

APLICACIÓN DE LA HIDROLOGÍA ISOTÓPICA EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS TRANSFRONTERIZAS



aplicaciones
en salud



aplicaciones
en la industria



aplicaciones
nucleares



ciclo del
combustible



centro de
investigaciones

**Conclusión proyecto piloto en la Cuenca
Transfronteriza Tierra de los López:**
*Proyecto de cooperación técnica BOL-7005 del
Estado Plurinacional de Bolivia*

Esta publicación fue elaborada por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear –ABEN. Y se enmarca en la Constitución Política del Estado, en los 13 pilares de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 y en el Programa Nuclear Boliviano.

Presentación

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) durante las gestiones 2021 y 2022 realizó una importante inversión financiera con el propósito de sacar adelante el Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005 'Desarrollo de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en la Provincia Sud Lípez, empleando la Hidrología Isotópica', parcialmente financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Los indicadores del Proyecto BOL 7005 que inicialmente estaban enfocados al desarrollo de un Plan de Manejo de los Recursos Hídricos en zonas áridas, fueron modificados por el equipo técnico-científico de la ABEN y aprobados por las instancias técnicas del OIEA, toda vez que un Plan de Manejo involucra el establecimiento de políticas, instrumentos de gestión y una estructura institucional por las Instancias competentes del Estado Plurinacional de Bolivia, siendo el plazo del proyecto muy corto para lograr este propósito.

En este sentido, la ABEN en el marco de su Proyecto Científico 'Prospección y Mapeo de la Disponibilidad y Sostenibilidad de los Recursos Hídricos en zonas Transfronterizas Piloto, de las tres regiones Hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia, mediante la aplicación de la Hidrología isotópica, 2022-2025' planteó un enfoque transfronterizo para el Proyecto BOL 7005 basado en la generación de información científica mediante la aplicación de la hidrología isotópica, con el propósito de contribuir a la toma de decisiones informadas para el establecimiento de acuerdos operativos en materia de gestión de aguas transfronterizas, en el Estado Plurinacional de Bolivia. Por lo que, el diseño metodológico para la investigación científica se centró en la Cuenca Tierra de los Lípez, importante reservorio de agua dulce transfronteriza compartida entre el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile y Argentina.

Así, la ABEN en su labor de generar una base de datos/información científica enmarcada en la ciencia y aplicaciones pacíficas de la tecnología nuclear desarrolló un modelo del funcionamiento hidrogeológico de la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada), en el Estado Plurinacional de Bolivia, basado en evidencia científica de isótopos estables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) y de isótopos inestables de: Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C) y Radón-222 (^{222}Rn) generada al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021, y combinada con información hidrogeológica, hidrológica, litológica, geofísica y topográfica.

En este contexto, demostrando el compromiso Institucional, a través del desarrollo de la investigación científica aplicada, el presente documento tiene por objetivo principal presentar los resultados de la implementación del Proyecto BOL 7005.

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
DIRECTORA GENERAL EJECUTIVA
AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

© AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

DIRECCIÓN GENERAL EJECUTIVA

Ing. Hortensia Jiménez Rivera

Directora General Ejecutiva de la ABEN

**CONCEPTUALIZACIÓN, METODOLOGÍA,
INVESTIGACIÓN, ANÁLISIS FORMAL,
REDACCIÓN Y VISUALIZACIÓN CIENTÍFICA**

PhD. Ing. Gabriela Patricia Flores Avilés

PERSONAL AUXILIAR

Estudiantes de Pasantía

Univ. Enoe Eloisa Gonzáles Córdova

Univ. Lizet Lorena Quispe Quisbert

DEPOSITO LEGAL: 4-1-637-2022 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA

