

Informe final publicable de proyecto

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay

Código de proyecto ANII: FMV_1_2019_1_155736

21/03/2023

VEROSLAVSKY BARBÉ BARBÉ, Gerardo (Responsable Técnico - Científico)

PEDRO MALTESE, Agustina (Investigador)

CARRIÓN OLIVERI, Roberto (Investigador)

SAMANIEGO BISIO, Lucía (Investigador)

LAMAS, Juan Nahuel (Investigador)

SANTAROSA VITURI, Lucas (Investigador)

CASTRO, Saulo (Investigador)

MANGANELLI TREITAS, Alberto José (Investigador)

SOTO NÚÑEZ, Matías (Investigador)

AUBET AYRALA, Natalie R. (Co-Responsable Técnico-Científico)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS (Institución Proponente) \\ CENTRO DE ESTUDOS AMBIENTAIS - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP) \\ UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA \\ MINISTERIO DE VIVIENDA, ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y MEDIO AMBIENTE. CENTRO REGIONAL PARA LA GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Resumen del proyecto

Se presentan los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación de las áreas de afloramiento del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en los departamentos de Rivera, Artigas y Tacuarembó. En un abordaje a dos escalas (1:100.000, 1:50.000) fueron elaborados 32 mapas temáticos y otros productos sobre el relieve, geología, suelos, hidrogeología, hidroquímica, uso de suelos, vulnerabilidad GOD y DRASTIC y riesgo de contaminación. El mapa regional de vulnerabilidad GOD arrojó una vulnerabilidad muy alta de 16,23%, alta de 81,37, moderada de 2,34% y baja de 0,06% y el mapa DRASTIC una vulnerabilidad muy alta de 24,02%, alta de 64,73%, moderada 9,89% y baja de 1,36%. Ambos métodos confirmaron el bajo grado de protección natural del SAG frente a potenciales cargas contaminantes. La vulnerabilidad GOD y DRASTIC en los pilotos de Rivera y Tacuarembó mostraron valores de vulnerabilidad relativamente comparables. En el Piloto Artigas la evaluación de la vulnerabilidad incluyó el área no aflorante del SAG cubierta por basaltos. El riesgo de contaminación del SAG en el área aflorante fue evaluado a través del Índice de Susceptibilidad y mostró un riesgo muy alto 2,95%, alto 62%, moderado 33,3% y bajo 1,76%. El riesgo de contaminación del SAG en los pilotos arrojó los siguientes resultados: Rivera, muy alto 4,05%, alto 22,35, moderado 53,5% y bajo 20,09%; Tacuarembó, muy alto 7,05%, alto 71,3%, moderado 21,17% y bajo 0,48%. En el Piloto Artigas, incluida la zona confinada del SAG, los resultados son: muy alto 7,88%, alto 30,12%, moderado 58,96% y bajo 3,04%. Los avances logrados contribuyeron a mejorar el conocimiento del SAG en aspectos geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos y, en particular, a proponer un nuevo modelo conceptual sobre la dinámica de las aguas subterráneas en su área de afloramiento. Los resultados significan un aporte al conocimiento del SAG y contribuyen como herramientas para apoyar a las instituciones gestoras y los usuarios del agua subterránea en relación con la gestión, planificación del uso y la protección ambiental del SAG.

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias de la Tierra y relacionadas con el Medio Ambiente / Geociencias multidisciplinaria / Hidrogeología, Geología, Sensoramiento Remoto, Uso del Territorio

Palabras clave: Acuífero Guaraní / vulnerabilidad contaminación / área recarga /

Introducción

El SAG se extiende por la región centro – norte del territorio uruguayo abarcando un área de 36.170 km² (PEA 2009) sobre la que viven aproximadamente 400.000 habitantes. Aflora a lo largo de una extensa franja de areniscas (4.864 km²) que posee aproximadamente 155 km de largo por 35 a 50 km de ancho. El SAG en el área aflorante está constituido por las formaciones Rivera y Tacuarembó, una sucesión de areniscas esencialmente silicilásticas, de edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior, que con un espesor promedio de 90 m se apoya en discordancia sobre unidades paleozoicas e infrayace a los basaltos cretácicos de la Formación Arapey. Hacia el Oeste, se extiende en el subsuelo de la Cuenca Norte cubierto por basaltos que poseen espesores que van desde los 100 a 150 m en el extremo oriental del borde de la cuesta basáltica (próximo al contacto con el SAG), hasta los 500 a 1100 m en los sectores más profundos de la cuenca (en la región próxima al río Uruguay). Algunos asomos del SAG aparecen en la región de la cuesta basáltica, llamados "ventanas", controlados por fallas de dirección NW asociadas a otras fallas NS y NE.

DINAMIGE (2009) estima que se extrae un volumen cercano a 25 millones de m³/año y, entre sus diversos usos, se destacan el suministro de agua potable a la población urbana, suburbana y rural, el riego, el abastecimiento de agua para ganado, actividades agroindustriales y su explotación en los centros turísticos termales sobre el Litoral del Río Uruguay (Montaña, 2004). El volumen extraído para abastecimiento público de este acuífero representa un tercio del agua subterránea total utilizada por OSE (Pérez, 2015), existiendo ciudades donde este recurso constituye la única fuente de captación de agua potable (ej. Rivera, Tranqueras)

Antecedentes

La primera referencia sobre la naturaleza acuífera de las rocas que constituyen al SAG corresponde a Buquet (1941) quien, a partir de una valiosa cantidad de datos e información de perforaciones (profundidad, caudal, calidad) refiere a las "Areniscas de Tacuarembó". El hallazgo de aguas termales en Salto (pozo Arapey, 1941) mostrará el potencial acuífero con el alumbramiento de enormes volúmenes de aguas surgentes con temperaturas próximas a 45°C y buena calidad natural. Castagnino (1966) valora esta unidad acuífera en un estudio general sobre el potencial de los recursos hídricos de Uruguay.

La primera mención referida a la geología de las "Areniscas de Tacuarembó" fue Walther (1919) pero fue el trabajo pionero de Falconer (1931) el que permitió conocer su geología. Falconer (1937) realiza otro significativo aporte al definir y separar de las "Areniscas de Tacuarembó" a las "Areniscas de Buena Vista", le asigna una edad Pérmica, correlaciona con la Formación Río do Rasto de Brasil y describe las relaciones de discordancia entre ambas unidades.

Bossi (1966) otorgó el rango de Formación Tacuarembó a las "Areniscas de Tacuarembó" y Bossi et al. (1975) definieron dos miembros para la unidad: el Miembro Inferior y el Miembro Superior. En la década de 1980, el IPT y Tahal Consulting realizaron un conjunto de estudios que aportaron al conocimiento del acuífero en áreas profundas y confinadas.

Preciozzi et al. (1985) cartografiaron el área de afloramiento de la Formación Tacuarembó a escala 1:500.000. Ferrando et al. (1987) propusieron dividir todo el conjunto arenoso comprendido entre la Formación Buena Vista y los basaltos de la Formación Arapey en tres formaciones, de base a techo: Cuchilla del Ombú, Tacuarembó y Rivera, criterio adoptado por Bossi y Ferrando (2001) en el Mapa Geológico del Uruguay 1: 500.000.

A partir de la década de 1990, se producen variadas contribuciones sobre el conocimiento del SAG desde el ámbito técnico y académico, entre los que se destacan: Montaña y Carrión (1990), Dellepere (1994), Montaña y Pessi (1998), Montaña y Collazo (1998), Martínez Paulo (1998), Montaña et al. (1998), Pérez et al. (2000), Pérez y Rocha (2002), Oleaga (2002), Oleaga y de Los Santos (2003), Montaña (2004), Montaña et al. (2005).

La puesta en marcha del PSAG constituye un hito como aporte al conocimiento del SAG en los países que lo comparten y sienta las bases para la cooperación y coordinación entre organismos de aguas y comunidades académicas. En ese contexto se producen avances a partir de tesis y proyectos de investigación como los de Pacheco (2004), Silverio et al. (2006), Collazo (2006), Rodríguez et al. (2006), Gómez (2007), Gagliardi (2008) y Nolla (2010).

