excelente, bueno, pobre, muy pobre e inadecuado para el consumo humano (Sahu y Sikdar 2008).

Valor de ICA	Calidad del Agua
Menor de 50	Excelente
De 50 a 100	Buena
De 100 a 200	Pobre
De 200 a 300	Muy pobre
Mayor de 300	No apta para consumo humano

Tabla 2 – Clasificación según la calidad de agua.

Resultados

Luego de realizar los análisis fisicoquímicos, se calcularon los valores correspondientes del ICA en cada uno de los pozos muestreados, los valores arrojados se comparan con las clasificaciones de la Tabla 2 y se observan en la Figura 2:

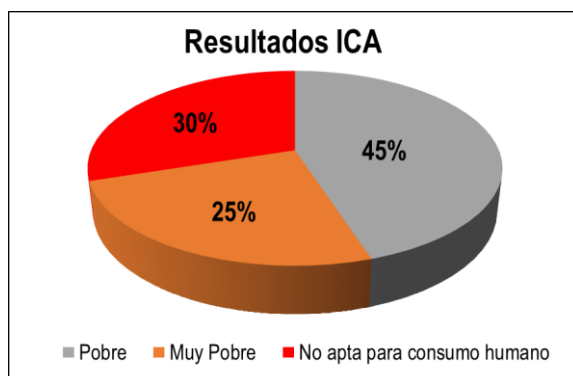


Figura 2 - Porcentajes obtenidos según la clasificación del ICA.

Parámetros	Promedio (n=20)	Mínimo	Máximo	Límite máximo permisible (C.A.A.)
pH	7,6	6,8	8,0	8,5
Sólidos Totales (mg/L)	2.114,6	1.169	5.125	1.500
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	268,5	71,8	746,4	400
Cloruros (mg Cl ⁻ /L)	311,9	80,1	1.058,4	350
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	432,2	114,8	1.654,4	400
Nitrato (mg NO ₃ ⁻ /L)	120,4	6,8	786,9	45
Coliformes Totales	304,4	2	1.500	<2
As (mg As/L)	0,1	0	0,2	0,01

Tabla 3 - Valores promedio, mínimos y máximos de los pozos monitoreados.

Los resultados demuestran que no hay pozos analizados con calidad de agua subterránea “excelente” o “buena”. Un 45% de las aguas reciben la categoría de “pobre”, un 25% son aguas dentro de la categoría de “muy pobres”, y el 30% restante, son aguas consideradas “no aptas para consumo humano”. Las muestras estudiadas no cumplen con algunos de los límites fijados por el C.A.A. para consumo humano (Ver Tabla 3) debido a que presentan altas concentraciones de sólidos totales, sulfatos, nitratos, coliformes totales y arsénico.

El pH es una de las cualidades operativas del agua más importantes. La acidez y alcalinidad del agua subterránea se describen mediante el pH del agua subterránea y, además, el pH controla principalmente la cantidad y la estructura química de varias materias orgánicas e inorgánicas disueltas en el agua subterránea. También es un parámetro esencial de la calidad del agua, que no tiene un impacto directo en los consumidores (Shabbir y Ahmed, 2015). Según las directrices de la OMS y el Código Alimentario Argentino, el límite máximo permitido de pH es 8,5; normalmente su valor varía entre 6,5 y 8,5. Beber agua con un valor de pH fuera de este rango perjudicaría la potabilidad del agua (Ebrahimi et al. 2016). En este estudio, el pH se observó dentro del rango aceptable con un valor mínimo de 6,8 y un máximo de 8,0.

Los Sólidos Disueltos Totales están compuestos de sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y de pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en agua. Las concentraciones de SDT en el agua varían considerablemente en diferentes regiones geológicas debido a las diferencias en la solubilidad de los minerales (OMS 2004). Según el Código Alimentario Argentino, el máximo permitido de sólidos disueltos totales en aguas para consumo es de 1500 mg/l. Los valores de STD de las muestras analizadas exceden el límite del C.A.A. puesto que los valores oscilaron entre 1.169 y 5.125 mg/l.

La dureza del agua está determinada principalmente por la presencia en ella de cationes como calcio y magnesio; y de aniones como carbonato, bicarbonato, cloruro y sulfato (Ravikumar et al. 2010). Según las normas de clasificación de Dureza (como CaCO₃), el agua subterránea se puede dividir en agua blanda (DT < 150 mg/l), agua moderadamente dura (150 < DT < 300 mg/l), agua dura (300 < DT < 450 mg/l), agua extremadamente dura (DT > 450 mg/l). La dureza de 150 a 300 mg/l o superiores puede causar enfermedades cardíacas y problemas renales (Ramesh y Elango 2006). En este estudio, los valores de DT variaron entre 71,8 y 746,4 mg/l, superando algunas de las muestras el límite máximo fijado por el C.A.A.

