

Explotación Intensiva y Minería de Agua Subterránea

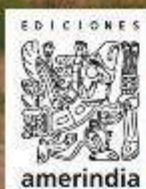


RAHi
REVISTA ARGENTINA DE HIDROLOGÍA

Edición 1

Año 2022

ISSN 2953-4208



Organismo Editor Responsable

Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Argentino

Maipú 645 1^{er} piso

(C1006ACG) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Tel. 011 4322 2820 / 4328 4078

E-mail aih.grupoargentino@gmail.com; revista.argentina.hidrogeologia@gmail.com

Editorial

Ediciones Amerindia

Av. J. D. Perón 1147

(6300) Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

Tel. 02954 410315

E-mail info.edicionesamerindia@gmail.com

Foto de tapa

Geól. Rubén Eduardo Ottonello (año 2018). Obtenida al finalizar la construcción del Pozo “Parque de la Juventud” en la ciudad de La Rioja. De fondo el Monumento a Facundo Quiroga, símbolo del Federalismo. Equipo: cámara Olympus X-43 (Zoom óptico 5x). Modificada digitalmente para armonía de diseño por Guillermo Cardoso.

Logo

Logo y diseño de tapa de *Guillermo Cardoso*

Sitio Web AIH Grupo Argentino y Revista Argentina de Hidrogeología

Gestión documental RAHi *Noella Hurtado Viggiano*

REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

CUERPO EDITORIAL

Editor responsable

Dr. Lic. Roberto Esteban Miguel

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

revista.argentina.hidrogeologia@gmail.com

Editora asociada

Dra. Lic. Corina Iris Rodríguez

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

corodri@fch.unicen.edu.ar

Comité editor

Dr. Geól. Carlos Juan Schulz

Universidad Nacional de La Pampa

Dr. Geól. Daniel Emilio Martínez

Universidad Nacional de Mar del Plata

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Dra. Geól. Verónica Rocha Fasola

Universidad Nacional de Salta

Agradecimientos

Desde el comité editor se agradece la colaboración desinteresada del *Dr. Lic. Leandro Rodrigues Capitulo* (Universidad Nacional de La Plata y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas), *Dra. Ing. Marcela Pérez* (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral), *Dra. Lic. Rosario Soledad Barranquero* (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas); *Geól. Esteban Tálamo* (Universidad Nacional de Ctmamarca) y *Dr. Lic. Víctor Alejandro Ruíz de Galarreta* (Docente Retirado Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires)

A las empresas *CONHIDRO* y *ANDINA PERFORACIONES*, quienes financiaron el diseño del logo, manual de marca y diseño de tapa de la Revista Argentina de Hidrogeología.

JUNTA DIRECTIVA
ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE HIDROGEOLOGÍA
GRUPO ARGENTINO

PRESIDENTE

Dr. Eduardo Kruse

VICEPRESIDENTE

Dra. Cristina Dapeña

SECRETARIA

Lic. María Josefa Fioriti

TESORERO

Dr. Santiago Perdomo

VOCALES

Dr. Roberto Esteban Miguel
Dra. María Verónica Rocha Fasola
Mag. Andrea Isabel Valladares
Dr. Carlos Juan Schulz

REVISTA ARGENTINA DE HIDROGEOLOGÍA

OBJETIVOS

La Revista Argentina de Hidrogeología (*RAHi*) es una publicación desarrollada desde el *Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Argentino (AIH-GA)* y el apoyo de investigadores de Universidades e Institutos de Ciencia y Técnica de Hispanoamérica que abordan la temática hidrogeológica.

La Revista tiene por objetivo publicar investigaciones científicas y documentos técnicos vinculados al quehacer hidrogeológico, con énfasis en las diferentes regiones de Argentina.

Los aportes podrán ser teóricos, metodológicos o aplicados, por ejemplo, a través de investigaciones empíricas o estudios de caso, que permitan avanzar en el conocimiento de la hidrogeología, su estudio y la aplicación de conocimientos.

TEMÁTICA

Los artículos publicados se enmarcarán en una línea temática establecida por la Junta Directiva de la AIH Grupo Argentino para cada número de la revista para lo cual se realizarán invitaciones especiales a investigadores, docentes y técnicos del quehacer hidrogeológico nacional. No obstante, el Comité Editorial ocasionalmente evaluará la apertura a números abiertos para la recepción de trabajos del ámbito hidrogeológico considerados de relevancia, pero no incluidos en la línea temática seleccionada por la Junta Directiva.

ALCANCE

La publicación se efectuará en formato digital anualmente en el mes de octubre bajo la Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Argentino y estará disponible en la página de AIH-Grupo Argentino. El idioma oficial será el español con resúmenes en inglés.

DEL PROCESO EDITORIAL

Los artículos recibidos serán evaluados inicialmente por el Comité Editorial y remitidos a dos evaluadores bajo el sistema doble ciego. Para la publicación de los artículos se considerará particularmente la pertinencia temática, calidad, originalidad e interés general. Cabe destacar que la originalidad no sólo estará dada por el abordaje teórico, metodológico y práctico, sino también –aunque no excluyente– bajo el criterio de originalidad territorial, es decir, áreas poco estudiadas o sin antecedentes de estudios en los últimos cinco años. En

caso de haber dictámenes contradictorios entre evaluadores el artículo será enviado a un tercero.

DEL ACCESO, GRATUIDAD Y FINANCIAMIENTO

La *RAHi* es de acceso abierto y distribución gratuita. Tanto los editores, junta directiva, comité académico como autores efectúan sus contribuciones “ad honorem”.