Los propios productos generados por el PSAG marcan avances importantes a diferentes escalas como los LEBAC (2008), Manzano y Guimarães (2008) y PyT Consultora (2008) así como los de los pilotos Rivera-Santana do Livramento y Salto-Concordia llevados adelante por SNC - Lavalin (2009).

La evaluación de la vulnerabilidad y riesgo en áreas de afloramiento del SAG refieren principalmente a los trabajos de Silverio et al (2006), Collazo (2006), SNC-Lavalin (2009) y Pochintesta (2018). Aspectos geológicos y/o hidrogeológicos del SAG fueron abordados por Gastmans et al. (2010), Carrión et al. (2010), Saprizo et al. (2011), Gamazo et al. (2016), Pintos y Techera (2016), Benvenuto (2016) y Veroslavsky y Manganeli (2018).

El Mapa Hidrogeológico de la Cuenca del Cuareim a escala 1:250.000 (CPRM - DINAGUA, 2015) comprende al SAG en un esfuerzo técnico conjunto entre organismos brasileños y uruguayos. La DINAMIGE presenta el primer Mapa del Acuífero Guaraní en Uruguay (Techera et al., 2017).

Abordaje y descripción del estudio

El proyecto fue concebido sobre la base de las recomendaciones del Plan Estratégico de Acción (PEA, 2009) al finalizar el Proyecto SAG (PSAG) que, entre otras acciones, llamaba a poner foco en el estudio y la protección ambiental de las áreas de recarga del acuífero. Asimismo, se ha considerado de forma relevante la organización y diseño de los estudios y experiencia recabada en los trabajos realizados por la ENGECORPS (2014) en una consultoría sobre Vulnerabilidad Natural a la Contaminación y Estrategias de Protección del Sistema Acuífero Guaraní en las áreas de afloramiento de Brasil encomendada por la Agencia Nacional de Aguas de ese país y el trabajo del IPT en estudio de similar alcance en el área aflorante del SAG en el estado de San Pablo (Albuquerque et al 2021).

En el proyecto, los estudios tendientes a evaluar la vulnerabilidad y riesgo de contaminación tuvieron dos escalas de trabajo diferente, reproduciendo la experiencia del PSAG. Una para obtener un abordaje regional sobre la naturaleza del SAG (escala 1:100.000) y otra, a nivel local o de piloto (1:50.000), para lograr un mayor detalle que permitiera orientar futuros esfuerzos en la gestión y protección del acuífero en las tres capitales departamentales.

En los trabajos de investigación en las ciudades de Artigas y Tacuarembó, como parte de la política de formación de recursos humanos del proyecto, se instrumentaron dos tesis de maestría en el marco del PEDECIBA, actualmente ambas en etapa de finalización (una con beca financiada por la ANII). Cabe acotar que, en el marco de esas tesis, se realizaron otros estudios específicos sobre el acuífero que no se incluyen en este informe por estar fuera del alcance del proyecto.

El principal conflicto de gestión del agua subterránea en áreas de recarga del territorio uruguayo siempre se relacionó con su vulnerabilidad a la contaminación antrópica y el potencial incremento de elementos tales como nitratos, cloruros y compuestos orgánicos derivados de la infiltración directa de aguas contaminadas ya detectados durante el PSAG (PEA, 2009). Adicionalmente, la elevada concentración de pozos en el área, sumado a que varios de estos pozos no están catalogados en las bases de datos de los organismos gestores, provoca un desconocimiento del volumen real extraído del acuífero (Veroslavsky & Manganeli, 2018). En la ejecución del proyecto se consideró el uso actual del territorio y su relación con el SAG pero también en vista de los procesos emergentes de cambio y aceleración en el uso del suelo, fueron contemplados algunos aspectos posibles de demanda y explotación de agua del acuífero.

La relevancia del estudio llevado a cabo radica en que la vulnerabilidad intrínseca tiene gran utilidad en trabajos de planificación de uso del territorio y del agua (Auge, 2006), por lo que el proyecto concibió la elaboración de un conjunto de productos temáticos enfocados principalmente en la gestión del recurso agua pero válidos también para otros aspectos vinculados a los recursos naturales del territorio. Se realizaron estudios de gabinete y campo en áreas tales como relieve, aspectos geomorfológicos, geología, hidrogeología e hidroquímica como sustento a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación.

Metodología/diseño del estudio

Aspectos metodológicos

La vulnerabilidad de un acuífero depende de factores que hacen a su propia naturaleza y también externos, y es entendida aquí como la expresión del grado de sensibilidad de las aguas subterráneas a una alteración de su calidad natural originada por actividades antrópicas (Foster 1987, Foster et al. 2006). La importancia de evaluar la vulnerabilidad de un acuífero radica en que es de enorme utilidad en trabajos de planificación de uso del territorio y del agua (Auge, 2004).

La evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del SAG en áreas de afloramiento fueron ejecutadas a escala 1:100.000 y otra a escala 1:50.000. En este último caso, se contempló a las tres capitales que se emplazan sobre áreas de afloramiento del SAG: Artigas, Rivera y Tacuarembó.

La evaluación de la vulnerabilidad intrínseca puede ser hecha bajo métodos cuantitativos y cualitativos. Entre los primeros disponibles se aplicaron el método DRASTIC (Aller et al., 1987) y el método GOD (Foster, 1987). Ambos métodos utilizan parámetros físicos que involucran a la mayor parte de los procesos, a los cuales le asignan un valor de acuerdo con una escala y cuya combinación se obtiene un índice de vulnerabilidad.

GOD, desarrollada por Foster et al. (1987), siendo un modelo simple y sistemático. Este método se aplica habitualmente como primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades y determina la vulnerabilidad intrínseca, sin tomar en cuenta el tipo de contaminante que pueda afectar el acuífero. Los factores considerados para la evaluación de la vulnerabilidad son: el tipo de acuífero (G), el tipo de la zona no saturada (O) y la profundidad del nivel del agua o nivel freático (D), asignándole valores entre = y 1 a estas tres variables.

El tipo de acuífero (G) se clasifica entre 0 y 1, tomando 0 para no acuífero o surgente y 1 para libre, la zona no saturada (O) toma valores entre 0.4 y 1 variando entre arcillas y gravas para rocas no consolidadas y calcáreos para consolidados y el nivel del agua o freático (D) toma valores entre 0.6 y 1 según la profundidad del mismo. Los valores utilizados para cada uno de los parámetros que integran el método se presentan en las Tablas V.1 a Tabla V.8 y se resumen en la Figura V.1 a V.7. que lucen en el INFORME FINAL DEL PROYECTO.

El método DRASTIC fue desarrollado por Aller et al. (1987) para la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos. Este método toma un mayor número de parámetros para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero. Los factores considerados son: (D) profundidad del nivel estático (Figura V.2), (R) recarga efectiva, (A) litología del acuífero, (S) tipo de suelo, (T) topografía del terreno, (I) litología de la zona no saturada (zona vadosa) y (C) conductividad hidráulica del acuífero. Se presentan diferentes tablas con valores utilizados para el cálculo de cada uno de los parámetros requeridos para la aplicación del método DRASTIC en las áreas de estudio que lucen en el INFORME FINAL DEL PROYECTO.