ÍNDICE

Capítulo 1: La Hidrología Isotópica y su aplicación en la Gestión de Aguas Transfronterizas...	15
Capítulo 2: Modelo del funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo de la Cuenca Tierra de los López mediante la aplicación de la Hidrología Isotópica.....	16
2.1 Introducción.....	20
2.2 Descripción de la zona de Estudio.....	22
2.2.1. Localización y clima.....	22
2.2.2. Geología e Hidrogeología.....	26
2.3 Metodología.....	29
2.3.1. Estrategia de investigación.....	29
2.3.2. Análisis Isotópicos.....	33
2.3.3. Evaluación de los datos isotópicos.....	34
2.3.3.1. Línea local de aguas meteóricas.....	34
2.3.3.2. Componentes del balance hídrico subterráneo y procesos hidrológicos.....	35
2.3.3.2.1. Estimación de la recarga.....	35
2.3.3.2.2. Mezcla durante la recarga y flujo de aguas subterráneas.....	36
2.3.3.2.3. Evaporación de aguas subterráneas someras.....	37
2.3.3.2.4. Descarga hacia la Laguna Colorada efluente.....	37
2.3.3.3. Rapidez de recarga en el subdominio poroso.....	38
2.3.3.3.1. Datación de las aguas subterráneas.....	38
2.4 Resultados y discusión.....	40
2.4.1. Composiciones Isotópicas de $\delta^{18}O$ y δ^2H en las aguas subterráneas del sistema acuífero.....	40
2.4.2. Concentraciones de ^{222}Rn en las aguas subterráneas del sistema acuífero.....	59
2.4.3. Concentraciones de 3H en las aguas subterráneas del sistema acuífero.....	65

2.4.4. Composiciones isotópicas de $\delta^{13}C$ y actividades de ^{14}C en las aguas subterráneas del sistema acuífero	69
2.4.5. Modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lipez	74
2.5 Conclusiones del Capítulo 2.....	80
2.6 Perspectivas del Capítulo 2	81
2.7 Referencias del Capítulo 2.....	83
Capítulo 3: Impacto del Proyecto en el Estado Plurinacional de Bolivia.....	87
3.1 Capacitación de Recursos Humanos de la ABEN.....	87
3.1.1. Curso de Capacitación sobre la medición de Radón-222 en agua.....	87
3.2 Fortalecimiento de la capacidad analítica del Laboratorio de Hidrología Isotópica de la ABEN.....	90
3.2.1 Equipo de Laboratorio RAD 7 – DURRIDGE y materiales de laboratorio.....	90
3.2.2 Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i	92
3.2.3 Materiales de laboratorio (fungibles) Kit de Muestreo para Carbono-14	92
3.2.4 Materiales de referencia para la calibración del Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i.....	93
3.3 Desarrollo de la Investigación Científica en el Estado Plurinacional de Bolivia mediante la aplicación de la hidrología isotópica.....	93
3.3.1 Misión Científica de Campo 2021 en la Unidad Hidrológica Laguna Colorada - Cuenca Tierra de los Lipez -, del 14 al 21 de agosto de 2021	93
3.3.2 Misión Científica de Campo en la zona transfronteriza piloto de la región hidrográfica del Amazonas (sector Municipio de Cobija)	98
Capítulo 4: Conclusiones del Proyecto.....	103
Agradecimientos.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1	Precipitación, evapotranspiración de referencia y temperatura media mensual de la Estación Colcha K, ubicada a 172 km del sitio de estudio, para el periodo de registro 2000-2021 (ABEN, 2022)...24
Figura 2.2	Línea de base de datos científicos temporales y geoespaciales SIG, mostrando sitios de investigación con información hidrológica, litológica, geofísica, hidrogeológica y topográfica (ABEN, 2022).....31
Figura 2.3	a) Esquema conceptual hidrogeológico del sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los López (ver ubicación del perfil en el Mapa N°1), b) estrategia de investigación para el desarrollo del modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero mediante la aplicación de la hidrología isotópica (ABEN, 2022).....32
Figura 2.4	Línea Local de Agua Meteoricas (LMWL) y marca isotópica ponderada de la precipitación (MIP) para la estación de San Juan (elaboración propia en base a datos disponibles en I.A.E.A/W.M.O (2021) (ABEN, 2022).....41
Figura 2.5	Diagramas de caja de las composiciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales), y correspondiente a fuentes de agua superficial (ríos): a) al final de la época lluviosa de 2019, y b) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).....46
Figura 2.6	Diagramas de las composiciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de fuentes de agua subterránea en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas): a) al final de la época lluviosa de 2019, y b) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).....48
Figura 2.7	Diagramas de altitud vs. las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ (a y b) y $\delta^2\text{H}$ (c y d) de fuentes de agua subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), del subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas): al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).....53
Figura 2.8	Diagramas de exceso de Deuterio vs. las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ (a, b) y $\delta^2\text{H}$ (c, d) en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos, ríos, lagunas), y en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).....56
Figura 2.9	Variación espacial de las fracciones relativas de mezcla durante la recarga y flujo de aguas subterráneas en el sistema acuífero (ABEN, 2022).....58
Figura 2.10	Diagramas de caja de las concentraciones de actividad de Radón-222 en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), y en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales), durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).....60