Los gastos para la realización de la revista correrán por cuenta de la AIH-GA, para lo cual se prevé que empresas vinculadas a la hidrogeología auspicien en el cuerpo del documento y permitan solventar los gastos.

En caso de excedentes, estos quedarán en la cuenta de la AIH-GA para gastos que su Junta Directa considere convenientes.

ÍNDICE

Prólogo. Explotación intensiva y Minería de Agua Subterránea <i>Dr. Emilio Custodio Gimena</i>	<i>Pág. 7-8</i>
El agua subterránea en el abanico aluvial de La Rioja. Un recurso en crisis <i>Rubén Eduardo Ottonello y Roberto Esteban Miguel</i>	<i>Pág. 9-19</i>
Formulación de un índice de estado del acuífero para gestionar zonas con explotación intensiva <i>Eduardo E. Mariño, Lorena Ceballo, Natalia L. Loyola, Paulo Pechín, Carlos Gandi y Mariana Gagino</i>	<i>Pág. 20-30</i>
Análisis hidrogeológico del Acuífero Multiunitario Superior y su relación con la explotación intensiva de agua, Chubut. Argentina <i>Mario Grizinik y Pablo Correia</i>	<i>Pág. 31-46</i>
El recurso hídrico subterráneo y su explotación en la región de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, Argentina. <i>René Albouy, Nerea Bastianelli, Andrés Ruffo, Lucía Carrica, Juan Manuel Giorgi y Matías Rey</i>	<i>Pág. 47-58</i>
Acuíferos costeros explotados intensamente. Modelo conceptual, respuesta hidrodinámica y simulación numérica del acuífero de Mar de Plata <i>Emilia Bocanegra, Orlando Mauricio Quiroz Londoño; Sebastián Grondona; Daniel Martínez</i>	<i>Pág. 58-78</i>

FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE DE ESTADO DEL ACUÍFERO PARA GESTIONAR ZONAS CON EXPLOTACIÓN INTENSIVA

AN INDEX OF THE STATE OF AQUIFER FOR MANAGEMENT OF GROUNDWATER UNDER INTENSIVE EXPLOITATION

Eduardo E. Mariño¹, Lorena Ceballo¹, Natalia L. Loyola¹,
Paulo Pechín², Carlos Gandí³ y Mariana Gagino²*

¹Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Ruta Nac. N° 35, Km 334, 6300, Santa Rosa, La Pampa, Argentina

²CORPICO- Servicio de Agua Potable y Saneamiento Ambiental, Calle 13 e/ 104 y 106, 6360, General Pico, La Pampa, Argentina

³Administración Provincial del Agua, Olascoaga 540, 6300, Santa Rosa, La Pampa, Argentina

*Autor de correspondencia: emarinio@exactas.unlpam.edu.ar

RESUMEN

En este artículo se formula un índice de estado del acuífero (IEA) basado en la integración de dos indicadores referidos al descenso del nivel freático y al deterioro de la calidad, medido a través de uno o más parámetros hidroquímicos. Se trata de diseñar una herramienta de fácil aplicación que, con un requerimiento de datos acorde a áreas con escasa información, contribuya a la toma de decisiones de corto y mediano plazo en la gestión hídrica, especialmente en zonas sometidas a explotación intensiva. Dentro del marco teórico de la lógica difusa, el IEA valora el estado del sistema por asignación de un puntaje y una categoría, de manera que resulta simple tanto la interpretación de sus resultados como el seguimiento de su evolución temporal. El sistema presenta flexibilidad para, de acuerdo al conocimiento previo del sistema acuífero a evaluar, seleccionar los puntos de control y los parámetros cualitativos que resulten más representativos. Con fines ilustrativos, se presenta un caso de aplicación a un área en el NE de la provincia de La Pampa, donde se evalúa el período de referencia 2009-2019. Se concluye que, por el momento, la explotación intensiva no ha tenido un impacto severo sobre el estado del acuífero, situación que puede atribuirse a una gestión correcta de la demanda. Sin embargo, para lograr el mejoramiento del estado del sistema, y la sustentabilidad del recurso, será necesaria una reducción de los volúmenes extraídos, a partir de la disponibilidad de fuentes de abastecimiento complementarias.

Palabras Clave:

Gestión de los recursos hídricos - Agua subterránea - Indicadores ambientales - Lógica matemática

ABSTRACT

This paper develops a groundwater state index (GWSI) based in the integration of two indicators referred to the water-table depletion and the quality deterioration, measured by one or more chemical parameters. The aim is to design an easy tool that contribute to groundwater management, especially in zones with intensive exploitation, and adequate to areas with scarce information. GWSI is a fuzzy-based index which assesses the quantitative and qualitative state of groundwater by assigning a score and a category, so that both the interpretation of its results and the monitoring of its temporal evolution are simple. An application case was presented for an area of the NE of La Pampa province, where the reference period 2009-2019 was evaluated. It is concluded that intensive aquifer exploitation has not had a severe impact on the groundwater state so far, a situation that can be attributed to correct water demand management. However, in order to improve the state of the system

and to maintain a sustainable use of groundwater resources, it will be necessary a reduction in the whole aquifer abstraction, based on the availability of complementary supply sources.

Key words:

Water resources management - Groundwater - Environmental indicators - Mathematical logic

INTRODUCCIÓN

En regiones áridas y semiáridas carentes de ríos o arroyos y donde los cuerpos superficiales presentan elevada salinidad, las aguas subterráneas constituyen el principal recurso hídrico para atender la demanda para diversos usos, como el abastecimiento urbano, la bebida del ganado, la irrigación de cultivos y pasturas y la producción industrial.