Para el Factor R (recarga efectiva) la estimación de la recarga neta es un fenómeno complicado e involucra una serie de variantes que dificultan la estimación, por ese motivo fue utilizada para este cálculo la Recarga Potencial, que se trata de una metodología empleada por Santarosa et al. (2021) para estimar la recarga en el área de afloramiento de un sector del SAG en el estado de San Pablo (Brasil). De esta forma, las tasas de recarga se estimaron utilizando el método de recarga espacial (SR) y luego se compararon con otros dos métodos tradicionales (separación del flujo base y método de fluctuación del nivel freático). El método SR utiliza la distribución espacial de la evapotranspiración y la precipitación de las bases de datos GLDAS y TRMM y la escorrentía según el método empírico del Soil Conservation Service (SCS). A pesar de sus limitaciones intrínsecas, el método SR permitió una estimación robusta de la recarga con la capacidad de hacer frente a las variaciones espaciales y temporales (20 años), especialmente en la región de estudio que carece de planes de monitoreo hidrológico

Para el factor C (conductividad hidráulica del acuífero), se contempló la conductividad hidráulica de los suelos a partir de la CRSU16, y luego se estableció un reagrupamiento en seis grandes clases. Conceptualmente, se entendió que este criterio resulta más acertado para los objetivos del proyecto ya que se pondera la conductividad hidráulica vertical (suelo) sobre la horizontal (acuífero). Siendo en el caso del suelo este parámetro la medida que señala la capacidad del mismo de permitir el paso de fluidos a través de su estructura ajustándose mejor al objetivo principal que es analizar la sensibilidad del acuífero a ser afectado negativamente por un contaminante que ingresa desde la superficie.

Todos los aspectos metodológicos que involucran al resto de los factores que incluye el método DRASTIC lucen en el INFORME FINAL DEL PROYECTO.

Para la identificación y categorización del riesgo de contaminación se siguió el método propuesto por Ribeiro (2000) y modificado por Stigter et al. (2006) donde sobre un mapa de susceptibilidad a la contaminación se registra el inventario de fuentes de contaminación difusas (categorizado a partir del mapa de uso de suelo y superficie) y puntuales. Sobre este mapa se realizaron las consideraciones pertinentes de acuerdo a la metodología utilizada. La información de las fuentes puntuales de contaminación se obtuvo de la base de datos del Observatorio Ambiental Nacional del Ministerio de Ambiente y de las bases de las Intendencias de Tacuarembó, Rivera y Artigas

Para la aplicación de cada una de las metodologías utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación se construyeron un conjunto de cartas temáticas indispensables para su desarrollo con datos e información recabada, así como con la adquisición e interpretación de nuevos datos geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. Así, se pudieron generar mapas de: terreno (MDT = Modelo Digital de Terreno), pendientes, geológicos e hidrogeológicos. Otros mapas temáticos necesarios para el desarrollo metodológico como los de suelos y uso del territorio fueron generados a partir de recopilación de bases de datos, mapas e información disponibles en diversos organismos públicos. Mapas y diagramas hidroquímicos, de pH, conductividad eléctrica del SAG fueron producidos para ser incluidos en el análisis e interpretación de los resultados así como acompañar los mapas hidrogeológicos generados.

Las metodologías y criterios utilizados para la elaboración de los mapas de pendientes, geológicos, hidrogeológicos, suelos y uso de suelos figuran en el cuerpo principal del INFORME FINAL DE PROYECTO y lucen en la bibliografía que acompaña este resumen ampliado.

Organización y fases del proyecto

A manera de síntesis, el proyecto se desarrolló en 5 fases que, a su vez, fueron divididas en actividades, las que se recopilan a continuación:

Fase 1 - Inicio de actividades, planificación y discusión de acciones previstas

- Reuniones de integración del equipo de investigación
- Reuniones de definición en detalle del plan de trabajo y actividades
- Distribución de actividades entre el equipo de investigación
- Organización de aspectos operativos en la recolección de información
- Compatibilización de los objetivos del proyecto con las tesis de posgrado en curso
- Solicitud de información a organismos de gestión en geología, hidrogeología y ambiental
- Postergación de visitas a organismos y empresas por cuestiones sanitarias

Fase 2 - Actividades de evaluación relieve, geología, hidrogeología, hidroquímica

- Recopilación y análisis de los datos e información bibliográfica
- Recopilación y análisis de los datos e información cartográfica
- Organización de los datos e información de los organismos públicos
- Elaboración del banco de datos de pozos – discusión sobre estructura
- Interpretación de imágenes y fotos aéreas de las áreas de estudio
- Inicio del mapeo geológico de las áreas de afloramiento
- Reinterpretación de imágenes y fotos de áreas relevadas
- Reuniones para discutir las informaciones preexistentes
- Reuniones del equipo para discutir avances del proyecto - ampliación del área basáltica
- Postergación de trabajos de campo por situación sanitaria

Fase 3 - Actividades de gabinete y campo en área regional y pilotos

- Descripción geológica de pozos en organismos públicos (DINAMIGE, OSE, ANCAP)
- Descripción y recolección de datos hidrogeológicos en organismos públicos (DINAGUA; OSE)
- Levantamiento de datos geológicos e hidrogeológicos en campo
- Base de datos de pozos – sistematización
- Catastro de pozos en las áreas de afloramiento
- Muestreo de pozos para análisis químicos de aguas del SAG
- Muestreo de pozos para análisis químicos de aguas superficiales
- Muestreo de pozos para análisis isotópicos (tesis de posgrados)
- Relevamientos geológicos de las áreas de afloramiento (Pilotos)
- Envío de muestras para análisis químicos a laboratorios
- Recolección de datos e información de fuentes de contaminación
- Recolección de información de pozos (geología, hidrogeología, química) en empresas de perforación in situ
- Relevamiento de fuentes potenciales de contaminación (puntuales y difusas)
- Actividades específicas en áreas pilotos de levantamiento de datos e información
- Mapas de relieve, geológicos, pendientes, suelos escala 1:100.000 y 50.000 (regional y pilotos)

Fase 4 – Elaboración de los Mapas temáticos y difusión de resultados

Reunión de discusión para ajustes metodológicos para la construcción de mapas hidrogeológicos y vulnerabilidad

Recopilación final de datos e información sobre uso del territorio

Mapas Hidrogeológicos 1:100.000 y 50.000 (regional y pilotos)

Mapa de Usos del Territorio 1:100.000 y 50.000 (regional y pilotos)

Mapa Vulnerabilidad GOD 1:100.000 y 50.000 (regional y pilotos)

Mapa Vulnerabilidad DRASTIC 1:100.000 y 50.000 (regional y pilotos)

Mapa de Riesgo de Contaminación 1:100.000 y 50.000 (regional y pilotos)

Caracterización hidroquímica de las aguas - Informe Hidroquímica del SAG

Difusión parcial de resultados iniciales en eventos científicos

Organización del Seminario "Actualización del conocimiento sobre el SAG"

Reunión para discusión de resultados hidroquímicos

Ajuste y revisión de banco de datos de pozos

Fase 5 - Análisis e interpretación de resultados alcanzados. Formulación de estrategias

Análisis y discusión de resultados

Difusión parcial de avances de investigación

Discusión estructura y organización del informe

Elaboración del informe final

Las actividades desarrolladas fueron diseñadas para cumplir con los objetivos que se sintetizan en los siguientes productos