Figura 2.11	Diagramas de: a) conductividad eléctrica (CE) vs. Radón-222; b) altitud vs. Radón-222; c) exceso de deuterio (D_{exceso}) vs. Radón-222; d) Temperatura (T) vs. Radón-222, de fuentes de agua subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), del subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).....	63
Figura 2.12	Diagramas de caja de: a) las concentraciones de: Tritio (^3H) y b) actividades de Carbono Moderno ($\text{Raw } ^{14}\text{C}$) en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), y en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales), al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).	66
Figura 2.13	Diagramas de las concentraciones de: (a,c) Tritio (^3H) vs. $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ y (b,d) actividades de Carbono Moderno ($\text{Raw } ^{14}\text{C}$) vs. $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, de fuentes de aguas subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos) y del subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas), al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).	68
Figura 2.14	Diagrama de las composiciones isotópicas de Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) vs. las actividades de Carbono Moderno ($\text{Raw } ^{14}\text{C}$), de fuentes de agua subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), y del subdominio de rocas fracturadas (manantiales), y de fuentes de agua superficial (ríos) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).	69
Figura 2.15	Modelo Conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Tierra de los López (Perfil E-O Mapa N°23) (ABEN, 2022).....	79

Capítulo 3

Figura 3.1	Localización del área de estudio, unidad hidrológica Laguna Colorada, mostrando los 25 puntos cartográficos (ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos) validados en terreno por la ABEN mediante el mapeo integrado de aguas superficiales y subterráneas. En cada punto cartográfico se realizaron mediciones in-situ de: i) pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad, radioisótopos de radón 222, ii) mediciones hidrológicas e hidrogeológicas, y iii) la recolección de muestras para análisis de iones mayoritarios y metales, isótopos estables de deuterio y oxígeno-18, y radioisótopos de radiocarbono.....	96
Figura 3.2	Misión Científica de la ABEN Noticia publicada en el Periódico del Esta Plurinacional de Bolivia, disponible en https://www.ahoraelpueblo.bo/aben-trabaja-en-la-evaluacion-de-los-recursos-hidricos/ (29/08/2021).	97
Figura 3.3	Mapa mostrando los sitios de investigación ubicados en la zona transfronteriza piloto de la Región Hidrográfica del Amazonas, localizada dentro del Municipio de Cobija. Los símbolos verdes y azules indican los sitios de investigación (fuentes de aguas superficiales o subterráneas) inspeccionados por la ABEN del 25 al 27 de mayo de 2022. En base a un análisis técnico-científico se definieron sitios de investigación estratégicos (símbolos verdes) en los cuales se realizaron las tareas de: i)	

validación y mapeo integrado, ii) mediciones in-situ, iii) recolección de muestras, y iv) mediciones de Radón-222. Los colores hipsométricos representan la elevación en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m) del terreno (DEM: SRTM 1-Arc-Second Global N.A.S.A, 2000).....101

Figura 3.4 La ABEN cuenta con tecnología nuclear de punta. Noticia publicada en el Periódico del Esta Plurinacional de Bolivia, disponible en <https://www.ahoraelpueblo.bo/bolivia-usara-tecnologia-nuclear-para-investigar-reservas-de-agua/> (25/07/2022).....102