La alta concentración de Cl en el agua irrita la nariz y los ojos y provoca malestar en el estómago (Patil et al. 2012). El exceso de cloruro imparte un sabor salado al agua, y las personas que no están acostumbradas a niveles altos de cloruro pueden verse sometidas a efectos laxantes (Anitha et al. 2011). El límite máximo permitido de cloruro en agua para consumo humano según el C.A.A. es de 350 mg/l y, en este estudio, si bien los valores oscilaron entre 80,1 y 1.058,4 mg/l, no obstante, el promedio del total de las muestras monitoreadas dio un valor de 311,9 mg/l por debajo del límite.

La presencia de sulfato en el agua puede provocar un sabor notable y niveles muy altos pueden provocar un efecto laxante en consumidores no acostumbrados. El CAA establece como límite máximo 400 mg/L de SO₄-2 en aguas de consumo directo. El valor promedio en este caso fue de 432,2 mg/l por encima del límite, siendo el mínimo calculado de 114,8 y el máximo 1.654,4 mg/l.

Las fuentes de contaminación por nitratos en suelos y aguas (superficiales y subterráneas) se asocian, mayormente, a actividades agrícolas y ganaderas, aunque en determinadas áreas, también pueden estar relacionadas a ciertas actividades industriales, especialmente las del sector agrícola (PREQB, 2004). Aunque el consumo de agua con nitrato (NO₃) por sí solo no es cancerígeno, consumir agua con altos niveles es un factor de riesgo importante de metahemoglobinemia, especialmente en los bebés, conocida como “la enfermedad de los bebés azules”. Si la fuente de contaminación proviene del estiércol animal o de fosas sépticas o redes de alcantarillado, la ingestión de nitratos se asocia con mayor frecuencia con contaminación microbiana, que provocará infecciones gastrointestinales. En Argentina, el CAA establece que el máximo permitido de nitratos en agua es de 45mg/l. Los valores de nitrato se encuentran comprendidos en el rango de 6,8-786,9 mg/l con un promedio que supera el límite máximo de 120,4 mg/l.

El agua destinada al consumo humano no debe contener ningún agente patógeno, siendo necesario realizar análisis para determinar microorganismos indicadores de contaminación. El riesgo de contaminación biológica es mayor en áreas de actividad ganadera debido a que los patógenos eliminados a través de las heces y orina de animales pueden ser transportados por infiltración a los cuerpos de agua. Los microorganismos indicadores de contaminación como los coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), *Escherichia coli* (*E.coli*) y *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) son frecuentemente empleados como señal de advertencia de una alteración de su calidad (OMS 2004, García y Iannacone 2014). El Código Alimentario Argentino establece como máximo un recuento de <2 NMP/100ml de bacterias coliformes totales. El valor promedio de las muestras monitoreadas fue de 304,4, el cuál excede ampliamente el límite fijado por el C.A.A.

El área en estudio contiene altas concentraciones de As en el agua subterránea (superiores al límite recomendado por el C.A.A.: 0,01 mg/L). La ingestión permanente de aguas con altas concentraciones de arsénico provoca la aparición de arsenicosis, una enfermedad con alta incidencia que se denomina Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) (Tello, 1986). Según el C.A.A., en aquellas regiones del país con suelos de alto contenido de arsénico, se podrá admitir como límite máximo de 0,05 mg/l cuando la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario. La concentración promedio de Arsénico (0,1 mg/l) de las muestras de agua estudiadas en este caso, es mayor al límite establecido.

Conclusiones

La obtención del Índice de Calidad de Agua (ICA) ha sido una herramienta útil que permitió identificar la calidad del agua subterránea en diferentes pozos de monitoreo, en un período de tiempo determinado. Los parámetros fisicoquímicos seleccionados para el cálculo han sido representativos/suficientes para la clasificación de las aguas de acuerdo con su aptitud para consumo humano. El cálculo del ICA permitió demostrar que la calidad química del agua subterránea de los pozos monitoreados, en la zona en estudio, no es aceptable. La baja calidad de las aguas hace que las mismas no puedan ser utilizadas para consumo humano directo sin previo tratamiento de potabilización. Se prevé la ampliación de los análisis de agua para obtener más información de la zona analizada. En base a los datos recolectados se evaluará la factibilidad de efectuar tratamientos para permitir su consumo.