1 Mapas de pendientes (a partir de los datos disponibles en IDE)

1.1 Mapa de pendientes EPA del área aflorante del SAG a escala 1:100.000

1.2 Mapa de pendientes EPA del Piloto Artigas a escala 1:50.000

1.3 Mapa de pendientes EPA del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

1.4 Mapa de pendientes EPA del Piloto Rivera a escala 1:50.000

2 Mapas geológicos

2.1 Mapa geológico del área aflorante del SAG a escala 1:100.000

2.2 Mapa geológico del Piloto Artigas a escala 1:50.000

2.3 Mapa geológico del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

2.4 Mapa geológico del Piloto Rivera a escala 1:50.000

3 Mapas de suelos (a partir de la integración de los mapas de suelos del INIA)

3.1 Mapa suelos del área aflorante del SAG a escala 1:100.000

3.2 Mapa suelos del Piloto Artigas a escala 1:50.000

3.3 Mapa suelos del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

3.4 Mapa suelos del Piloto Rivera a escala 1:50.000

4 Mapas hidrogeológicos

4.1 Mapa hidrogeológico del área aflorante del SAG a escala 1:100.000

4.2 Mapa hidrogeológico del Piloto Artigas a escala 1:50.000

4.3 Mapa hidrogeológico del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

4.4 Mapa hidrogeológico del Piloto Rivera a escala 1:50.000

5 Mapa de usos de suelo

5.1 Mapa usos del área aflorante del SAG a escala 1:100.000

5.2 Mapa usos del Piloto Artigas a escala 1:50.000

5.3 Mapa usos del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

5.4 Mapa usos del Piloto Rivera a escala 1:50.000

6 Mapa de vulnerabilidad intrínseca

6.1 Mapa vulnerabilidad intrínseca GOD regional a escala 1:100.000

6.2 Mapa vulnerabilidad intrínseca GOD del Piloto Artigas a escala 1:50.000

6.3 Mapa vulnerabilidad intrínseca GOD del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

6.4 Mapa vulnerabilidad intrínseca GOD del Piloto Rivera a escala 1:50.000

6.5 Mapa vulnerabilidad intrínseca DRASTIC regional a escala 1:100.000

6.6 Mapa vulnerabilidad intrínseca DRASTIC del Piloto Artigas a escala 1:50.000

6.7 Mapa vulnerabilidad intrínseca DRASTIC del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

6.8 Mapa vulnerabilidad intrínseca DRASTIC del Piloto Rivera a escala 1:50.000

7 Mapa de riesgo de contaminación

7.1 Mapa de riesgo de contaminación regional a escala 1:100.000

7.2 Mapa de riesgo de contaminación del Piloto Artigas a escala 1:50.000

7.3 Mapa de riesgo de contaminación del Piloto Tacuarembó a escala 1:50.000

7.4 Mapa de riesgo de contaminación del Piloto Rivera a escala 1:50.000

8 Otras actividades

8.1 Base de datos de pozos

8.2 Hidroquímica

8.3 Estrategias de protección

Resultados, análisis y discusión

Los principales resultados, considerados hitos del proyecto, son los mapas de vulnerabilidad intrínseca (GOD y DRASTIC) y los mapas de riesgo de contaminación de las áreas de afloramiento del SAG. Los mapas geológicos e hidrogeológicos elaborados en el proyecto constituyen un aporte relevante al conocimiento del SAG.

El mapa regional de vulnerabilidad del SAG, elaborado por el método GOD, mostró un predominio total de la clase de vulnerabilidad muy alta de 16.23%, alta de 81.37%, moderada de 2.34% y baja de 0.06%, mientras que el mapa regional de vulnerabilidad del SAG, elaborado por el método DRASTIC, mostró un predominio de la clase de vulnerabilidad alta de 64.73%, alta de 24.02, moderada de 9.89% y baja de 1.36%. Ambos métodos confirman el bajo grado de protección natural del sistema acuífero frente a potenciales cargas contaminantes producidas por actividades antrópicas.

Los métodos utilizados arrojan resultados relativamente comparables a nivel regional, siendo el método GOD de más fácil implementación en función de la menor cantidad de parámetros involucrados en su proceso. En áreas de mayor detalle, si se cuenta con la información necesaria y/o es posible generarla (lo que significa mayores costos de estudio), el método DRASTIC puede ser utilizado con resultados más rigurosos a involucrar mayor cantidad de parámetros.

El carácter regional de estos mapas permite su uso como instrumento de orientación para concebir acciones generales de macro gestión y, en casos específicos de emprendimientos potencialmente contaminantes, pueden servir como herramienta de prevención para justificar la solicitud de estudios de mayor detalle. Por este motivo, como advertencia, los resultados que se presentan en los diferentes mapas no pueden ser considerados en forma absoluta para respaldar, restringir o prohibir actividades en el territorio, remarcando que se identificaron áreas donde deben tomarse las precauciones del caso por presentar mayor vulnerabilidad.

La vulnerabilidad intrínseca estimada en los pilotos arrojó los siguientes resultados: Piloto Artigas, la clase vulnerabilidad moderada de 57.7%, alta de 17.6%) y muy alta de 24.7% por el método GOD, mientras que la clase vulnerabilidad alta de 29.4%, muy alta de 12.8% y moderada de 57.8% por el método DRASTIC; Piloto Tacuarembó, la clase vulnerabilidad alta de 87.3%, moderada de 12.1% y baja de 0.6% por el método GOD, mientras que la clase vulnerabilidad alta de 82.0 %, muy alta de 14.8% y moderada de 3.2% por el método DRASTIC; Piloto Rivera, la clase vulnerabilidad muy alta de 47.37%, alta de 50.67%, moderada de 1.44% y baja de 0.52 por el método GOD.

mientras que la clase vulnerabilidad alta de 33.68%, muy alta de 15.98%, moderada de 23.93% y baja de 26.41 por el método DRASTIC.

Se observa que los valores de vulnerabilidad de los pilotos Rivera y Tacuarembó son relativamente comparables, mientras que se observa que la mayor diferencia entre ambas áreas se da en la clase de vulnerabilidad alta en la aplicación del método GDD. Se debe hacer la salvedad que, en el Piloto Artigas, la evaluación de la vulnerabilidad no es comparable con los otros dos pilotos, ya que se incluyó en su evaluación el área del SAG cubierta por basaltos, lo que se traduce en valores más moderados en relación al área total evaluada.

El riesgo de contaminación de las áreas de afloramiento del SAG fue evaluado a través del Índice de Susceptibilidad, mostrando que la clase de riesgo moderado representa el 33.3 % (aprox. 1620 km²), alto el 61.9% (aprox. 3015 km²), muy alto 2.9% (143 km²) y bajo 1.8% (85 km²).

El riesgo de contaminación de las áreas de afloramiento del SAG en los pilotos, estimado a través del índice de susceptibilidad, arrojó los siguientes resultados: Piloto Rivera: muy alto 4.05%, alto 22.35, moderado 53.50% y bajo 20.09%; Piloto Tacuarembó: muy alto 7.05%, alto 71.3%, moderado 21.17% y bajo 0.48%. Para el caso del Piloto Artigas, donde se incluyó la valoración en la zona confinada por los basaltos, los resultados fueron: muy alto 7.88%, alto 30.12%, moderado 58.96 y bajo 3.04%.

Particularmente, del análisis del riesgo de los pilotos Rivera y Tacuarembó se desprende que la mayoría de las fuentes de contaminación puntual se sitúan sobre áreas de índice de susceptibilidad muy alto, coincidiendo principalmente con las áreas urbanizadas donde las actividades industriales, comerciales, servicios y saneamiento están concentradas.

Vale advertir que las evaluaciones de vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del agua subterránea presentan un grado importante de incertidumbre en cualquiera de los métodos utilizados. Por un lado, está dada por el grado de subjetividad de las metodologías relacionadas a los amplios rangos de ponderación que pueden asumirse para cada uno de los parámetros a categorizar y, por otro, dada la escasez de datos debe asumirse la generalización de los parámetros utilizados como, por ejemplo, los relativos al comportamiento hidráulico en el SAG.

Los trabajos geológicos constituyeron un soporte técnico fundamental para la elaboración de estos productos y permitieron ajustar la extensión y distribución espacial de las unidades constituyentes (formaciones Tacuarembó y Rivera) así como analizar aspectos vinculados a la continuidad física y la compartimentación estructural del SAG. Las características del relieve, drenaje y elementos morfoestructurales permitieron dividir al área de afloramiento del SAG en tres dominios: Norte, Central y Sur, separados uno de otro por lineamientos estructurales de dirección NW. Algunos aspectos del comportamiento hidrogeológico e hidroquímico del SAG muestran caracteres distintivos en esos dominios.