ÍNDICE DE MAPAS

Capítulo 2

Mapa N°1. Contexto geográfico de la unidad hidrológica de estudio (ABEN, 2022).....	25
Mapa N°2. Mapa hidrogeológico de la unidad hidrológica 'Laguna Colorada' (ABEN, 2022).....	28
Mapa N°3. Variación espacial de las composiciones isotópicas de Oxígeno-18, al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021 (ABEN, 2022).....	49
Mapa N°4. Variación espacial de las composiciones isotópicas de Deuterio, al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021 (ABEN, 2022)	50
Mapa N°5. Variación espacial de la conductividad eléctrica y de las concentraciones de Radón-222, durante la época de estiaje de 2021.....	64
Mapa N°6. Variación espacial de Tritio y Carbono Moderno, durante la época de estiaje de 2021.....	67
Mapa N°7. Variación espacial de las composiciones isotópica de Carbono-13 y de Carbono Moderno, durante la época de estiaje de 2021 (ABEN, 2022).....	73
Mapa N°8. Mapa mostrando la ubicación del perfil E-O y los límites del sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los López inferidos en base a la evidencia científica generada por la ABEN.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1 Datos científicos de isótopos estables/ inestables e información hidroquímica generada en el marco del Proyecto BOL 7005 durante la misión científica de campo 2019. Se incluye información científica adicional de Chaffaut (1998), Houston (2007), Figueroa (2018), y Valdivieso et al. (2022) (ABEN, 2022).....	43
Tabla 2.2 Datos científicos de isótopos estables/ inestables e información hidroquímica generada por la ABEN, en el marco del Proyecto BOL 7005, durante la misión científica de campo 2021. Se incluye información científica adicional de Chaffaut (1998), Houston (2007), Figueroa (2018), y Valdivieso et al. (2022) (ABEN, 2022).	44
Tabla 2.3 Resultados de la cuantificación de fracciones relativas para los modelos de balance isotópico de tres fuentes en base a las hipótesis planteadas en la sección 2.3.3.2.2 (ABEN, 2022).....	59
Tabla 2.4 Resultados del cálculo de la edad aparente de las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado, incluyendo la probable época de recarga (ABEN, 2022).	61
Tabla 2.5 Estimación de la velocidad de flujo en el subdominio poroso mediante la Ley de Darcy, Perfil E-O Mapa N°8, Fig. 2.15 (ABEN, 2022).....	71

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Capítulo 3

Fotografía 3.1 a y b) Ensamblaje del Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE', c y d) Capacitación de la Técnico Químico-Analista de la ABEN, en el uso, ensamblaje, instalación, y manejo del Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE'.....	89
Fotografía 3.2 a) Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE', b) multiparámetro portátil digital, c) medidor de niveles piezométricos de pozos (rango 0–100 m), d) kit de prueba de alcalinidad, e) bomba sumergible para el monitoreo de pozos de 40 mm.....	91
Fotografía 3.3 Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i.....	92
Fotografía 3.4 Kit de Muestreo para Carbono-14.....	92
Fotografía 3.5 a) y b) Materiales de referencia para la calibración del Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i.....	93
Fotografía 3.6 Memoria Fotográfica de cada punto cartográfico validado en terreno por la ABEN mediante el mapeo integrado de aguas superficiales y subterráneas en la unidad hidrológica Laguna Colorada.....	94
Fotografía 3.7 Memoria Fotográfica de cada sitio de investigación estratégico (punto cartográfico) validado en terreno por la ABEN, donde se realizaron las tareas de: i) validación y mapeo integrado, ii) mediciones in-situ, iii) recolección de muestras, y iv) mediciones de Radón-222.....	99

CAPÍTULO 1: LA HIDROLOGÍA ISOTÓPICA Y SU APLICACIÓN EN LA GESTIÓN DE AGUAS TRANSFRONTERIZAS

A nivel mundial, el 58% de la superficie de las cuencas transfronterizas cuenta con acuerdos operativos para la cooperación en materia de gestión aguas transfronterizas, sin embargo, en América Latina y el Caribe estos índices de cobertura son bajos (~24 %) U.N.E.C.E & U.N.E.S.C.O (2021).

En 2020, la U.N.E.C.E y la U.N.E.S.C.O evidenciaron que uno de los principales factores que limita la cobertura de acuerdos operativos en las cuencas transfronterizas de América Latina y El Caribe es la ausencia de datos e información científica, siendo un reto importante y clave la generación de conocimientos científicos para la gestión sostenible de los recursos hídricos transfronterizos, de manera particular, de los acuíferos transfronterizos.

La hidrología isotópica es una herramienta nuclear que utiliza isótopos estables e inestables para la generación de información científica, permitiendo a los científicos cuantificar y determinar: los componentes del ciclo del agua, el origen y el movimiento del agua, los mecanismos de recarga y de descarga, las interconexiones hidráulicas, las propiedades hidráulicas de acuíferos, el impacto de las actividades antropogénicas, entre otros, lo que ayuda a evaluar la disponibilidad, sostenibilidad y vulnerabilidad a la contaminación de las cuencas transfronterizas.

Por ejemplo, el oxígeno es uno de los principales gases que constituyen la atmósfera (21% del total). Y un componente de las moléculas de agua de la lluvia, los ríos, acuíferos y lagos. Los átomos de oxígeno están formados por protones, neutrones y electrones. Si un conjunto de átomos de oxígeno tiene un número diferente de neutrones, se denominan isótopos de oxígeno.