La ocurrencia de dichas fuentes está ligada a ciertas características geológicas y geomorfológicas que favorecen la infiltración del agua de lluvia, dando lugar a condiciones localmente preferenciales para la recarga de los acuíferos y consecuentemente a una mejora relativa de la calidad del agua subterránea.

Por su expresión espacial generalmente reducida, estas áreas acuíferas son frágiles y susceptibles de sufrir un deterioro cuantitativo y cualitativo cuando se las somete a un aprovechamiento intensivo, es decir cuando se extrae una proporción significativa de la recarga interanual (Custodio *et al.*, 2005) y se produce un cambio en el funcionamiento de los sistemas acuíferos (Custodio Gimena, 2015).

En ese contexto, la planificación adquiere una especial relevancia para la formulación de planes que compatibilicen las necesidades regionales con una gestión sustentable de los recursos hídricos. La sustentabilidad debe entenderse como un concepto multidimensional que contemple, al menos, aspectos ambientales, sociales, económicos, legales e institucionales (Llamas *et al.*, 2006; Pandey *et al.*, 2011; Bockstaller *et al.*, 2017; Chanapathi *et al.*, 2019).

Con tal aproximación holística, la identificación y el desarrollo de indicadores de sustentabilidad de recursos hídricos subterráneos tiene como referencia el trabajo llevado a cabo por un grupo de expertos convocados por UNESCO (Vrba y Lipponen, 2007). Sin embargo, la aplicación del conjunto de indicadores propuestos requiere disponer de estimaciones cuantitativas que no siempre están disponibles en regiones con escasa información y débil organización institucional, donde el análisis queda restringido a aquellos factores que cuenten con los datos necesarios. También se debe considerar la escala de análisis, ya que a veces se apunta a evaluaciones a nivel nacional o global (Lavapuro *et al.*, 2008; Gleeson *et al.*, 2012; Gain *et al.*, 2016; Alley *et al.*, 2017; Gleeson *et al.*, 2020) y en otros casos interesan las determinaciones de mayor detalle sobre el estado de los recursos hídricos subterráneos en un área en particular.

Como método para la formulación de índices, la lógica difusa (Zadeh, 1965) posee, con respecto a la lógica clásica, una flexibilidad mayor para afrontar la ambigüedad e incertidumbre inherentes a los sistemas naturales. Asimismo, permite formulaciones lingüísticas que resultan más comprensibles y útiles para usuarios y gestores (Zadeh, 2008; Jinturkar *et al.*, 2010; Caniani *et al.*, 2015; Vadiati *et al.*, 2016; Chanapathi *et al.*, 2019; Jha *et al.*, 2020).

Los índices basados en sistemas de inferencia difusa se han aplicado en numerosos trabajos referidos a gestión sustentable del agua subterránea (Bagheri *et al.*, 2006; Yin *et al.*, 2012; Fleming *et al.*, 2014; Chanapathi *et al.*, 2019), caracterización hidroquímica y calidad del agua del agua subterránea (Singh *et al.*, 2008; Şen, 2009; Dahiya *et al.*, 2007; Jinturkar *et al.*, 2010; Kamrani *et al.*, 2016; Vadiati *et al.*, 2016; Jamshidzadeh y Tavangari

Barzi, 2018; Jha *et al.*, 2020) y vulnerabilidad, contaminación y remediación de acuíferos (Dixon, 2005; Gemitzi *et al.*, 2006; Afshar *et al.*, 2007; Nasiri *et al.*, 2007; Nobre *et al.*, 2007; Mohammadi *et al.*, 2009; Pathak y Hiratsuka, 2011; Massone *et al.*, 2013; Caniani *et al.*, 2015; Nadiri *et al.*, 2017; Duhalde *et al.*, 2018).

Dentro de dicho marco teórico, este trabajo pretende suministrar una herramienta de fácil aplicación, con un requerimiento de datos acorde a áreas con escasa información y una interpretación sencilla para gestores, técnicos y usuarios de servicios de abastecimiento urbano, que facilite la toma de decisiones de corto y mediano plazo. Finalmente, con fines ilustrativos, se presenta un caso de aplicación a un área explotada intensivamente en el NE de la provincia de La Pampa.

METODOLOGÍA

El índice de estado del acuífero (IEA) se basa en la integración de dos indicadores simples referidos al descenso del nivel freático y al deterioro de la calidad, medido a través de uno o más parámetros hidroquímicos.

Indicador de descenso del nivel freático

La dimensión del indicador de descenso del nivel freático (IDNF) es la preservación de las reservas y adopta como variable a la profundidad del nivel freático, medida en un punto de control al final del intervalo de evaluación considerado. Su valor varía entre 0 y 1, indicando respectivamente que el nivel freático se encuentra en la posición más somera (sin disminución de almacenamiento) o más profunda (disminución máxima del almacenamiento) del período de referencia. El IDNF se obtiene mediante la Ecuación 1:

$$IDNF_t = \frac{NF_t - NF_{mínT}}{NF_{máxT} - NF_{mínT}} \quad (1)$$

dónde: NF_t es la profundidad del nivel freático al final del intervalo de evaluación (t) y $NF_{mín}$ y $NF_{máx}$ son, respectivamente, la menor y mayor profundidad del nivel freático en el período de referencia (T).

