
Índice de factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea (IDHAS). Caso de aplicación Uruguay

M. P. Collazo

Resumen: El método para calcular el índice de factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea (IDHAS) (Collazo, 2006), se refiere a la posibilidad de desarrollo humano en función del recurso hídrico subterráneo. Las variables consideradas son la productividad de la formación, el costo de extracción del agua subterránea y la potabilidad del agua subterránea. A cada variable le corresponde un índice que se pondera, y que luego de ser multiplicados tales resultados, se genera el índice IDHAS. El método está diseñado para ser cartografiado y aplicado a cualquier territorio, por ende, permite realizar una caracterización de la factibilidad de desarrollo humano en función del recurso hídrico subterráneo, a nivel continente, país, región o localidad, dependiendo del grado de detalle que se quiera conseguir. El método se aplicó en el territorio uruguayo y específicamente para el Sistema Acuífero Guaraní (SAG), en su zona aflorante y confinada, debido a la importancia que este recurso tiene en el abastecimiento de agua potable para ciudades, pequeñas localidades, habitantes rurales, riego y ganadería, pues favorece

e impulsa el desarrollo socioeconómico del país. El IDHAS para el Uruguay resultó principalmente bajo debido a la gran extensión que ocupan formaciones con bajo a muy bajo índice de productividad. Los índices IDHAS altos corresponden a los acuíferos Raigón, Salto y Chuy, debido a índices altos de productividad y a bajos índices de extracción del agua subterránea. El SAG presenta un IDHAS alto en su área aflorante, mientras que en su zona confinada presenta índices IDHAS que varían de medio a muy bajo en función del índice de extracción del agua subterránea.

Palabras clave: desarrollo humano y agua subterránea, Sistema Acuífero Guaraní (SAG).

Abstract: The method to calculate the feasibility index of human development based on groundwater (IDHAS) (Collazo, 2006), refers to the possibility of human development based on the groundwater resource. The variables considered are the productivity of formation, the cost of groundwater extraction and the potability of the groundwater. Each variable corresponds to an index that is weighted for and that after being multiplied generates the IDHAS index. The method is designed to be mapped and applied to any territory, allowing a characterization of the feasibility of human development depending on the groundwater resource, at the continent, country, region or locality, depending on the degree of detail you want to achieved. The method was applied in Uruguay and specifically for the Guaraní Aquifer System in its outcropped and confined zone, due to the

Recibido: Marzo 24, 2020 /Aceptado: Agosto 15, 2020

Publicado en línea: Octubre, 2020

© 2020

M. P. Collazo



Recursos Hídricos Subterráneos. Instituto de Ciencias Geológicas Facultad de Ciencias de la Universidad de la República (UDELAR-Uruguay).

E-mail de correspondencia: paulacollazo@gmail.com

importance that this resource has in the supply of drinking water for cities, rural inhabitants and irrigation favoring and promoting the socioeconomic development of the country. The IDHAS for Uruguay was mainly low due to the large extension of formation with low to very low productivity index. The high IDHAS correspond to the Raigón, Salto and Chuy aquifers, due to high productivity index and low groundwater extraction index. The Guaraní Aquifer System has a high IDHAS in its outcropping area, while in its confined area it has IDHAS that vary from medium to very low depending on the groundwater extraction index.

Keywords: groundwater and human development, Guaraní aquifer system.

INTRODUCCIÓN

Uruguay es un país que cuenta con acuíferos de gran productividad, a saber, Guaraní, Raigón y Salto, y con rocas de muy baja productividad que ocupan más de 70% del territorio nacional e impiden la realización de actividades diversas por falta del recurso hídrico subterráneo. El país utiliza el agua subterránea principalmente para el riego, abastecimiento humano y animal y, en menor proporción, para la industria. Al ser un país agrícola ganadero, la necesidad de agua es de vital importancia tanto para la agricultura como para la ganadería. El aumento del uso de fertilizantes nitrogenados y fosfatados para mejorar la producción provocó el deterioro de la calidad del agua superficial de varios ríos y arroyos, convirtiendo el agua subterránea en un recurso estratégico y fuente de vital importancia para el consumo humano y el riego.

El método para calcular el índice de factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea (IDHAS) desarrollado por Collazo (2006), se diseñó en un primer momento para identificar zonas donde el agua subterránea podía cubrir las necesidades básicas de los habitantes de los sectores más carenciados y lograr un progreso en el desarrollo humano, al fortalecer los objetivos

(PNUD, s.f.) del Índice de Desarrollo Humano (IDH) del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.

El método considera la permeabilidad de la formación, la calidad del agua subterránea y el costo de extracción de la misma. Fue aplicado para las principales formaciones del Uruguay y, específicamente, para el SAG, como resultado, se creó un mapa IDHAS del Uruguay y un mapa IDHAS del SAG, que aportan a la comprensión del agua subterránea y a la posibilidad de desarrollo a través de ésta.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE IDHAS

El método para el cálculo del Índice IDHAS, implica ponderar tres variables y llegar a un índice que sea representativo de la posibilidad de desarrollo humano a partir del agua subterránea.