La mayoría de los átomos de oxígeno de la tierra están compuestos por 8 protones y 8 neutrones en su núcleo ($^{16}\text{O}_8$: 99,757 %) 'isótopos de oxígeno ligero'. Un pequeño porcentaje de oxígeno presenta 8

protones y 10 neutrones en su núcleo ($^{18}\text{O}_{10}$: 0,205 %) 'isótopos de oxígeno pesado', y otro porcentaje, 8 protones y 9 neutrones ($^{17}\text{O}_9$: 0,038 %) (Hoefs, 2009). El núcleo de cada uno de estos isótopos difiere en el número másico, pero no se desintegra con el tiempo por eso se denominan isótopos estables de oxígeno.

Los científicos utilizan equipos analíticos de alta precisión para medir las diferencias entre los 'isótopos de oxígeno pesado' y los 'isótopos de oxígeno ligero' $\frac{^{18}\text{O}_{10}}{^{16}\text{O}_8}$ en muestras de agua de lluvias, ríos, acuíferos y lagos.

Al medir las relaciones de $\frac{^{18}\text{O}_{10}}{^{16}\text{O}_8}$ y evaluarlas mediante modelos matemáticos, los científicos pueden determinar con precisión la cantidad de agua que fluye a los ríos o lagos, la cantidad que infiltra llenando los acuíferos, y la cantidad evapora.

Por otro lado, gran parte de los isótopos radiactivos o inestables se producen naturalmente debido a la interacción de los rayos cósmicos con diferentes moléculas gaseosas y forman parte del ciclo hidrológico.

Los isótopos radiactivos presentan un núcleo inestable, es decir, un desequilibrio entre sus componentes (protones y neutrones) y exceso de energía. Cada isótopo radiactivo se desintegra y emite radiación (alfa, beta o gamma), a una tasa característica conocida como periodo de semidesintegración que es el intervalo de tiempo necesario para que el número de núcleos de una muestra radiactiva se reduzca a la mitad.

Para ilustrar, el Radón-222 (^{222}Rn) es un gas noble radiactivo, inodoro e incoloro que se encuentra de forma natural en el aire, el agua, las rocas y el suelo (Cook & Herczeg, 1999). El Radón se genera en los granos de suelo debido a la desintegración del Radio-226. Y puede generarse directamente en una masa de agua debido al Radio disuelto. El ^{222}Rn tienen una vida media corta de 3,82 días, y es un trazador conservativo natural que ayuda a los científicos a determinar y cuantificar las interconexiones hidráulicas entre las reservas hídricas superficiales y subterráneas.

El objetivo final de la generación de información científica mediante la aplicación de la hidrología isotópica es contribuir a la toma de decisiones informadas para el establecimiento de acuerdos operativos para la cooperación en materia gestión de aguas transfronterizas.

En el Capítulo 2 se presenta en detalle el diseño metodológico, que incluye la estrategia de investigación científica, los materiales y equipos, así como el trabajo de análisis, tratamiento e interpretación de datos científicos de isótopos estables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) e inestables de: Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C) y Radón-222 (^{222}Rn), a través de modelos matemáticos, que permitieron el desarrollo del modelo del funcionamiento hidrogeológico de la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada), en el Estado Plurinacional de Bolivia.

CAPÍTULO 2: MODELO DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO DE LA CUENCA TIERRA DE LOS LÍPEZ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

PhD. Ing. Gabriela Patricia Flores Avilés ^{1,a}

¹ Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Estado Plurinacional de Bolivia, La Paz, Bolivia

^a Autor de correspondencia

e-mail: gflores@aben.gob.bo (GP Flores Avilés)

Resumen

En la Cuenca Tierra de los Lipez, importante reservorio de agua dulce transfronteriza compartida entre el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile y Argentina, la comprensión limitada sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos es uno de los principales factores que limita la cobertura de acuerdos operativos específicos entre Bolivia, Chile y Argentina.

En particular, el presente estudio tuvo por objetivo desarrollar un modelo hidrogeológico de la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lipez (zona piloto Laguna Colorada), en el Estado Plurinacional de Bolivia, basado en evidencia científica de isótopos estables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) y de isótopos inestables de: Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C) y Radón-222 (^{222}Rn) generada al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021, y combinada con información hidrogeológica, hidrológica, litológica, geofísica y topográfica.