Indicador de deterioro de la calidad del agua

La dimensión del indicador de deterioro de la calidad del agua (IDC) toma en cuenta la preservación cualitativa del agua subterránea y utiliza como variable la concentración (o el valor) de uno o más parámetros físicos y/o químicos, determinados en un punto de muestreo al final del intervalo de evaluación considerado. Toma valores entre 0 y 1, indicando respectivamente que las variables hidroquímicas se encuentran con la concentración mínima (sin afectación cualitativa) o máxima (afectación cualitativa extrema) del período de referencia. El indicador de deterioro (ID_i) para cada uno de los parámetros seleccionados, se obtiene mediante la Ecuación 2:

$$ID_{it} = \frac{C_{it} - C_{míniT}}{C_{máxiT} - C_{míniT}} \quad (2)$$

dónde: C_{it} es la concentración (o el valor) del parámetro i al final del intervalo de evaluación (t) y, $C_{mín}$ y $C_{máx}$ son, respectivamente, la menor y mayor concentración (o valor) del parámetro i en el período de referencia (T).

A su vez, el IDC (Ecuación 3) resultará del promedio de los ID de los n parámetros considerados, los cuales se podrán multiplicar por un coeficiente de peso (w_i) asignado en función de su importancia relativa:

$$IDC_t = \frac{\sum (w_i \cdot ID_{it})}{n} \quad (3)$$

Índice de estado del acuífero

Los dos indicadores clásicos descriptos anteriormente se integraron para obtener un índice de estado del acuífero (IEA), que puede adoptar un valor entre 0 y 10. Para ello se aplicó un sistema de inferencia difusa (SID), para cuyo diseño y resolución se dispone de varias herramientas informáticas, algunas de las cuales son de acceso libre, como la que se utilizó en este trabajo (Baturone *et al.*, 2007).

La lógica difusa establece que un elemento x tiene un grado de pertenencia $\mu_A(x)$, entre 0 y 1, a un conjunto difuso A en un universo de discurso U , donde A está caracterizado por una función de pertenencia $f_A(x)$. Entonces, el primer paso consistió en definir el universo de discurso, los conjuntos difusos y funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida del SID. Entre las diferentes formas que pueden tener las funciones de pertenencia, se utilizaron las de tipo triangular (Ecuación 4) y trapezoidal (Ecuación 5), que son reconocidas por su simplicidad y frecuentemente empleadas en aplicaciones de la lógica difusa a problemas ambientales.

$$f(x; a, b, c) = f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (4)$$

$$f(x; a, b, c, d) = f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (5)$$

El siguiente paso requiere establecer las reglas que relacionan los conjuntos difusos de las variables de entrada (antecedentes) con los conjuntos de la variable de salida (consecuente) y deben tender a cumplir dos objetivos (Fleming *et al.*, 2014): a) que los valores del índice resultante guarden cierta proporcionalidad con los indicadores de entrada y b) que los indicadores de entrada no se enmascaren recíprocamente, es decir que el índice resultante refleje con sensibilidad una condición desfavorable de cualquiera de ellos. Las reglas difusas se expresan como formulaciones lógicas condicionales del tipo “SI-ENTONCES” y, en este caso, los antecedentes están conectados por el operador “Y”. Este operador mínimo está definido por la Ecuación 6, donde A y B son conjuntos difusos y x es un elemento que pertenece simultáneamente a ambos.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6)$$

Dado que el resultado del SID es también un conjunto difuso, es necesario aplicar algún procedimiento para convertirlo en un valor numérico, que pueda ser fácilmente comunicado y comprendido. En este caso se utilizó el método del centroide, también llamado centro de área o centro de gravedad, que es el más ampliamente aplicado y cuya eficiencia con respecto a otros métodos ha sido probada (Naaz *et al.*, 2011; Ross, 2012; Caniani *et al.*, 2015; Chanapathi *et al.*, 2019). Siendo C el conjunto difuso resultante de la unión de dos o más funciones de pertenencia de la variable de salida $\mu_C(z)$, según la cantidad de reglas activadas, el método del centroide produce un valor de salida z_{out} mediante la ecuación 7.

$$z_{out} = \frac{\sum_i z_i \mu_c(z_i)}{\sum_i \mu_c(z_i)} \quad (7)$$

Caso de aplicación

Para la aplicación de la metodología propuesta se seleccionó un área ubicada en el NE de la provincia de La Pampa, que se explota para el abastecimiento a la localidad de General Pico (Figura 1).