Las variables consideradas con sus respectivos índices son:

- a) Calidad del agua subterránea, que se le asigna el Índice de Potabilidad (IPA).
- b) Permeabilidad de la formación, que se le asigna el Índice de Productividad (IP).
- c) Costo de extracción del agua subterránea, que se le asigna el Índice de Costo de Extracción (ICE).

Para poder ser cartografiado, al índice IDHAS se le asigna un color, que varía de 0 (IDHAS nulo), color rojo a 40 (IDHAS muy alto), color verde intenso, pasando por el amarillo, al estilo semáforo, pudiendo generar mapas de rápida visualización, que indican las zonas más y menos factibles para el desarrollo humano en función del agua subterránea.

Este índice es aplicable a nivel local o regional; el grado de precisión en la cartografía dependerá de la escala de trabajo utilizada y del grado de detalle que se quiera conseguir. Las zonas resultantes que aseguren un desarrollo humano deben más tarde ser integradas dentro de un plan de gestión de aguas subterráneas que asegure el uso sustentable del recurso.

2.1 Descripción de cada variable e índices:

a. Calidad del agua subterránea: Índice de Potabilidad (IPA)

La calidad del agua subterránea definida por su composición química y biológica, en especial la destinada al abastecimiento humano, es un tema que preocupa a nivel mundial, por su repercusión en la salud humana y animal. Es de fundamental importancia conocer los efectos en la salud que puede causar cada uno o el conjunto de los elementos que ésta contiene. En este aspecto y para la aplicación de este método,

se considera como agua potable aquella cuya composición fisicoquímica no exceda los límites establecidos por las normas de cada país y por los establecidos en la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2000), asegurando así el desarrollo humano, de cualquier región.

Para ponderar la variable Calidad del agua subterránea, se generó un índice de potabilidad (IPA), que va desde 0 a 2 en función de la potabilidad del agua subterránea, como se indica en la tabla 1.

Tabla1. Índices de Potabilidad del agua subterránea (IPA)

Calidad del agua subterránea	No potable. Riesgo alto para la salud humana	Potable con tratamiento	Potable sin tratamiento
Índice potabilidad (IPA)	0	1	2

b. Permeabilidad: Índice de Productividad (IP)

La Permeabilidad (k) es “el coeficiente de proporcionalidad entre el flujo específico o velocidad de flujo y el gradiente hidráulico, cuando es válida la ley de Darcy” (Página 453). “Es constante para cada medio y para cada fluido”. “Influye, además de la naturaleza del terreno, la densidad y la viscosidad del fluido (Darcy, p453)., las cuales son a su vez función de la temperatura y de la presión” (Custodio & Llamas, pp 453-455). Es, por lo tanto, el principal parámetro que caracteriza las propiedades hídricas de los materiales y el que registra mayor variación.

Para el cálculo del índice IDHAS, se consideró la permeabilidad como una

variable de productividad, que cambia de acuerdo con las características del medio para poder almacenar y transmitir el agua.

Para el cálculo del índice IP, se tomó como base la tabla de permeabilidad de Benítez (1963) (Custodio, & Llamas, 1983) y se elaboró una tabla que considera los IP en función de la permeabilidad de la formación, de donde resultó un IP igual a 0, para las Impermeables (I), IP igual a 1, para las poco permeables (PP), IP igual a 2, para las formaciones algo permeables (AP), IP igual a 3 para las permeables (P), IP igual a 4 para las muy permeables (MP) y un IP con valor 5 para las formaciones con permeabilidad mayor a 500m/día, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Índices de productividad (IP)

K (m/día)	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻²	10 ⁻² a 1	1 a 50	50 a 500	>500
Clasificación	I	PP	AP	P	MP	MP
Productividad	Nula	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Índice de Productividad (IP)	0	1	2	3	4	5

Fuente: modificado de Benítez (1963) (Custodio, & Llamas, 1983)..

C. Costo de extracción del agua subterránea:
Índice de Costo de Extracción (ICE)

Se refiere al valor económico necesario para la extracción del agua subterránea. El Costo de Extracción (CE) se calcula sumando los Costos de Perforación (CP), más los Costos de Equipo de Bombeo (CEB). Los costos derivados del Gasto Energético de Bombeo (GEB) y del tratamiento del agua (CT) si se requieren, se calcularán para un periodo de tiempo anual. Y variarán según el país, provincia o estado, de acuerdo con las energías utilizadas para el bombeo y sistema para el tratamiento del agua.

$$\text{Eqn (1) } CE = CP + CEB + (GEB + CT)$$

En vista de la complejidad para determinar los costos de extracción, ya que los casos a considerar son numerosos en función del método de perforación a utilizar, profundidad, diámetros, tipo y material de cañerías, equipos de bombeo, etc., y tratando de facilitar la aplicación del método, se consideraron distintos modelos de captaciones de agua subterránea y equipos de bombeo, para poder categorizar los costos de extracción en bajo, medio, alto y muy alto. Los costos de perforación y equipo de bombeo fueron calculados considerando precios del mercado nacional e internacional en dólares americanos.