Referencias bibliográficas

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). *Water quality indices* (Vol. 384). Amsterdam: Elsevier.
- Anitha P, Charmaine J, Nagaraja S (2011). Evaluation groundwater quality in around Peenya industrial area of Bangalore, South India using GIS techniques. *Environ Monit Assess*. doi:10.1007/s10661-011-2244-y
- APHA. Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 9-56. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Azhdarpoor, A., Radfard, M., Pakdel, M., Abbasnia, A., Badeenezhad, A., Mohammadi, A. A., Yousefi, M., 2019. Assessing fluoride and nitrate contaminants in drinking water resources and their health risk assessment in A semiarid region of southwest Iran. *Desalin Water Treat* 149, 43–51.

- Bharti, A., & Katyal, D. (2011). Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *International Journal of Environmental Sciences*, 2(1), 154–173.
- Bretcan, P., Tanislav, D., Radulescu, C., Serban, G., Danielescu, S., Reid, M., & Dunea, D. (2022).
- Clasen, T., Cairncross, S., Haller, L., Bartram, J., & Walker, D. (2007). Cost-effectiveness of water quality interventions for preventing diarrhoeal disease in developing countries. *J. Water and Health*, 5(4), 599–608.
- Código Alimentario Argentino Capítulo XII Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificada Agua Potable Artículo 982 - (Resolución Conjunta SPRyRS y SAGPyA N° 68/2007 y N° 196/2007).
- Dede, O., Telci, I., & Aral, M. (2013). The use of water quality index models for the evaluation of surface water quality: a case study for Kirmir Basin, Ankara, Turkey. *Water Quality Exposure and Health*, 5, 41–56.
- Dillingham, R., & Guerrant, R. L. (2004). Childhood stunting: measuring and stemming the staggering costs of inadequate water and sanitation. *Lancet*, 363, 94–95. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0501-5>.
- El-Hoz, M., Mohsen, A., & Iaaly, A. (2014). Assessing groundwater quality in a coastal area using the GIS technique. *Desalination and Water Treatment*, 52, 1967–1979.
- Ewaid, S., & Abed, S. (2017). Water quality index for AlGharraf River, southern Iraq. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43, 117–122.
- García, L., & Iannacone, J. (2014). *Pseudomonas aeruginosa* un indicador complementario de la calidad de agua potable: análisis bibliográfico a nivel de Sudamérica. *The Biologist*, 12(1), 133-152.
- Garg, S. K. (2012). *Hydrology and water resources engineering, handbook*. New Delhi: Khanna Publishers.
- Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37(3), 300–306.
- Lee, E. J., & Schwab, K. J. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health*, 3(2), 109–127.
- PREQB. 2004. Puerto Rico Environmental Quality Board. Puerto Rico Water Quality Inventory and List of Impaired Waters. 2004: 305(b)/303(d) Final Report.
- Ramesh K, Elango (2006) Groundwater quality assessment in Tondiar Basin. *Int J Environ Pollut* 26(6):497–504.
- Ravikumar P, Somashekar RK, Angami M (2010) Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the Markandeya River basin, Belgaum District, Karnataka State, India. *Environ Monit Assess*. doi:10.1007/s10661-010-1399-2.
- Sener, S., Sener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584-585, 131–144.
- Shabbir, R., & Ahmed, S. (2015). Use of geographic information system and water quality index to assess groundwater quality in Rawalpindi and Islamabad. *Arabian J. for Science and Engineering*, 40, 2033–2047.
- Singh, C., Kumar, A., Shashtri, S., Kumar, A., Kumar, P., Mallick, J., 2017. Multivariate statistical analysis and geochemical modeling for geochemical assessment of groundwater of Delhi, India. *J. Geochem. Explor.* 175, 59–71.
- Solangi, G. S., Siyal, A. A., Babar, M. M., & Siyal, P. (2019a). Groundwater quality evaluation using the water quality index (WQI), the synthetic pollution index (SPI), and geospatial tools: a case study of Sujawal district, Pakistan. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*.
- Soleimani, H., Nasri, O., Ojaghi, B., Pasalari, H., Hosseini, M., Hashemzadeh, B., Kavosi, A., Masoumi, S., Radfard, M., Adibzadeh, A., Feizabadi, G.K., 2018. Data on drinking water quality using water quality index (wqi) and assessment of groundwater quality for irrigation purposes in Qorveh&Dehghan, kurdistan, Iran. *Data In Brief* 20, 375–386.
- Tello EE. (1986). Arsenicismos hídricos: ¿qué es el hidroarsenicismo crónico regional endémico argentino (HACREA)? *Arch Arg Dermatol.*, 26(4), 197-214.
- Umar R, Ahmed I, Alam F (2009) Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of Central Ganga Plain, Western Uttar Pradesh. *J Geol Soc India* 73:193–201
- WHO (2004) Guidelines for drinking water quality: training pack. WHO, Geneva, Switzerland.