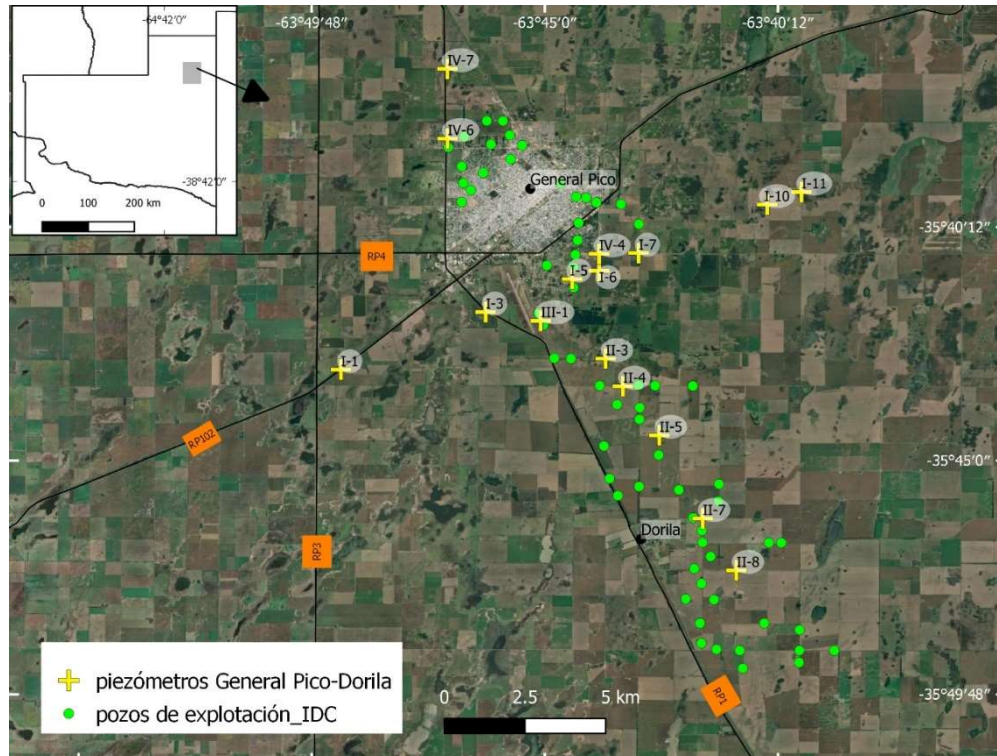


Figura 1. Mapa del área seleccionada como caso de aplicación, con la ubicación de puntos de control.

El agua subterránea se obtiene de un acuífero en ambiente medanoso, de baja productividad (acuítardo) y con restricciones de calidad para consumo humano por concentraciones elevadas de fluoruro y arsénico (Smedley *et al.*, 2000; Schulz *et al.*, 2001; UNLPam, 2015; Aullón Alcaine *et al.*, 2020; Mariño *et al.*, 2020). La batería de pozos de explotación está ubicada al sur de la ciudad y consta de 112 pozos distribuidos en un área de unos 100 km². El servicio de provisión, que atiende actualmente unos 27.000 usuarios residenciales e industriales, comenzó a operar en 1986 con 32 perforaciones, que se han incrementado gradualmente, tanto para atender el aumento de la demanda como para reemplazar aquellos pozos que sufrieron deterioros severos en la calidad del agua extraída. Esto se debe a que la intensificación del régimen de bombeo tiene un correlato hidroquímico que determina un aumento en las concentraciones de arsénico y fluoruro (Medus *et al.*, 2005).

Para el cálculo del IEA se tomó el período de referencia 2009-2019, con intervalos de evaluación aproximadamente anuales. Las fluctuaciones del nivel freático requeridas para calcular el IDNF se obtuvieron de mediciones de la profundidad del NF en un número de piezómetros variable entre 5 y 13 (Figura 1). Por su parte, el IDC se basó en las concentraciones de fluoruro y arsénico en muestras provenientes de entre 42 y 58 pozos de

explotación (Figura 1). Para caracterizar al sistema se promediaron los indicadores obtenidos en los puntos de control disponibles para cada intervalo de evaluación.

Las etiquetas lingüísticas (categorías) dadas a cada conjunto difuso y sus valores límites para el caso de aplicación, se muestran en la Figura 2 y se basan en la interpretación conceptual de cada indicador, de acuerdo con el conocimiento previo del comportamiento sistema acuífero.

Se considera que si el IDNF es menor o igual a 0,2, corresponde a descensos del nivel freático provocado por las variaciones naturales del sistema, con una influencia despreciable de la explotación y que se podrían revertir en períodos subsiguientes con mejores condiciones climáticas para la recarga. En cambio, un IDNF mayor a 0,7 indicaría un impacto severo o muy severo sobre el almacenamiento del sistema.

Con respecto al IDC, se interpreta que cuando es menor o igual a 0,1 refleja incertidumbres analíticas, errores de muestreo u otras causas no atribuibles a un deterioro en la calidad del agua subterránea por efecto de la explotación intensiva. Por el contrario un IDC mayor a 0,6 indica una degradación cualitativa severa a muy severa del sistema y de carácter casi permanente. Esto significa que resultaría difícil de revertir a través de ciclos de recuperación por detención temporaria del bombeo del pozo y conduciría al futuro abandono del mismo.