Tabla 3. Índice costo de extracción del agua subterránea (IPA)

Costo de Extracción (U\$S)	>100.000	50.000 a 100.000	30.000 a 50.000	<30.000
Clasificación Costo de Extracción	Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Índice de Costo de Extracción (ICE)	1	2	3	4

Para la aplicación del método se consideró un ICE bajo para los CE menores a 30,000 dólares americanos, asignándole un valor de 4, un ICE medio para los CE entre 30,000 y 50,000 dólares americanos, asignándole un valor 3, un ICE alto para los costos comprendidos entre 50,000 y 100,000 dólares americanos, asignándole un valor 2 y un ICE muy alto para los costos que superen los 100,000 dólares americanos, asignándole un valor de 1, como se indica en la tabla 3.

Cálculo del Índice de factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea (IDHAS): para obtener el Índice IDHAS, se multiplica el valor del IP con el valor del ICE, asignados a la formación a la que se le quiere determinar el índice IDHAS. El resultado será un valor que variará entre 0 (nulo) y 20 (muy alto) y que luego se multiplicará con el Índice de Potabilidad. Este último valor representa el Índice de

factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea, como se muestra en la tabla 4.

Las categorías del IDHAS, van de “nulo” desarrollo humano en función del agua subterránea a “muy alto”.

El índice IDHAS O, se refiere a zonas donde la factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea es nula, ya sea porque se trata de terrenos impermeables o debido a la contaminación del agua subterránea que pone en riesgo la salud humana. El índice IDHAS con valor 1 a 8, refiere a zonas donde la factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea es muy baja, debido a la muy baja productividad de la formación geológica, a los altos costos de extracción del agua subterránea o al tratamiento de potabilidad del agua. El índice IDHAS con valor 8 a 16, se refiere a zonas donde la factibilidad

de desarrollo humano en función del agua subterránea es baja, ya sea por la baja productividad de la formación o por los altos costos de extracción del agua subterránea. El índice IDHAS con valor 16 a 20, se refiere a zonas donde la factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea es media, con productividad media y costos de extracción medios a altos. El índice IDHAS con valor 20 a 32, se refiere a zonas donde la factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea es alta, debido principalmente a la alta productividad y a los bajos costos. Por último, el índice IDHAS con valor de 32 a 40, se refiere a zonas donde la factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea es muy alta, con formaciones geológicas con muy alta productividad y bajos costos de extracción.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La República Oriental del Uruguay se encuentra en la parte Oriental del Cono Sur, limita al Norte y Noreste con la República Federativa del Brasil; por el Oeste, con la República Argentina a través del Río Uruguay; al Sureste, con el Océano Atlántico; y al Sur, con el Río de la Plata. Está situada entre los paralelos 30° y 35° de latitud Sur y los meridianos 53° y 58° de longitud Oeste y se caracteriza por su topografía homogénea, constituyendo una “penillanura”, donde el punto más alto corresponde al Cerro Catedral con 513.6 m de altura, seguido por el Cerro de las Ánimas, con 501 m de altura, ambos ubicados en el departamento de Maldonado, según el Instituto Geográfico Militar del Uruguay (IGM, s.f.).

Tabla 4. Cálculo del IDHAS

		IP								
		Nula 0	Muy Bajo 1	Baja 2	Media 3	Alta 4	Muy Alta 5			
ICE	Muy alto 1	0	1	2	3	4	5	X	0	No potable, con riesgo alto para la salud humana
	Alto 2	0	2	4	6	8	10		1	Potable solo con tratamiento
	Medio 3	0	3	6	9	12	15		2	Potable sin tratamiento
	Bajo 4	0	4	8	12	16	20			

IDHAS	Nulo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Valor	0	1 a 4	8-16	16 a 20	20 a 32	32 a 40

Geología e hidrogeología del Uruguay

Uruguay está conformado geológicamente por rocas de edad Proterozoica a Fanerozoica. Las rocas más antiguas, plutónicas, metamórficas y sedimentarias plegadas, asociadas a ciclos orogénicos de acuerdo a Bossi y Gaucher (2014), fueron denominadas Predevónicas por Walther (1932, Bossi, & Gaucher, 2014), y constituyen el Basamento Cristalino (BC), que aflora al Sur del Río Negro y que se divide en cuatro grandes terrenos de acuerdo a Bossi y Gaucher (2014) en Terreno Tandilia (Bossi et al., 2005), Terreno Piedra Alta (Bossi et al., 1993), Terreno Nico Pérez (Bossi, & Campal, 1992), Terreno Cuchilla Dionisio (Bossi et al., 1998) (referencias citadas en Bossi, & Gaucher, 2014). Este conjunto de rocas ocupa casi la mitad del total del territorio nacional, abarcando unos 80,000 km², con valores de permeabilidad muy diversos en función del grado de alteración, fracturación y disolución, encontrándose zonas que van desde nula a alta productividad.

Al Norte del Río Negro, se depositan sedimentos Fanerozoicos que constituyen la Cuenca Norte (De Santa Ana, 2004). Al Sur, secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias de edad Juro-Cretácica se desarrollan sobre el Basamento Cristalino, forman las cuencas de Santa Lucía y Laguna Merín, denominadas en conjunto como corredor Santa Lucía-Aiguá-Merín del Uruguay (Rosello et al., 2007). Estas secuencias sedimentarias postdevónicas al Norte y al Sur del Uruguay, se describen de manera sucinta, de acuerdo con la edad de sedimentación y de base a techo. La distribución de las rocas pre y postdevónicas se muestran esquemáticamente en la figura 1.