En el área de Hidrogeología, fue elaborada una base de datos de 1298 pozos del área de afloramiento y próximas adyacentes que constituirá, en breve, una plataforma abierta, mejorable y ampliable. Hasta el momento la inmensa mayoría de estos datos estaban recopilados desordenadamente en distintas bases de organismos y empresas públicas. Fueron incorporados a la base de datos del proyecto un conjunto de pozos recabados de empresas de perforación que operan en el área de estudio, en su gran mayoría realizado en los últimos diez años, así como otros pozos directamente levantados en los trabajos de campo realizados durante el proyecto.

La piezometría del mapa regional del área de afloramiento del SAG y de los pilotos Rivera y Tacuarembó, mostró que el flujo de agua subterránea está fuertemente condicionado por las características y rasgos de relieve y drenaje más sobresalientes, reconocidos como asociados a los principales lineamientos estructurales que se superponen a las unidades rocosas. En ambas escalas de análisis, la configuración de las líneas piezométricas mostró la significativa contribución de las aguas del SAG a la red de drenaje en el área de estudio.

La distribución de los pozos que fueron seleccionados y utilizados para la elaboración de la piezometría del SAG en el área de afloramiento se incluyeron en un mapa adicional que acompaña el mapa hidrogeológico regional. La piezometría de este mapa se elaboró a partir de la selección de 720 pozos confiables que contenían, entre otros, datos de nivel estático. Estos pozos fueron plateados en el Modelo Digital de Terreno (MDT) para extraer las cotas topográficas (cota de boca de pozo) y luego realizada la correlación con la cota del nivel de agua en el pozo.

El área de afloramiento del SAG, además de área de recarga, funciona como una importante área de descarga principalmente a través de la red de drenaje con una componente regional de flujo de Oeste a Este. Esto se verificó a través de la elaboración de mapas piezométricos con varios cortes por profundidad de pozos: a) con la totalidad de los pozos seleccionados (720 pozos); b) sólo tomando en cuenta pozos someros (599 pozos para profundidad menor a 70); c) sólo considerando pozos profundos (121 pozos para profundidad mayor a 70 m).

Analizada la dinámica del SAG en cada uno de los tres dominios (Norte, Central y Sur) se pudo establecer que: a) dentro del Dominio Norte, la descarga ocurre hacia el sector deprimido de la porción central del área de afloramiento representada por el río Tacuarembó; b) en el Dominio Central, el agua subterránea fluye en dirección SE hacia el río Tacuarembó, donde la red de drenaje está fuertemente controlada por los rasgos morfoestructurales con dirección NW, destacándose los arroyos Tacuarembó Chico, Tres Cruces y Bañado de Rocha. En este dominio, el río Tacuarembó sufre una fuerte inflexión cambiando su curso de SSW y N-S (dominio Norte) para ser controlado, por casi 20 km, por la dirección SE y, nuevamente, retomar la dirección N-S; c) en el Dominio Sur, la descarga general es hacia el Este, con una variación hacia el SSE en su extremo austral donde también el control estructural es significativo. El arroyo Tacuarembó Chico, límite entre los dominios Sur y Central, funciona como una importante área de descarga de las aguas subterráneas del SAG hacia el este.

Los análisis químicos de las aguas realizados en el proyecto confirmaron los antecedentes sobre la caracterización hidroquímica del SAG en las áreas de afloramiento. Las aguas fueron clasificadas como predominantemente bicarbonatadas cálcicas – magnésicas. En los dominios Sur y Central, los diagramas de Piper mostraron una distribución relativamente homogénea, observándose una mayor concentración de Ca sobre el Mg (Ca >> Mg). En el Dominio Norte, predominan las aguas bicarbonatadas cálcicas – magnésicas con una leve tendencia hacia valores con mayores concentraciones de Mg y, subordinadamente, "facies de mezcla".

En términos de pH, las aguas del SAG presentan valores bajos en el Dominio Norte con promedios de 5.7, mientras que en los dominios Dominio Sur y Central tiende a la neutralidad con promedios de 7.1 y 7.7 respectivamente. Los valores de Conductividad Eléctrica muestran un incremento de norte a sur pasando de promedios de 71 µS/cm en el Dominio Norte a 397 µS/cm y 578 µS/cm en los Dominios Central y Sur respectivamente.

Conclusiones y recomendaciones

Las actividades realizadas en el marco de la ejecución del proyecto permitieron cumplir con los objetivos fundamentales de evaluar la vulnerabilidad intrínseca y el riesgo de contaminación de las áreas de afloramiento del SAG: 4864 km² que comprende el área regional (incluye Pilotos Rivera y Tacuarembó) y 314 km² correspondientes al Piloto Artigas (aflorante y confinado).

Desde el punto de vista de gestión planificada del territorio y gestión de recursos hídricos, los resultados alcanzados en materia de dinámica del SAG y su vulnerabilidad muestran que deben ser tomadas medidas de prevención y protección en las áreas de afloramiento.

Los estudios demostraron que el acuífero es mayormente vulnerable en el área de afloramiento y que existe una gran interacción de este con las aguas superficiales por lo que, la contaminación que se produzca en las aguas subterráneas va a llegar a los arroyos y ríos en los que descargan. Esto conduce a tener en cuenta, particularmente en áreas urbanas y suburbanas, la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas.

Como resultado de los estudios realizados tanto sobre la piezometría regional, así como la piezometría a escala de mayor detalle en los pilotos de Rivera y Tacuarembó, el modelo propuesto de flujo regional de las aguas del SAG en el área de afloramiento deberá ser considerado de futuro en la gestión y protección del recurso.

Otra implicancia directa del análisis de los resultados del proyecto, es la necesidad de un control efectivo de los volúmenes de agua extraídos del SAG. Si bien los volúmenes explotados a priori puedan resultar bajos, estos por efecto acumulativo podrían alcanzar cifras considerablemente significativas. El descenso del nivel piezométrico del SAG producido por una explotación intensiva (bombeos no controlados) en determinadas áreas podría disminuir el volumen de agua de arroyos y ríos. En este sentido, Gamazo et al. (2015) sugirieron que es necesario realizar afloros periódicos de varios cursos de agua y realizar el estudio hidrológico superficial correspondiente para estimar el nivel de intercambio de agua entre los cursos superficiales y el SAG.

Cualesquiera sean las medidas que se asuman, el SAG en áreas de afloramiento debe ser objeto permanente de monitoreos para conocer cantidades y preservar calidades para los diversos usos, principalmente para el abastecimiento público de agua a la población. En ese sentido, es relevante que DINAGUA haya iniciado la instalación de divers que miden nivel piezométrico, conductividad eléctrica y temperatura como parte de un programa de monitoreo del SAG a nivel nacional.

Las recomendaciones y sugerencias que se expresan para nuestro territorio no se apartan de las que ya han sido discutidas y contempladas en el PEA así como otras contribuciones más recientes que analizaron la vulnerabilidad de las áreas de afloramiento del SAG en territorio brasileño.

Surge a las claras la necesidad de definición y ajuste de las normas que posibiliten el control sobre el uso y ocupación del territorio en las áreas de afloramiento del SAG y, en particular, los mecanismos de control y fiscalización.

Las normativas deberán incorporar estrategias y acciones para minimizar aquellos impactos que puedan surgir de la instalación de actividades con potencial de contaminación en las regiones identificadas como más vulnerables del SAG. Ninguna duda cabe que estos aspectos deben estar incluidos en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de cada intendencia, identificando y delimitando áreas de protección o de especial interés ambiental y tomando medidas de gestión a diferentes niveles.

En tal sentido y en esa orientación, la Intendencia Departamental de Rivera en su Plan de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible de la Microrregión de Rivera (2020), con referencia específica al SAG, expresa la necesidad de tomar medidas técnicas, al menos, en tres niveles:

- A nivel general, considerar los índices de vulnerabilidad y dirección de flujo subterráneo (aguas arriba y aguas abajo) en la gestión del territorio;
- A nivel de uso, regular la construcción de pozos que hagan uso de acuífero profundo y atraviesen el acuífero somero.

• A nivel de perforaciones o campos de pozos, determinación de perímetros de protección de pozos de abastecimiento público y gestión de actividades en sus subzonas.