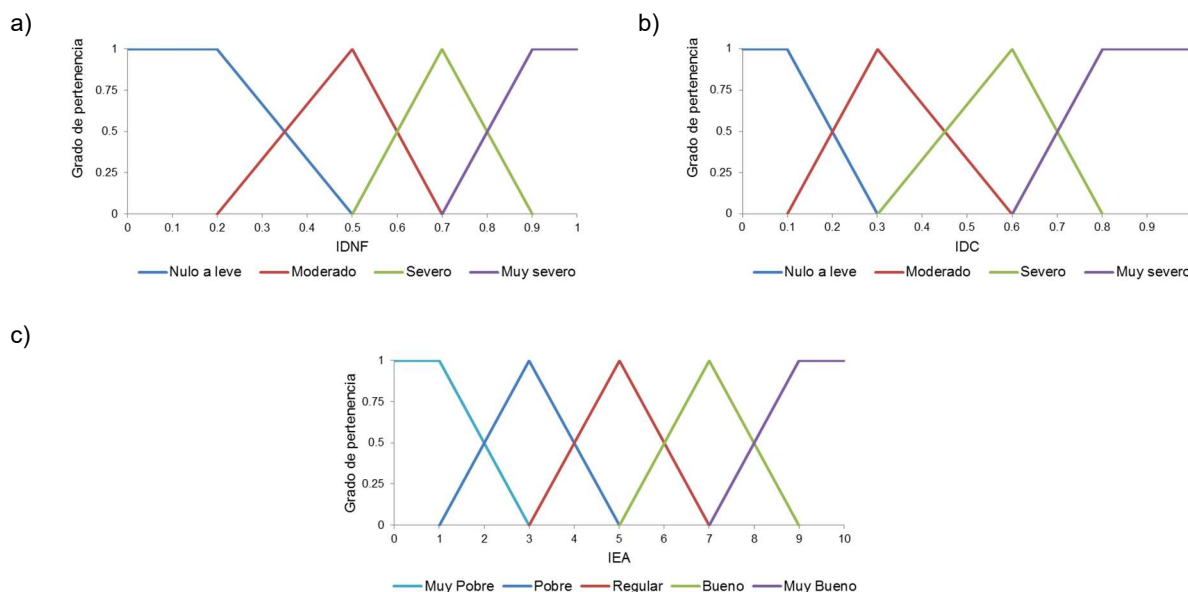


Figura 2. Conjuntos difusos y funciones de pertenencia para: a) el índice de descenso del nivel freático (IDNF), b) el índice de deterioro de la calidad (IDC) y c) el índice de estado del acuífero (IEA).

A su vez, un IEA menor a 3 indica que el estado del acuífero es pobre a muy pobre, lo que condicionará seriamente la capacidad de sostener la provisión de agua potable en condiciones adecuadas y exigirá un replanteo del plan de manejo vigente. En cambio, un IEA de 7 o más mostrará que la condición del acuífero es buena a muy buena, lo que implica que el sistema de abastecimiento puede satisfacer la demanda actual sin provocar deterioros cuantitativos y/o cualitativos en el agua subterránea. Las calificaciones intermedias corresponderán a una situación moderada que, para no agravarse, requerirá introducir ajustes en la gestión del recurso.

Las reglas difusas que determinan el IEA a partir de los indicadores de entrada se detallan en la Tabla 1. El criterio seguido para su definición considera que el estado del

acuífero empeora con el incremento de ambos valores de entrada, aunque asigna al indicador cualitativo (IDC) una sensibilidad algo mayor en la determinación del estado resultante. Dado que el SID fue construido de manera tal que sólo se superponen los conjuntos difusos adyacentes (Figura 2), cada una de las variables de entrada tendrá un grado de pertenencia parcial a no más de 2 categorías y en consecuencia activarán un máximo de 4 reglas.

Tabla 1. Sistema de reglas difusas.

R1	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Muy bueno
R2	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Bueno
R3	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Regular
R4	SI IDFN=	Nulo a leve	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Pobre
R5	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Bueno
R6	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Bueno
R7	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Regular
R8	SI IDFN=	Moderado	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Pobre
R9	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Regular
R10	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Regular
R11	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Pobre
R12	SI IDFN=	Severo	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Pobre
R13	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Nulo a leve	→ IEA=	Pobre
R14	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Moderado	→ IEA=	Pobre
R15	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Severo	→ IEA=	Pobre
R16	SI IDFN=	Muy severo	Y IDC=	Muy severo	→ IEA=	Muy pobre

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos (Tabla 2) indican que el estado del sistema es “regular” para todo el período de análisis, con un puntaje medio de 5,05, aunque se evidencia una mejora respecto a la condición inicial, debida a la tendencia ascendente del nivel freático, que se traduce en una disminución del IDNF.

Cabe considerar que esta situación se corresponde con un período de registros pluviométricos elevados (con una media anual de 906,5 mm), en el cual sólo el intervalo 2017/18 puede considerarse condicionado por la precipitación, según el criterio de Mariño y Dalmaso (2003) quienes concluyeron que en años pluviométricos con registros inferiores a 600 mm, la extracción superaría ampliamente a la recarga, provocando profundizaciones significativas del nivel freático.

Tabla 2. Estado del sistema acuífero en cada intervalo de evaluación.

Intervalo	IDNF	IDC	IEA	Estado
2009/10	0,88	0,35	3,27	Regular
2010/11	0,89	0,53	3,15	Regular
2011/12	0,55	0,51	5,08	Regular
2012/13	0,40	0,38	6,37	Regular
2013/14	0,56	0,52	4,95	Regular
2014/15	0,70	0,46	3,95	Regular
2015/16	0,38	0,43	6,11	Regular
2016/17	0,19	0,44	6,05	Regular
2017/18	0,34	0,50	5,8	Regular
2018/19	0,40	0,50	5,73	Regular

En el período de referencia, la demanda, estimada a partir de datos de macromedición en el sistema de distribución, puede considerarse estable (con un rango entre 3,9 y 4,9 hm³/año). Sin embargo, su valor medio (4,5 hm³) determina un régimen de explotación intensiva, ya

que compromete una parte significativa de la recarga, si se tienen en cuenta los cálculos más recientes que estiman un promedio anual de unos 100 mm (Massara *et al.*, 2015), que representan unas reservas reguladoras anuales de 5 hm³.

Dada su formulación basada en la lógica difusa, el IEA constituye un método de evaluación robusto frente a las incertidumbres inherentes a los sistemas hídricos, especialmente en áreas con insuficiente información. Por otra parte, la interpretación de sus resultados y el seguimiento de su evolución temporal son simples, ya que el estado del sistema se valora por asignación de un puntaje y una categoría.

Finalmente, el IEA resulta de fácil aplicación, ya que para su cálculo se dispone de varios recursos informáticos de acceso libre y su diseño le otorga flexibilidad para modificar las variables de entrada, los límites de los respectivos conjuntos difusos y el sistema de reglas. Así, resulta factible su aplicación en distintas áreas bajo explotación intensiva, donde el conocimiento previo del sistema acuífero a evaluar permitirá seleccionar los parámetros cualitativos que resulten más representativos y/o sensibles en cada caso, como lo fueron fluoruro y arsénico en el caso presentado.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un índice que, con un requerimiento de datos acorde a áreas con información limitada, permite evaluar el estado de un acuífero y contribuye en la gestión de recursos hídricos subterráneos sometidos a explotación intensiva.