La secuencia Devónica está representada en Uruguay por: - Formación Cerrezuelo Bossi, 1966 en Bossi, 1991, secuencia granodecreciente, típica de un ambiente marino transicional, integrada por areniscas gruesas a medias con lentes de areniscas finas y lutitas caoliníticas en la base y por areniscas finas a medias con niveles de arenisca

gruesa, gravillosa y conglomerádicas hacia el tope (Bossi, & Navarro, 1991; Bossi et al., 1998). Esta formación constituye un acuífero poroso de baja permeabilidad, con valores informados por Montañó y colaboradores (2006) de 0.10 a 0.26 m/día para su porción semiconfinada y de 0.11 m/día para el área confinada. El mismo autor indica que los pozos captadores de esta formación tienen una profundidad media de 60 m y más de 100 m en su sector confinado, con caudales de 1 a 5 m³/h (Montañó et al., 2006).

Formación Cordobés (Bossi, 1966), integrada principalmente por pelitas grises, con intercalaciones de arenisca fina en un ambiente de sedimentación marino (Bossi et al., 1998), presenta una permeabilidad muy baja y los pozos que se construyen para la captación del agua subterránea son de gran diámetro: 1 a 2 m, con caudales de 0.5 a 1.2m³/día (Montañó et al., 2006).

La Secuencia Pérmica está integrada por: Formación San Gregorio (Bossi, 1966), sedimentos que van desde gravas predominantemente (diamictitas, tilitas, conglomerados), hasta sedimentos arcillosos, en un ambiente glacial, fluvio-glacial o litoral (Bossi et al., 1998). La permeabilidad de esta formación es baja y constituye un sistema acuífero junto con la Formación Tres Islas (Montañó et al., 2006). Esta última (Ferrando, & Andreis, 1982), está integrada por areniscas finas a gruesas y pelitas, en ambiente deltaico progradacional, dominado por un sistema fluvial entrelazado distal (Ferrando, & Andreis, 1986, citado en Bossi et al., 1998). Esta formación constituye un acuífero poroso con permeabilidad baja y valores informados por Montañó y colaboradores (2006) de 0.9 m/día para su porción confinada al Este del país. Los pozos que captan agua de dicha formación tienen una profundidad media de 40 a 80 m, con caudales de 2m³/h. –

Formación Melo (Ferrando & Andreis, 1986), está constituida por facies arenosas y heterolíticas, a las que se asocian facies pelíticas, y psefitias típicas de ambiente marino (Bossi et al., 1998). La permeabilidad de esta formación es muy baja a nula.

Formación Yaguarí (Ferrando, & Andreis, 1986), está integrada por psamitas y pelitas, asociadas a facies heterolíticas y calcáreas, marcando una continentalización gradual (Bossi et al., 1998). La permeabilidad es baja a muy baja, la profundidad media de pozos es de 70 m con caudales del orden de los 2 m³/h (Montaño et al., 2006). Hacia la base dominan las pelitas, que reducen aún más la permeabilidad de la formación.

La secuencia Triásica-Jurásica está representada por una sucesión de sedimentos de origen continental fluvial y lacustre, intercalados por sedimentos de origen eólico e integrada por las siguientes formaciones:

Formación Buena Vista (Andreis, & Ferrando, 1982, 1986), integrada por areniscas finas hasta gruesas y en menor proporción pelitas, conglomerados, en ambiente fluvial entrelazado (Bossi et al., 1998).

Formación Cuchilla Ombú (Ferrando, & Andreis, 1986), integrada por areniscas medias a finas, típicas de ambiente eólico (Bossi et al., 1998).

Formación Tacuarembó (Ferrando, & Montaño, 1986), integrada por areniscas finas y muy finas, pelitas e intraconglomerados, de ambiente fluvio lacustre (Bossi et al., 1998).

Formación Rivera (Ferrando, & Montaño, 1986), integrada por areniscas finas a medias, de origen eólico (Bossi et al., 1998). Esta sucesión sedimentaria constituye el SAG, que aflora en los departamentos de Rivera y Tacuarembó, ocupando una extensión de 5,900 km², dispuesta en una faja de N-S de 160 km de largo y 40 km de ancho, aproximadamente. La porción confinada, ocupa varios departamentos del Uruguay y se extiende por un aproximado de 38,000 km². El techo confinante corresponde a los basaltos de la Formación Arapey (Bossi, 1966), que alcanzan más de 1,000 m de espesor hacia el Oeste, disminuyendo hacia el Este, donde afloran las areniscas. Toda la secuencia sedimentaria alcanza un espesor de más de 200m y constituye uno de los acuíferos más importantes del Uruguay.

La permeabilidad de las areniscas de la Formación Cuchilla Ombú y Rivera en la zona aflorante es de 5.5m/día y de 2.2 m/día para la Formación Tacuarembó (Collazo, 2006). Los pozos presentan una profundidad media de 60 m con caudales medios del orden de los 10 m³/h, encontrándose valores de más de 50 m³/h (Collazo, 2006). La porción confinada presenta una permeabilidad que va de 0.6 a 1.6m/día, según Decoud y Rocha (2000).