El tratamiento e interpretación de la evidencia científica isotópica, a través de modelos matemáticos, permitió determinar que:

El sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada) consiste en: i) un subdominio poroso compuesto por arenas, gravas y arcillas y un ii) subdominio fracturado controlado por la presencia de sistemas estructurales (fallas).

La recarga de las aguas subterráneas del sistema acuífero se origina en la cadena montañosa de la Cordillera Occidental, a una altitud de 4,750 y 6,000 m s.n.m.

La recarga media anual por infiltración de lluvia en el subdominio poroso del sistema acuífero es de $7 \text{ a } 8 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$, con un efecto de evaporación fuerte.

El 58% del volumen de aguas subterráneas del subdominio poroso que descarga hacia la Laguna Colorada se evapora. Así, se estima una descarga del subdominio poroso hacia la Laguna Colorada de $165.950 - 921.945 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ evaporándose de $229.169 - 1.273.163 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$.

En el Sud-Oeste del sistema acuífero, las aguas subterráneas presentan una mezcla del 39 al 76 % de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares, del 21 al 58% de aguas de precipitación reciente, y una mínima influencia de fluidos geotermales (3 al 5%).

En el Nor-Este y Nor-Oeste del sistema acuífero, las aguas subterráneas presentan una mezcla del 6 al 94 % de aguas de manifestaciones hidrotermales, del 5 al 91 % de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca y una mínima influencia de fluidos geotermales (1 al 4%).

Las concentraciones de ^{222}Rn presentes en las aguas subterráneas del subdominio fracturado (6,4 a $38,1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$) están relacionadas con las actividades de ^{226}Ra preferencialmente distribuidas a lo largo del sistema estructural (fallas).

Las edades aparentes de las aguas subterráneas varían entre 5.830 a 14.896 años en el subdominio poroso, y entre 4.612 a 21.603 años en el subdominio fracturado. Lo cual implica que la recarga del sistema acuífero se dio durante el Holoceno y Pleistoceno Superior durante la última transición glacial-interglacial del Altiplano Boliviano que corresponde a la extensión de la fase lacustre 'Tauca'.

Los datos e información científica generada en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez, en el marco del Proyecto BOL 7005, coadyuvará al fortalecimiento de la gestión integrada y al establecimiento de mecanismos de cooperación en materia de recursos hídricos transfronterizos, en el Estado Plurinacional de Bolivia.

2.1 Introducción

La escasez de agua dulce es un problema latente a nivel mundial, particularmente en regiones áridas y semiáridas, donde los reservorios de agua dulce se ven amenazados por el cambio climático, el crecimiento continuo de la población, y el impacto de las actividades antropogénicas (e.g. Xanke et al., 2017; Kammoun et al., 2018).

En vista de ello, la generación de conocimiento científico sobre el funcionamiento de las cuencas hidrológicas, sus mecanismos de recarga y descarga, direcciones de flujo, origen de las aguas, procesos hidrológicos, entre otros, son cruciales para el desarrollo sostenible y duradero de los recursos hídricos, en particular, de los acuíferos transfronterizos.

Las aplicaciones pacíficas de la tecnología nuclear coadyuvan a la generación de información científica, permitiendo el desarrollo y optimización de estudios de disponibilidad, vulnerabilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos, lo cual permite, en el caso de los recursos hídricos transfronterizos, el intercambio de información y compatibilización de datos entre los Estados que comparten dichos recursos.

De hecho, en diferentes regiones del mundo, incluyendo Sud América, se ha documentado el desarrollo de estudios mediante la aplicación de la hidrología isotópica constituyéndose en una herramienta nuclear eficaz y valiosa (Mahlknecht et al., 2005; Fernandes, Carreira & Nunes, 2009; Mudarra et al., 2014; Kang et al., 2017; Zhao et al., 2018; Heprun et al., 2019; Jian et al., 2020; I.A.E.A/ I.N.I.S, 2021; Flores Avilés et al., 2022).

En el Estado Plurinacional de Bolivia, el desarrollo de estudios de evaluación de los recursos hídricos mediante la aplicación de la hidrología isotópica, ha reportado información científica principalmente en la región hidrográfica del Altiplano Boliviano.