En la que respecta a los permisos ambientales, las autoridades que tienen competencia deberían establecer mayores requerimientos y exigencias para la presentación y elaboración de los estudios que se solicitan a efectos de otorgar los permisos que habilitan actividades que pueden provocar un daño ambiental al acuífero.

Entre las actividades que deberían considerarse con mayores exigencias en áreas de vulnerabilidad del acuífero se encuentran: la implantación de industrias, emprendimientos agropecuarios intensivos, actividades mineras y plantas de disposición de residuos urbanos.

Las áreas de mayor vulnerabilidad deben considerarse prioritarias en los planes de saneamiento. Sin embargo, se ha verificado que en áreas donde el saneamiento se ha realizado no se fiscaliza la efectiva conexión a este. Esta situación debe revertirse, así como también verificar y controlar la eliminación de antiguas cámaras sépticas domiciliarias ("pozos negros"). En aquellos lugares donde no existe saneamiento es necesario que se atienda a las recomendaciones técnicas y constructivas de fosas sépticas.

El cumplimiento de las normas para la construcción de pozos semisurgentes (decreto 86/2004) y su registro ante DINAGUA es otra de las medidas a fiscalizar.

La mayoría de las sugerencias y recomendaciones antes mencionadas suponen concretar equipos de inspección capacitados y en un número acorde a las tareas que la realidad impone en cada situación. No es posible concebir y establecer estrategias de protección del SAG sin considerar la obligatoriedad de las tareas de fiscalización permanente para hacer cumplir las normativas adoptadas.

Las acciones que se tomen para la preservación y protección del SAG deberían necesariamente involucrar a las autoridades nacionales, departamentales, usuarios y sociedad civil a efectos de lograr una sinergia entre la gestión del recurso agua y la cuestión ambiental. Si estas interacciones ocurren, la resolución de los conflictos que puedan ocurrir se resolverá de mejor forma y a menor costo e impacto.

Se entiende que el marco institucional está dado en la creación y funcionamiento de la Comisión del SAG quien debe jugar un papel relevante en la definición de líneas generales de protección del acuífero en el contexto del Plan de Gestión del SAG.

Todo el conjunto de datos e información adquirida, recopilada, procesada e interpretada del área de estudio por este proyecto constituye una plataforma técnica que permitirá orientar las acciones, medidas de protección y control de las aguas subterráneas. En particular, la cartografía temática deberá ser considerada como herramientas técnicas por los organismos que tienen competencias directas en la cuestión ambiental, la gestión de los recursos hídricos, el saneamiento, así como las autoridades nacionales y municipales que gestionan y planifican las más diversas acciones sobre ese territorio.

VI.3. Sobre la situación transfronteriza

Como es de conocimiento el SAG es un Sistema Acuífero Transfronterizo, y en este trabajo, los dos áreas que ostentan esta condición son los pilotos de Rivera y Artigas.

En el piloto Rivera, la principal preocupación por el recurso radica en que tanto la ciudad de Rivera como la ciudad de Santana do Livramento se abastecen en un 100% de agua del SAG, y ya durante la ejecución del PSAG (2003-2009) los mayores problemas percibidos tanto por la población como por las autoridades locales se enfocaban en la cobertura de saneamiento y el tratamiento de efluentes cloacales, la disposición de residuos domiciliarios y la potencial fuente de contaminación que representan las abundantes estaciones de servicio instaladas desde hace muchos años en ambas ciudades. Más allá de las acciones que cada país puede realizar sobre las condiciones de calidad y cantidad de aguas subterráneas provenientes del SAG, no existen por el momento actividades conjuntas ni intercambio de informaciones, que permitan tener un cabal conocimiento de la situación y evolución de los niveles, ni la calidad a nivel transfronterizo. Esta es una condición indispensable para la correcta gestión coordinada entre ambas localidades. Durante la ejecución del PSAG, se estableció una comisión transfronteriza (COTRAGUA) que atendía estos asuntos entre otras actividades tales como difusión y capacitación. Esta comisión dejó de funcionar al finalizar el Proyecto y su reinstalación podría ser un paso importante para reiniciar el intercambio y promover acciones tendientes a la protección coordinada del SAG.

Con respecto al piloto Artigas, la situación es algo diferente, aunque también a nivel transfronterizo al agua subterránea proveniente del SAG representa una de las fuentes principales de abastecimiento público tanto para la ciudad de Artigas como para la ciudad de Quaraí en Brasil. A pesar que, tanto en los antecedentes como en el presente trabajo, la piezometría del SAG muestra descarga hacia el río Cuareim, lo que da ya una condición de transfronterizo al sistema al ser este río el límite internacional entre Brasil y Uruguay, sería importante desarrollar estudios que permitan determinar el grado de conexión subterránea (condición de flujo y dirección) existente entre ambas porciones del SAG, para así también establecer criterios de coordinación entre los dos países para la gestión sustentable del sistema acuífero.

La entrada en vigor del Acuerdo sobre el SAG firmado y ratificado por los cuatro países, permitirá establecer las bases sobre las cuales las acciones necesarias podrán tomar impulso para la concreción de acciones en ambas situaciones transfronterizas. Este Acuerdo aún no está operativo y serán los países quienes deberán determinar bajo qué condiciones es aplicable. Lo que queda claro es que específicamente las regiones de frontera abordadas por el presente proyecto serán alcanzadas por este Acuerdo, por lo que todas las actividades que se realicen en ellas serán aportes para futuras acciones y toma de decisiones entre los países involucrados.