El techo basáltico del SAG, cuenta con un máximo de 26 derrames próximo a la ciudad de Salto y un mínimo de 4 derrames próximo a la ciudad de Artigas, con espesores que varían de 35±5 al Este y 42±5 al Oeste (datos presentados por Bossi, & Schipilov, 1998). El potente espesor de los derrames basálticos implica que, para alcanzar las areniscas del SAG, los pozos alcancen profundidades superiores a los 1,000 m en el litoral con caudales que pueden superar los 370 m³/h (Montaño et al., 2006).

Estos derrames basálticos que integran la secuencia Cretácica, generan distintas permeabilidades en función del grado de alteración, fracturación y de la zona vacuolar. En la localidad de Garibaldi, a pocos kilómetros de la ciudad de Salto, los basaltos presentan permeabilidad por fracturación alta, con caudales superiores a los 90 m³/h, con pozos que no superan los 70 m de profundidad (Collazo, 2015). La secuencia Cretácica sedimentaria incluye las formaciones Migueles, Guichón, Mercedes y Asencio, todas definidas por Bossi (1966; Bossi et al., 1998). La Formación Migueles se caracteriza por niveles conglomerádicos en la base, seguidos por lutitas bituminosas interestratificadas con areniscas calcáreas, y estratos gravillosos rojos con capas de pelitas grises y negras, de ambiente lacustre-fluvial, de baja energía (Bossi et al., 1998). Se superpone a ésta, la Formación Guichón, constituida por areniscas conglomerádicas hasta pelíticas, correspondiente a un ambiente fluvial (Bossi et al., 1998).

En el tope de la secuencia se encuentra la Formación Mercedes, que se subdivide

en dos miembros; el inferior integrado por una secuencia estrato y granodecreciente, formado por conglomerados que pueden evolucionar hasta pelitas, y un miembro superior integrado por una secuencia arenosa fina a media, en ambiente aluvial tipo fluvial (Bossi et al., 1998). Esta secuencia al Oeste y al Sur del país, presenta permeabilidad variable que puede variar de baja a media. La permeabilidad calculada para la Formación Mercedes es de 0.12 m/día en el sector Oeste y entre 1 y 10 m/día en sector Sur, con obtención de caudales mayores de 10 m³/h (Montaño et al., 2006).

Los sedimentos Cenozoicos del Uruguay se localizan al Oeste, Sur y Sureste del país y las formaciones más relevantes son la Formación Raigón (Gosso, 1965), la Formación Salto (Bossi, 1966) y la Formación Chuy (Goso, & Anton, 1974, citados en Bossi et al., 1998). La Formación Raigón está integrada por arenas gruesas y conglomerádicas con intercalaciones de niveles arcillosos, de origen fluvial, entrelazada de alto régimen de flujo (Bossi et al., 1998). La permeabilidad de Raigón es alta con valores que oscilan entre 25 y 50 m/día, con caudales que superan los 50 m³/h y profundidad media de pozos de 30 m (Montaño et al., 2006).

La Formación Salto está integrada por ciclos sedimentarios granodecreciente, desde diamictitas a areniscas y conglomerados, que se alternan hasta la cima, típicas de ambiente fluvial (Bossi et al., 1998). Esta formación presenta alta permeabilidad de 1.6 m/día, caudales superiores a los 10 m³/h y profundidad media de pozos de 25 m (Montaño et al., 2006).

La Formación Chuy está integrada por areniscas medias y gruesas, intercaladas con areniscas finas; subordinadamente pelitas arenosas y areniscas arcillosas., de ambiente transicional, marino costero (Bossi et al., 1998). Esta formación presenta alta permeabilidad de 5 a 40 m/día, caudales mayores a 15 m³/h y profundidad media de pozo de 30 m (Montaño et al., 2006).

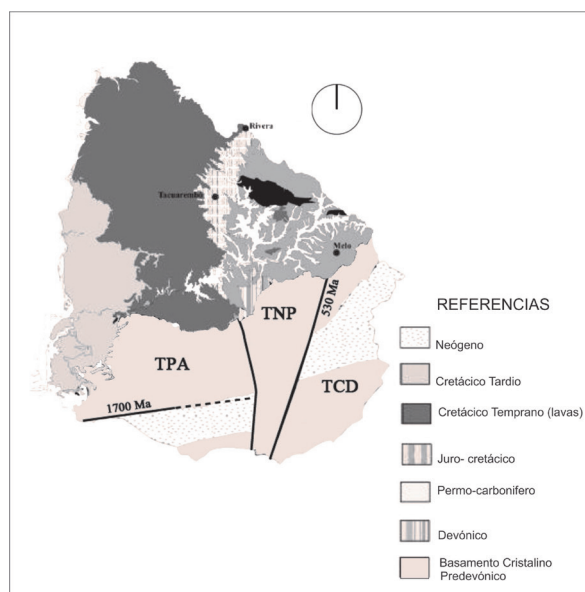


Figura 1. Esquema tectónico y estratigráfico del Uruguay. Fuente: modificado de Bossi et al. (2005), (Bossi, & Gaucher, 2014) y De Santa Ana (2006).