Con respecto al caso de aplicación presentado, se puede concluir que, por el momento, la explotación intensiva no ha tenido un impacto severo sobre el estado del acuífero, situación que puede atribuirse a una gestión correcta de la demanda. Sin embargo, para lograr el mejoramiento del estado del sistema será necesaria una reducción de los volúmenes extraídos, a partir de la disponibilidad de fuentes de abastecimiento complementarias.

AGRADECIMIENTOS

La Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de General Pico (CORPICO) y la Administración Provincial del Agua (APA) de La Pampa, facilitaron la información requerida para este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Afshar, A., Mariño, M. A., Ebtehaj, M. y Moosavi, J. (2007). Rule-based fuzzy system for assessing groundwater vulnerability. *Journal of Environmental Engineering*, 133 (5), 532–540. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2007\)133:5\(532\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2007)133:5(532))

Alley, W. M., Clark, B. R., Ely, D. M. y Faunt, C. C. (2017). Groundwater Development Stress: Global-Scale Indices Compared to Regional Modeling. *Ground Water*, 56 (2), 266-275. <https://doi.org/10.1111/gwat.12578>

Aullon Alcaine, A., Schulz, C., Bundschuh, J., Jacks, G., Thunvik, R., Gustafsson, J. P., Morth, C. M., Sracek, O., Ahmad, A. y Bhattacharya, P. (2020). Hydrogeochemical controls on the mobility of arsenic, fluoride and other geogenic co-contaminants in the shallow aquifers of northeastern La Pampa Province in Argentina. *Science of The Total Environment*, 715 (2020), 136671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136671>

Bagheri, A., Asgary, A., Levy, J., y Rafieian, M. (2006). A performance index for assessing urban water systems: A fuzzy inference approach. *Journal-American Water Works Association*, 98 (11), 84-92. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07807.x>

Baturone, I., Moreno-Velo, F., Sánchez-Solano, S., Barriga, A., Brox, P., Gersnoviez, A. y Brox, M. (2007). *Using Xfuzzy Environment for the Whole Design of Fuzzy Systems*. Conference Paper in

- IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Londres, Inglaterra.
<https://doi.org/10.1109/FUZZY.2007.4295420>
- Bockstaller, C. Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B. y Botreau, R. (2017).** A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling & Software*, 97, 130-144.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.011>
- Caniani, D., Lioi, D. S. Mancini, M. I., y Masi, S. (2015).** Hierarchical Classification of Groundwater Pollution Risk of Contaminated Sites Using Fuzzy Logic: A Case Study in the Basilicata Region (Italy). *Water*, 7 (12), 2013-2036. <https://doi.org/10.3390/w7052013>
- Chanapathi, T., Thatikonda, S., Pandey, V. P., y Shrestha, S. (2018).** Fuzzy-based approach for evaluating groundwater sustainability of Asian cities. *Sustainable Cities and Society*, 44, 321-331.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.027>
- Custodio Gimena, E. (2015).** *Explotación intensiva y minera de las aguas subterráneas: situación general y particular de España: ¿una bendición o una calamidad?* Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp), 108 (1-2), 13-20.
- Custodio, E., Kretsinger, V. y Llamas, M. R. (2005).** Intensive development of groundwater: concept, facts and suggestions. *Water Policy* 7, 151–162. <https://doi.org/10.2166/wp.2005.0010>
- Dahiya, S., Singh, B., Gaur, S., Garg, V. K., y Kushwaha, H. S. (2007).** Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 147 (3), 938-946.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.119>
- Dixon, B. (2005).** Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 25 (4), 327-347. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.07.002>
- Duhalde, D. J., Arumí, J. L., Oyarzún, R. A. y Rivera, D. A. (2018).** Fuzzy-based assessment of groundwater intrinsic vulnerability of a volcanic aquifer in the Chilean Andean Valley. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190 (7), 390. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6758-4>
- Fleming, S. W., Wong, C. y Graham, G. (2014).** The unbearable fuzziness of being sustainable: an integrated, fuzzy logic-based aquifer health index. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (6), 1154-1166.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.907496>
- Gain, A. K., Giupponi, C., y Wada, Y. (2016).** Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 11 (12), 124015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tsihrintzis, V. A. y Pisinaras, V. (2006).** Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. *Environmental Geology*, 49 (5), 653–673. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0104-1>
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., van Beek, L. P. H. (2012).** Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200.
<https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., y Perrone, D. (2020).** Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Jha, M. K., Shekhar, A., y Jenifer, M. A. (2020).** Assessing groundwater quality for drinking water supply using hybrid fuzzy-GIS-based water quality index. *Water Research*, 115867.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115867>
- Jamshidzadeh, Z. y Barzi, M. T. (2018).** Groundwater quality assessment using the potability water quality index (PWQI): a case in the Kashan plain, Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77 (3), 59. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7237-5>
- Jinturkar, A. M., Deshmukh, S. S., Agarkar S. V. y Chavhan, G. R. (2010).** Determination of water quality index by fuzzy logic approach: a case of ground water in an Indian town. *Water Science and Technology*, 6 1(8), 1987–1994. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.095>
- Kamrani, S., Rezaei, M., Amiri, V., y Saberinasr, A. (2016).** Investigating the efficiency of information entropy and fuzzy theories to classification of groundwater samples for drinking purposes: Lenjanat

Plain, Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75 (20), 1370. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6185-1>

Lavapuro, M., Lipponen, A., Artimo, A. y Katko, T. S. (2008). Groundwater sustainability indicators: testing with Finnish data. *Boreal Environment Research*, 13, 381–402.