Referencias bibliográficas

- Albuquerque Filho J.L., Carvalho A. M. de, Ikematsu P., Costa Barbosa M., Iritani M., Nogueira Pressinotti M.M., Rocha, G., Pereira Militão da Silva R., Theodorovic A., 2012. Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo, Brasil. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 353-366.
- Aller L., Ennet T., Leher J.H., Petty, R., Hackett, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings United States Environmental Protection Agency, EPA, Oklahoma. EPA/600/2-87-035. 622 p.
- Araújo L.M. de, França A.B., Potter P.E., 1995. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Mapas. UFPR-Petrobras, Curitiba, Texto Explicativo, 16 p.
- Auge M., 2004. Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, n.4: 85-103
- Baolousha H.M., Barth N., Ramasomanana F.H., Ahzi S., 2018. Groundwater recharge estimation and its spatial distribution in arid regions using GIS: a case study from Qatar karst aquifer. *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 4: 1319-1329.
- Barbulescu, A. 2020. Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. *Water*, 12, 1356; doi:10.3390/w12051356.
- Barreiro M, Arizmendi F., Trinchin R., 2019. Proyecto "Fortalecer las capacidades de Uruguay para la adaptación al cambio climático en la zona costera" Variabilidad observada del clima en Uruguay. Producto 2. Departamento de Ciencias de la Atmósfera Instituto de Física, Facultad de Ciencias, noviembre 2019. Fuente: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Producto%202.pdf>
- Barreiro M., Arizmendi F., Trinchin R., 2021. Análisis del clima y escenarios de cambio y variabilidad climática en Uruguay. URU/18/002 Proyecto: Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay.
- Benvenuto A., 2016. Geología de la región centro-sur del Departamento Tacuarembó Cuenca, Norte. Trabajo final de grado, Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias
- Bidegain, M.; Crisci, C.; del Puerto, L. In: In: Inda, H. Mazzeo, N. Taks, J. Terra, R. 2012. Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Vol I. Variabilidad climática de importancia para el sector productivo. https://www.researchgate.net/publication/299658889_Clima_de_cambios_nuevos_desafios_de_adaptacion_en_Uruguay_Vol_I_Variabilidad_climatica_de_importancia_para_el_sector_productivo/link/5703f7b208ae44d70ee05c0c/download [accessed Mar 21, 2022]
- Bossi, J. 1966. Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo, 469 p.
- Bossi, J., Ferrando, L. 2001. Carta geológica del Uruguay, escala 1:500.000. Edición Geoditores SRL, Montevideo (CD-ROM).
- Bossi, J., Ferrando, L.A., Fernández, A., Elizalde, G., Morales, H., Ledesma, J., Carballo, E., Medina, E., Ford, I., y Montaña, J. 1975. Carta geológica del Uruguay, escala 1/1.000.000, Montevideo.
- Buquet L., 1943. Orientaciones generales para la investigación de aguas subterráneas en la República. Memoria Nº1 Instituto Geológico del Uruguay, Sección Hidrología y Servicio de Perforaciones, Imprenta Nacional, Montevideo, 34p.
- Carrión R. 1991. Hidrogeología en torno a la ciudad de Tacuarembó. Tesis de grado Geología, Facultad de Ciencias.
- Civita, M.V. (2020). The combined approach when assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination. *Journal Water Resources and Protection*, (2), 14-28.
- Collazo P., 2006. Investigación hidrogeológica de acuífero guaraní en el área aflorante de los departamentos de Rivera y Tacuarembó. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Collazo P., Auge M., Montaña J. 2007. Vulnerabilidad y Riesgo hidrogeológico del SAG en el área aflorante de Rivera – Uruguay. Acuífero Guarani: avances en el conocimiento para su gestión sustentable. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología (ALHSUD)*, 157-173.
- CPRM – DINAGUA, 2015. Carta Hidrogeológica de la Cuenca de Cuareim, escala 1: 250.000. Equipo: Brasil: Diniz J.A., Machado J., Kirchheim R., da Silva R., de Paula T.L., Uruguay: Manganelli A., Techera J., Lacués X. https://www.gub.uy_mapa_hidrogeologico_de_la_Cuenca_del_Cuareim.pdf
- Dellepère A., 1994. Datación por carbono-14 de las aguas termales del acuífero Tacuarembó (Botucatu), Uruguay. Comisión Nacional de Energía Atómica, Montevideo, Uruguay En: Estudios de hidrología isotópica en América Latina. IAEA-TECDOC-835
- De Santa Ana H., Veroslavsky G., 2004. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico Temprano, pp. 51-74 de Veroslavsky G, Ubilla M & Martínez S (eds.): Cuenas Sedimentarias de Uruguay: Geología, Paleontología y recursos naturales – Mesozoico. DIRAC, Montevideo.
- De Santa Ana H., Veroslavsky G., Fúlvaro V.J., Rossello, E.A., 2006. Evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero – Pérmico de la Cuenca Norte. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), Cuenas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico. DIRAC - Facultad de Ciencias: 209-256, Montevideo
- De Santa Ana H., Fúlvaro V.J., Fernandez Garrasino, L., Veroslavsky, G., 2008. Síntesis sobre la Geología regional del Sistema Acuífero Guarani – Informe Técnico PSAG. Montevideo: Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani, 115 p.
- De Vera A., Alfaro P., Terra R., 2021. Operational Implementation of Satellite-Rain Gauge Data Merging for Hydrological Modeling Data Merging for Hydrological Modeling. *Water* 13(4), 533; <https://doi.org/10.3390/w13040533>.
- DINAMIGE, 2009. Estimación de la extracción de agua subterránea: principales acuíferos de Uruguay. Informe de Hidrogeología – DINAMIGE. (Fuente: <http://www.miem.gub.uy>).
- Diniz J., Monteiro, A., de Carlo da Silva R., Feijó de Paula T.L., 2014. Manual de cartografía hidrogeológica Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 119 p.
- Do Amarante F.B., Scherer C.M.S, Goso C.A., dos Reis A.D., Mesa C., Soto M., 2019. Fluvial-eolian deposits of the Tacuarembó formation (Norte Basin – Uruguay): depositional models and stratigraphic succession. *Journal of South American Earth Sciences* 90: 355-376.
- ENGENCORPS, 2014. Estudo de Vulnerabilidade Natural à Contaminação e Estratégias de Proteção do Sistema Aquífero Guarani nas Áreas de Afloramento. Relatório Final, Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA/SIP, Engecorps Engenharia S.A., Tomo I, 337 p.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1991. A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination. Preliminary document. Washington: 1: 1-21.
- Evia G., Gudynas E., 2000. Ecología del paisaje en Uruguay, DINAMA, Montevideo, 423p.
- Falconer J.D., 1931. Memoria explicativa del mapa geológico de la región sedimentaria del Departamento de Cerro Largo (Formación Gondwana). *Boletín del Instituto de Geología y Perforaciones*, Nº 12: 1-22.
- Falconer J.D., 1937. La Formación Gondwana en el Nordeste del Uruguay con especial referencia a los terrenos eogondwánicos. *Instituto de Geología y Perforaciones*, Nº 23: 1-113.
- Ferrando L., Andreis R.R., Montaña J.R., 1987. Estratigrafía del Triásico – Jurásico uruguayo en la Cuenca de Paraná. *Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, v1: 373-378, Curitiba.
- Foster S., 1987. Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. *Proc. Intl. Conf. "Vulnerability of soil and groundwater to pollution"* (Nordwijk, The Netherlands).
- Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., Paris M., 2006. Proteção da qualidade da água subterránea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington, 104 p.