METODOLOGÍA

El Índice IDHAS fue aplicado para las principales formaciones del Uruguay, mencionadas anteriormente, tomando como base la Carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000 (Bossi et al., 1998) y el Mapa hidrogeológico de la República Oriental del Uruguay, elaborado por Heinzen y colaboradores (2003).

El IDHAS también se calculó para el SAG, en su área aflorante y confinada. Para determinar el IDHAS, es necesario previamente estimar índices IP, ICE e IPA.

El IP fue calculado de acuerdo con la permeabilidad de las formaciones y los caudales erogados, tomando datos publicados por diversos autores y, además de los estimados. Para el Basamento Cristalino, se consideró la fracturación y la productividad de los pozos, presentados por Montaño y colaboradores (2014) y para los derrames basálticos la densidad de fracturación de acuerdo con el mapa de lineamientos presentados en la Carta Hidrogeológica de la Cuenca Cuareim (2015). Además, se consideraron los datos de extracción de agua subterránea publicados por la Dirección Nacional de Geología y Minería

(DINAMIGE, 2009) y los datos disponibles en el visualizador geológico-minero de esta institución (DINAMIGE, s.f.) y los disponibles en el visualizador de información hídrico de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA, s.f.) del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA, UNIT, 2010).

El ICE, se determinó considerando la profundidad de los pozos realizados en el país, datos disponibles en los visualizadores de DINAMIGE (2009) y DINAGUA (s.f.).

Para el SAG confinado, se utilizó la carta de isoespesores de coladas basálticas (Bossi, & Schipilov, 1998).

El IPA, se determinó a partir de las concentraciones de los distintos elementos encontradas en los diferentes acuíferos, considerando los límites máximos establecidos por normas nacionales (UNIT, 2010) e internacionales (OMS, 2006) de potabilidad de agua. En Uruguay, el agua subterránea es potable, encontrándose

localmente concentraciones superiores a los máximos establecidos para los iones Arsénico y Nitrato principalmente (Collazo et al., 2019).

RESULTADOS

El resultado del IDHAS para las principales formaciones geológicas del Uruguay y específicamente para el SAG en su área aflorante y confinada, se muestra en la tabla 5 y en las figuras 2 y 3. El IDHAS resultante para Uruguay es mayormente bajo (valores de 8 a 16), debido a la gran superficie ocupada por rocas Predevónicas que integran el BC y por los derrames basálticos de edad Cretácica, que presentan muy baja a baja permeabilidad, resultando un IP bajo y un IDHAS bajo. A pesar de esto, localmente la permeabilidad puede alcanzar valores altos en función del grado de alteración, fracturación y disolución de las rocas, por consiguiente, resulta un IP alto y un IDHAS alto.

Tabla 5. IDHAS, IP, ICE, IPA para las principales formaciones geológicas del Uruguay

Periodo	Nombre de la Formación	K media (m/día)	IP	Prof. media de pozos	ICE	IPA	IDHAS
Predevónico	BC	>0,01*	1	60	4	2	8
	BC muy fracturado	1*	3	60	4	2	24
Devónico	Cerrezuelo	0,1 – 0,2	2	60	4	2	16
Devónico	Cordobés	>0,01*	1	25	4	2	8
Pérmico Inf.	San Gregorio	>0,01*	1	80	4	2	8
Pérmico	Tres Islas	0,7 -0,9	2	80	3	2	12
Pérmico Sup.	Melo	>0,01*	1	30	4	2	8
Pérmico Sup.	Yaguarí	0,1*	2	70	4	2	8
Jurásico	SAG aflorante (Cuchilla Ombú, Tacuarembó, Rivera).	5,5	3	60	4	2	24
Jurásico							
Jurásico							
Jurásico	SAG infra basáltico	0.5 a 1,6	2	+100**	4	2	16
				+200**	2	2	8
				+300**	2	1	4
				+400**	1	1	2
				+500**	1	1	2
Cretácico Inf.	Arapey	>0,01*	1	60	4	2	8
	Arapey muy fract.	1*	3	60	4	2	24
Cretácico Sup	Mercedes - Guichón	0,1	2	60	4	2 -(1)	16
Neógeno	Raigón	25-50	4	40	4	2 -(1)	32
Neógeno	Chuy	2,5	3	30	4	2	24
Neógeno	Salto	2,5	3	40	4	2	24

*Valor estimado

**Espesor de coladas

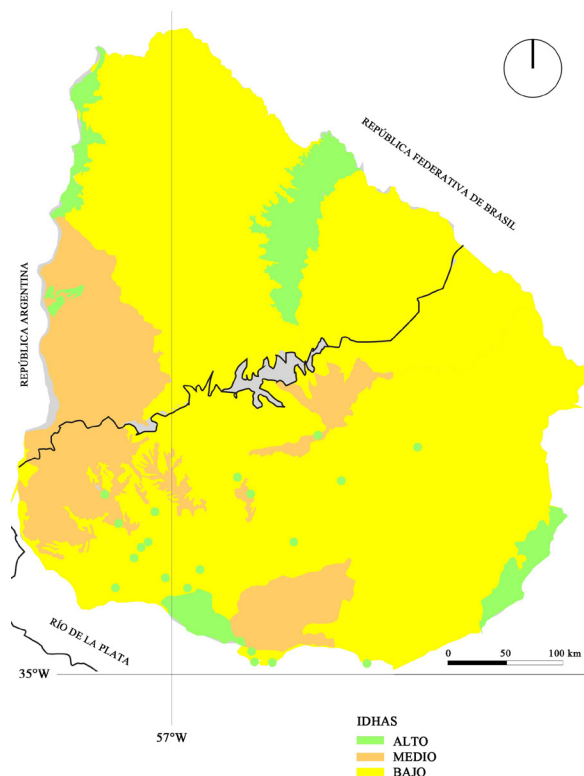


Figura 2. Mapa IDHAS para el Uruguay.