Llamas M. R., Martinez-Santos y de la Hera P. A. (2006). *The Manifold Dimensions of Groundwater Sustainability: An Overview*. International Symposium on Groundwater Sustainability, (pp. 1-15). Alicante, España.

Mariño, E. E. y Dalmaso, M. G. (2003). *Análisis de la información básica para la gestión del acuífero que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina*. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en hidrología subterránea, (Tomo 1, pp. 209-218). Rosario, Argentina.

Mariño, E. E., Teijón Ávila, G., Bhattacharya, P. y Schulz, C. J. (2020). The occurrence of arsenic and other trace elements in groundwaters of the southwestern Chaco-Pampean plain, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 100 (2020), 102547. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102547>

Massara, N., Mariño, E., Ceballo, L. y Schulz, C. (2015). *Estimación de la recarga en áreas medanosas del noreste de la provincia de La Pampa*. XXV Congreso Nacional del Agua, Paraná, Argentina.

Massone, H., Meschino, G., Lima, L., Albornoz, D., Barilari, A., y Damiano, F. (2013). *Aplicación de lógica difusa en la evaluación de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea*. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología subterránea, La Plata, Argentina.

Medus, M., Mariño, E. E. y Schulz, C. J. (2005). *Variación temporal de los contenidos de arsénico en la batería de pozos que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina*. En G. Galindo, J. L. Fernández Turiel, M. A. Parada y D. G. Torrente (Eds.), *Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento*, IV Congreso Hidrogeológico Argentino, (pp. 73-81). Río Cuarto, Argentina.

Mohammadi, K., Niknam, R. y Majd, V.J. (2009). Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: A case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran. *Environmental Geology*, 58 (2), 437–446. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1514-7>

Naaz, S., Alam, A., y Biswas, R. (2011). Effect of different defuzzification methods in a fuzzy based load balancing application. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 8 (5), 261.

Nadiri, A. A., Gharekhani, M., Khatibi, R., y Moghaddam, A. A. (2017). Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (9), 8562-8577. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8489-4>

Nasiri, F., Huang, G., y Fuller, N. (2007). Prioritizing groundwater remediation policies: a fuzzy compatibility analysis decision aid. *Journal of Environmental Management*, 82 (1), 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.001>

Nobre, R.C.M., Rotunno Filho, O. C., Mansur, W. J., Nobre, M. M. M., y Cosenza, C. A. N. (2007). Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94 (3-4), 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.07.008>

Pandey, V. P., Shrestha, S., Chapagain, S. K. y Kazama, F. (2011). A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science & Policy*, 14 (4), 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.03.008>

Pathak, D. R. y Hiratsuka, A. (2011). An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making. *Journal of Hydro-environment Research*, 5 (1), 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.10.015>

Ross, T. J. (2012). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Tercera Edición. Wiley, Nueva York.

Schulz, C.J., Castro, E., Mariño, E. y Dalmaso, M.G. (2001). *Occurrence of fluoride in groundwater for human consumption in the province of La Pampa, Republica Argentina*. En: Seiler, K. P. y Wohnlich, S. (Eds.), *New Approaches Characterizing Groundwater Flow* (Vol. 1, pp. 637–639). A.A. Balkema Publisher, Países Bajos.

Smedley, P.L., McDonald, D.M.J., Nicolli, H.B., Barros, A.J., Tullio, J.O., Pearce, J.M. (2000). *Arsenic and Other Quality Problems in Groundwater from Northern La Pampa Province, Argentina.* British Geological Survey, Technical Report WC/99/36, Reino Unido.

Şen, Z., 2009. Fuzzy groundwater classification rule derivation from quality maps. *Water Quality, Exposure and Health*, 1 (2), 115–122. <https://doi.org/10.1007/s12403-009-0011-x>

Singh, B., Dahiya, S., Jain, S., Garg, V. K. y Kushwaha, H. S. (2008). Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage: a case study of Southern Haryana, India. *Environ Geol* 54 (2), 249–255. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0812-9>

Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam). (2015). *Inventario de los Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa - Etapa I.* Secretaria de Recursos Hídricos, La Pampa, Argentina.

Vadiati, M., Asghari-Moghaddam, A., Nakhaei, M., Adamowski, J., y Akbarzadeh, A. H. (2016). A fuzzy-logic based decision-making approach for identification of groundwater quality based on groundwater quality indices. *Journal of environmental management*, 184, 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.082>

Vrba, J. y Lipponen, A. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators.* UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater N° 14.

Yin, D., Shu, L., Xu, C., Wang, Z., y Appiah-Adjei, E. K. (2012). An approach for estimating sustainable yield of karst water in data sparse regions. *Environmental Earth Sciences*, 66 (2), 399-407. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1247-x>

Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets.* *Information and Control*, 8 (3): 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 178 (13), 2751–2779. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.02.012>

Trabajo recibido el 12/04/2022 y aprobado para su publicación el 21/06/2022.

Cómo citar este artículo

Mariño, E.E.; Ceballo, L.; Loyola, N.L.; Pechín, P; Gandi, C.; Gagino, M. (2022). Formulación de un índice de estado del acuífero para gestionar zonas con explotación intensiva, *Revista Argentina de Hidrogeología*, 1:20-30