- Gagliardi S., 2008. Caracterización geológica e hidrogeológica de la ciudad de Artigas y sus alrededores. Trabajo final Licenciatura en Geología. Facultad de Ciencias, Montevideo.
- Gamazo P., Ramos J., Oliveira M.A., 2015. Evaluación y actualización de los modelos del SAG de zonas Piloto de Uruguay: Área Piloto Rivera – Santana do Livramento. Fundación Ricaldoni, DINAGUA, MVOTMA, Departamento del Agua – UDELAR, Salto.
- Gastmans D., Veroslavsky G., Chang H.K., Caetano-Chang M. R., Nogueira Pressinotti M. M., 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 249-265.
- Gómez, A.A. 2007. Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las formaciones Tacuarembó - Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. Tesis de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 149p
- Heinzen W., Carrión R., Massa E., Pena S., Stapff M., 1987. Mapa Hidrogeológico del Uruguay y Memoria Explicativa, escala 1: 2.000.000. Dirección Nacional de Minería y Geología (Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay). <http://www.dinamige.gub.uy/ch25.htm>.
- Heinzen W., Carrión R., Massa E., Pena S., Stapff M., 2003. Mapa Hidrogeológico del Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología (Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay). <http://www.dinamige.gub.uy/ch25.htm>.
- Huffman G.J., Bolvin D.T., Braithwaite D., Hsu K., Joyce R., Kidd C., Nelkin E.J., Sorooshian S., Tan J., Xie P., 2019: NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Doc., v 6, 34 pp.: https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V06.pdf.
- IPT, 1980a. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. "Reconhecimento hidrogeológico do aquífero Tacuarembó, entre Paysandu e Bella Union, República Oriental del Uruguay", Relatório No. 14.364.
- IPT, 1980b. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. S/a-IPT. "Sondagens eléctricas verticais de grande alcance na região noroeste da República Oriental del Uruguay", Relatório No. 14085.
- LEBAC, 2008. Informe Final de Hidrogeología do Projeto Aquífero Guaraní. Coord.: Gastmans D., Chang H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guaraní. Rio Claro, 172 p. OEA, 2009. Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações/ Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Acción - Edición español / portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.
- Lunardi, S., de Borba, W. F., Favaretto, J., Martins, M., & Facenda, H. B. (2021). Contamination susceptibility of Serra Geral Aquifer at municipal scale in Brazil. *Social Sciences & Humanities Open*, 4(1), 100144.
- Manzano, M., Guimarães M., 2008. Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní. Informe realizado para el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní a través del consorcio de empresas Tahal Consulting Engineers, SEINCO S.R.L. Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A. e Hidroambiente S.A. 223 p.
- Martínez Paulo S., 1998. Caracterización del Acuífero Guaraní en el Norte del Uruguay, (Dpto. de Artigas). Trabajo final de hidrogeología. Facultad de Ciencias. Universidad de la República.
- Montaña, J. 1990. Hoja H-12 Cuchilla del Ombú, escala 1:100.000. Facultad de Agronomía, 1 mapa y memoria explicativa, Facultad de Agronomía, Montevideo.
- Montaña, J. 2004. Recursos hídricos subterráneos. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), Cuenca Sedimentaria de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico. DIRAC - Facultad de Ciencias, Montevideo, 191-212.
- Montaña M., 2005 Estudio Hidrogeológico del sistema acuífero guaraní en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó. Trabajo Final de grado Licenciatura en Geología, UDELAR.
- Montaña J., Carrión R., 1990. Optimización de la explotación del Sistema Acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó – Buena Vista. Revista ABAS SUPLEMENTO - Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas 1990.
- Montaña J., Collazo P., 1998. Hidrogeoquímica del Sistema Acuífero Guaraní (Uruguay). II Congreso Uruguayo de Geología, Punta del Este, Actas 395- 400.
- Montaña J., Ernani M., 2005. Características hidrogeológicas del Acuífero Transfronterizo Guaraní. Revista Latino-Americana de Hidrogeología Vol. 5: 23-29.
- Montaña J., Pessi M., 1988. Características Hidráulicas e Hidrogeoquímicas del Acuífero Tacuarembó – Área Rivera. Revista Revista Aguas Subterráneas ABAS.12 (1): 34-45.
- Montaña J., Tujchneider O., Auge M., Fili M., Paris M., D'Elia M., Pérez M., Nagy M.I., Collazo P., Decoud P., 1998. Acuíferos regionales en América Latina. SAG. Capítulo argentino – uruguayo. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, 217p.
- Nobre R.C.M., Rotundo Filho O.C., Mansur W.J., Nobre M.M.M., Cosenza C.A., 2007. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool, *Journal of Contaminant Hydrology*, 94 (3-4): 277–292.
- Nolla G., 2010. Usos agrícolas intensivos de suelos y su relación a la calidad de las aguas que infiltran al Sistema Acuífero Guaraní en la zona periurbana de la ciudad de Rivera, Uruguay. Tesis de Maestría. Universidad de León, 143 p.
- Oleaga A.B., 2002. Contribución a la hidrogeología del acuífero guaraní en el sector de Uruguay: un enfoque integral. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, Ciudad de México, 119 p.
- Panario D., 1988. Geomorfología del Uruguay. Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo. Departamento Publicaciones - Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, 32 p.
- Panario D., Gutiérrez O., 2011. Clasificación y mapeo de ambientes de Uruguay. Informe Técnico. 1. Marco teórico para la clasificación jerárquica de ambientes de Uruguay. 2. Mapa de ambientes: cartografía implementada en un SIG. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca/GEF - Banco Mundial.
- PEA, 2009. Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações / Aquífero Guaraní: Plan Estratégico de Acción - Edición español / portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.
- Perea D., Soto M., Veroslavsky G., Martínez M., Ubilla M., 2009. A Late Jurassic fossil assemblage in Gondwana: Biostratigraphy and correlations of the Tacuarembó Formation, Parana Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences*, 28: 168-179.
- Pérez A., Rocha L., 2002. Aportes al conocimiento del Acuífero Guaraní. Área ciudad de Rivera - Uruguay. Groundwater and Human Development. Bocanegra E., Martínez O., Massone H. (Eds) ISBN 987-544-063-9. Mar del Plata, Argentina.
- Preciozzi F., Spoturno J., Heinzen W. y Rossi P., 1985. Carta geológica del Uruguay, 1:500.000. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo, 90p.
- Pochintesta L., 2018. Importancia del conocimiento del medio físico en el ordenamiento territorial: estudio de caso Ciudad de Tacuarembó y alrededores, Tesis de grado Geología, Facultad de Ciencias, 164 p. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/21415?mode=full>
- P y T Consultora SRL., 2007. Informe Final de Relevamientos Geológicos, Relatorio Técnico, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, Buenos Aires, 93 p.
- Reis A.D.d., Scherer C.M.d.S., Amarante F.B.d., Rossetti M.d., Kifumbi C., de Souza E.G., Ferronato J.P.F., Owen A., 2019. Sedimentology of the proximal portion of a large-scale, Upper Jurassic fluvial-aeolian system in Paraná Basin, southwestern Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 95, doi:10.1016/j.jsames.2019.102248
- Ribeiro L. 2000. IS: um novo índice de susceptibilidade de aquíferos á contaminação agrícola [SI: a new index of aquifer susceptibility to agricultural pollution]. Internal report, ER-SHA/CVRM, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 12 p.
- Ribeiro, L. 2005. Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos à contaminação: Formulação e Aplicações- Actas do 7º SILUSBA, APRH, Évora, 15p
- Rodríguez P., Veroslavsky G., Soto M., Marmisolle J., Gristo P., de Santa Ana H., Benvenuto A., 2015. New integrated Bouguer gravity anomaly map onshore Uruguay: preliminary implications for the recognition of crustal domains. SEG 2015. <https://doi.org/10.1190/segam2015-5821993.1>.

- Sapriza G., Gastmans D., De los Santos J., Flaquer A., Chang H.K., Guimaraes, M., de Paula e Silva F., 2011. Modelo numérico de fluxo do Sistema Aquífero Guarani (SAG) em área de afloramentos – Artigas (Uy)/Quarai (Br). *Revista Águas Subterrâneas* 25 (1): 29-42.
- Santarosa L., Gastmans D., Sitolini T., Kirchheim R., Bentacuer S., de Oliveira M.E., Campos J.C., Manzione R., 2021. Assessment of groundwater recharge along the Guarani aquifer system outcrop zone in São Paulo State (Brazil): an important tool towards integrated management. *Environmental Earth Sciences*, 80 (95).
- Scherer, C.M.S., Lavina, E.L., 2006. Stratigraphic evolution of a fluvial–eolian succession: the example of the upper Jurassic - lower cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, southernmost Brazil. *Gondwana Research*, 9 (4): 475–484.
- Scherer C.M.S, Lavina E.L., dos Reis A., Horn B.L. 2021. Estratigrafia da sucessão sedimentar mesozoica da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. En: *Contribuições a? Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. A. Ritter Jelinek y C. A. Sommer (Org.), Sociedade Brasileira de Geologia, Compasso Lugar?Cultura, Porto Alegre: 289 – 304.
- Silverio L., Bessouat C., Camponogara I., Frantz L.C., Guimaraes M., Flores M. 2006. Caracterización de área de recarga y descarga del SAG en Rivera -Livramento y Quarai – Artigas. OEA-PSAG. Fondo de Universidades. Informe Final. Proyecto 10. Universidad Federal de Santa Maria, In: Roberto Montes, *Aquífero Guarani: avanços no conhecimento para sua gestão sustentável*. Montevideo: Secretaria General del Proyecto Aquífero Guarani/OEA, v. 1, p. 1-20
- Sindico F., Hirata R., Manganelli A., 2018. The Guarani Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>.
- SNC – Lavalin, 2008. Hidrogeologia local del área piloto Rivera – Santana do Livramento. En: *Avances en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*, tomo 3, 129pp.
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L., Carvalho Dill, A.M.M., 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal* 14 (1–2), 79–99.
- Szilagyi J., Zlotnik V.A., Gates J.B. Jozsa J., 2012. Mapping mean annual groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills, USA. *Hydrogeology J.* 19, 1503–1513. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0769-3>.
- TAHAL,1986. Proyecto agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos. Tahal Consulting Engineers, VERNO - ROU, 8 tomos.
- Techera J., Massa E., Izquierdo D., Pérez S., 2017. Mapa del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo. (disponible: <http://www.dinamige.gub.uy>).
- Veraslavsky G., Manganelli A. 2018. Zoning of the Guaraní Aquifer System in Uruguay: a suggested guide for its environmental management and protection. *Aqua-LAC*, 10 (2): 61-80.

Licenciamiento

Reconocimiento 4.0 Internacional. (CC BY)