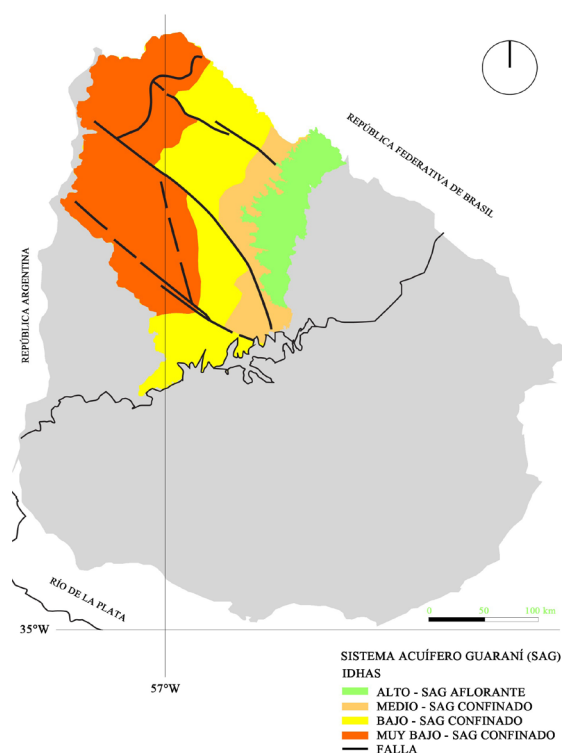


Figura 3. Mapa IDHAS para el SAG aflorante y confinado.

Con respecto a las secuencias sedimentarias posdevónicas, el IDHAS resultó bajo para las secuencias Devónicas y Pérmicas, debido a la baja productividad de las mismas.

En el caso de la secuencia Jurásica correspondiente al SAG, el IP es alto, el ICE es bajo y el índice IPA es igual a 2, potable sin tratamiento, a saber, un índice IDAHS alto en el área aflorante y medio, bajo y muy bajo para su porción confinada. Para el cálculo del índice IDHAS en el sector confinado, se consideró el mapa de isoespesores de las coladas basálticas (Bossi, & Schipilov, 1998), considerando isoespesores de 100 m, 200 m y <300 m, para poder determinar la profundidad de los pozos en alcanzar las areniscas del SAG y obtener así el índice ICE. El mapa del SAG se muestra en la figura 3.

La secuencia sedimentaria Cretácica, Sistema Mercedes-Guinchón, presenta un IDHAS medio, el índice IP es bajo debido a su baja permeabilidad y el índice ICE bajo, con respecto al IPA, el agua es potable sin tratamiento, aunque hay zonas donde la concentración de As es elevada (Collazo et al., 2019), por ende, es imprescindible realizar tratamiento.

El IDHAS, calculado para las formaciones Raigón, Chuy y Salto, es alto. Estas formaciones presentan índices IP alto y un índice ICE bajo. El índice IPA es potable sin tratamiento, aunque el acuífero Raigón, presenta concentraciones elevadas de As (Collazo et al., 2019), que limitan en muchos casos su uso.

CONCLUSIONES

Debido a la necesidad de determinar la factibilidad que tiene el agua subterránea para el desarrollo humano, y aportando a los objetivos del Índice de Desarrollo Humano (IDH) del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, s.f.), se diseñó un método que tiene como fin establecer un IDHAS que es aplicable en cualquier localidad o región y su precisión dependerá

de la escala de trabajo y del detalle que se quiera conseguir.

A modo de ejemplo de aplicación del método, el IDHAS se determinó para las principales formaciones geológicas del Uruguay y específicamente en el SAG en su área aflorante y en su área confinada, de ahí resultó un mapa IDHAS del Uruguay que se presenta en la figura 2 y un mapa IDHAS del SAG en su área aflorante y confinada, que se presenta en la figura 3.

De la aplicación del método surge que la mayoría de las formaciones en Uruguay presentan un IDHAS bajo, con valores calculados de 8 a 16.

Las formaciones con índice alto, valores calculados de 24 de acuerdo con el método, corresponden a las secuencias sedimentarias del Jurásico (SAG aflorante) y del Neógeno (Acuíferos Raigón, Chuy y Salto).

El área del SAG confinada, presenta IDHAS medio, bajo y muy bajo, debido al espesor de las coladas basálticas, que presenta su máximo espesor al Oeste del Uruguay, por tanto, resulta un ICE que varía de acuerdo con la profundidad que alcanzarían los pozos hasta llegar a las areniscas del Acuífero Guaraní.

El método pretende aportar a la comprensión del agua subterránea y a la posibilidad de desarrollo a través de ésta.

REFERENCIAS

- Bossi, J., Ferrando, L., Montaña, J., Campal, N., Morales, N., Gancio, F., Schipilov, A., Piñeiro, P., & Sprechman, P. (1998). Carta geológica del Uruguay 1/500.000 con memoria explicativa. Cátedra de Geología-Facultad de Agronomía, Geoeditores.
- Bossi, J., & Gaucher, C. (2014). Estratigrafía del Predevónico del Uruguay. Capítulo 1. En J. Bossi, & C. Gaucher (Eds.), Geología del Uruguay. Tomo 1. Predevónico 1 (pp. 19-42). Universidad de la República.
- Bossi, J., & Navarro, R. (1991). Geología del Uruguay. Tomo 1 y 2. Montevideo: Departamento de Publicaciones, Universidad de la República.
- Bossi, J., & Schipilov, A. (1998). Grupo Arapey: Basaltos confinantes del Acuífero Guaraní en Uruguay. *Agrociencia*, 3(1), 12-25.
- Carta Hidrogeológica de la Cuenca Cuareim. Escala 1:25000. (2015). Comité Intergubernamental Coordinador de los países de la Cuenca del Plata. Programa para la gestión sostenible de los recursos hídricos de la Cuenca del Plata, en relación a los efectos de la variabilidad y el cambio climático. Recuperado de https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/mapa_hidrogeologico_cuenca_cuareim.pdf
- Collazo, M. P. (2006). Investigación hidrogeológica del Acuífero Guaraní en el área aflorante de los departamentos de Rivera y Tacuarembó, Uruguay (Tesis doctoral). Tomo I y II. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- _____ (2015). Estudio geológico e hidrogeológico en la localidad de Garibaldi. Departamento de Salto. Informe Técnico. INC.
- Collazo, P., Mañay, N., & Pamoukaghlián, K. (2019). Proyecto AsURU: Arsénico en agua subterránea de Uruguay y riesgo a la salud asociado. Avances y dificultades en su gestión. Actas IX Congreso Uruguayo de Geología, Flores, Uruguay.
- Custodio, E., & Llamas, R. (1983). Hidrología Subterránea Tomo I y II. España: Edición Omega.
- Decoud, P., & Rocha, L. (2000). Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NW del Uruguay. I Congreso Mundial Integrado de Águas Subterráneas. Ceará, Brasil. Recuperado de <http://ceregas.org/files/Repositorio%20documentos%20agua%20subterranea/Documentos%20del%20excel/39%20Guarani%20-%20NW%20Uruguay.PDF>.
- De Santa Ana, H. (2004). Análise Tectono-Estratigáfica das Sequencias Permotriasica e Jurocretácea da Bacia Chacoparanaense Uruguaya (Tesis doctoral). Rio Claro (SP), Brasil: Universidade Estadual Paulista.

- De Santa Ana, H., Verolavsky, G., Fulfaro, V., & Rossello, E. (2006). Cuenca Norte: Evolución Tectónica y Sedimentaria del Carbonífero-Pérmico. En Cuencas Sedimentarias de Uruguay-Paleozoico (pp. 209-256). DIRAC. Universidad de la Republica. Cap. VI.
- Dirección Nacional de Agua (DINAGUA). (s.f.). Recuperado de <https://app.mvotma.gub.uy/geoportal/>
- Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE). (2009). Estimación de la extracción de aguas subterránea. Principales acuíferos del Uruguay. Recuperado de https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/estimacion_de_extraccion_anual_de_aguas_subterraneas_en_los_principales_acuiferos_del_uruguay.pdf (s.f.). Visualizador geológico-minero. Recuperado de http://visualizadorgeominero.dinamige.gub.uy/DINAMIGE_mvc2/
- Heinzen, W., Carrión, R., Massa, E., Pena, S., & Stapff, M. (2003). Mapa Hidrogeológico del Uruguay. Escala. 1:100.000. DINAMIGE. MIEM. Recuperado de https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/carta_hidrogeologica_del_uruguay_version_2000.pdf
- Instituto Geográfico Militar (IGM). (s.f.). República Oriental del Uruguay. Recuperado de <http://www.sgm.gub.uy/>
- Montaño, J., Collazo, P., Álvarez, C., & Montaño, M. (2014). Caracterización hidrogeológica del Basamento Cristalino de Uruguay. En Geología del Uruguay Pre devónico (pp. 421-427). Montevideo: Universidad de la República.
- Montaño, J., Gagliardi, S., & Montaño, M. (2006). Recursos Hídricos Subterráneos del Uruguay. Boletín Geológico y Minero, 117(1), 201-222. ISSN: 0366-0176. 2006
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías para la calidad del agua potable (3ª edición). Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1
- Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD). (s.f.). Recuperado de <https://www.undp.org/content/undp/es/home.html>
- Rosello, A., Verolavsky, G., Masquelin, H., & De Santa Ana, H. (2007). El Corredor Juro-Cretácico Santa Lucía-Aiguá-Merín (Uruguay); Cinemática Transcurrente Dextral y Controles preexistentes. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 62(1), 92-104.
- UNIT. (2010). Agua Potable-Requisitos. Recuperado de http://www.aigu.org.uy/documentos/me_dioambiente/unit.pdf