En el Altiplano Norte, en la región del Lago Titicaca, se puede citar a Cross et al. (2001) quienes realizaron un balance de masas utilizando composiciones isotópicas de oxígeno-18 y simulaciones para estimar los cambios en la precipitación y temperatura responsables del descenso de los niveles del lago.

Por otro lado, Flores Avilés et al. (2022) desarrollaron un modelo isotópico/hidrogeoquímico del Acuífero de la Cuenca Katari y Lago Menor utilizando técnicas isotópicas de alta sensibilidad para la correcta comprensión de los procesos que controlan y/o alteran la química y las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas, así como la identificación de las zonas del acuífero afectadas por las actividades antropogénicas.

Además, el M.M.A.Y.A (2016) reportó datos isotópicos de Deuterio y Oxígeno-18 de aguas subterráneas alojadas en la zona de Purapurani, en el Acuífero de la Cuenca Katari y Lago Menor.

En el Altiplano Central, Coudrain et al. (1995) aplicaron isótopos estables y radioisótopos para comprender la salinidad de las aguas subterráneas. También, Gonfiantini et al. (2001) estudiaron el efecto de la altitud en la composición isotópica de las precipitaciones desde el Amazonas hasta el Altiplano boliviano.

En el Altiplano Sud existe información científica muy limitada sobre el desarrollo de estudios de evaluación de los recursos hídricos subterráneos, tal es el caso de la Cuenca Tierra de los Lipez (M.R.E, 2022), reservorio de agua dulce transfronteriza compartida entre el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile y Argentina.

La Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lipez, en el Estado Plurinacional de Bolivia, es una importante fuente de suministro de aguas subterráneas para consumo, riego y actividades turísticas. La comprensión limitada sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos en esta región

es uno de los principales factores que limita la cobertura de acuerdos operativos específicos, siendo un reto importante la generación de conocimiento científico entre Bolivia, Chile y Argentina.

Investigaciones previas a escala local y regional han estudiado a fondo las características geotérmicas, en el sector de la Laguna Colorada (Delgadillo et al., 1986; Scandiffio & Álvarez, 1992; Revilla, 2016; Figueroa, 2018) mediante caracterizaciones geofísicas, hidrogeoquímicas e isotópicas. Asimismo, se han reportado datos sobre estudios de balance hídrico en este sector (Saavedra et al., 2017). Sin embargo, todavía se tiene una comprensión limitada sobre la dirección, magnitud, y los procesos naturales de los flujos subterráneos, así como los mecanismos de recarga y descarga de los acuíferos en esta región.

En particular, la presente investigación tiene por objetivo desarrollar un modelo hidrogeológico sobre los procesos hidrológicos clave que controlan la cantidad de las aguas subterráneas en una zona piloto de la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez (sector Laguna Colorada), en el Estado Plurinacional de Bolivia, basada en evidencia científica de isótopos estables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) y de isótopos inestables de: Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C) y Radón-222 (^{222}Rn).

El objetivo final del proyecto es contribuir al fortalecimiento de la gestión integrada de los recursos hídricos y al establecimiento de mecanismos de cooperación en materia de aguas transfronterizas, para alcanzar la seguridad hídrica en el Estado Plurinacional de Bolivia.

2.2 Descripción de la zona de Estudio

2.2.1. Localización y clima

A escala regional, la Cuenca Tierra de los Lípez (M.R.E, 2022), es un reservorio de agua dulce transfronteriza con una superficie de $\sim 26,600 \text{ km}^2$, compartida entre el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile y Argentina.

La Cuenca Tierra de los Lipez, en el Estado Plurinacional de Bolivia, se encuentra localizada dentro de la Mancomunidad Gran Tierra de los Lipez entre los municipios de San Pablo de Lipez, Colcha "K", San Agustín, y San Antonio de Esmoraca, de las provincias Sud Lipez, Nor Lipez y Enrique Baldivieso, del Departamento de Potosí (Mapa N°1).

A nivel local, la zona piloto de estudio se encuentra ubicada dentro de la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lipez. Los límites de la zona piloto de estudio (Mapa N°1) coinciden con los límites de la unidad hidrológica de la Laguna Colorada (M.M.A.Y.A, 2022), rodeada por una cadena montañosa de la Cordillera Occidental de los Andes.

La unidad hidrológica Laguna Colorada es endorreica y tiene una extensión de 1,500 km². En general, los cursos de los ríos fluyen hacia la Laguna Colorada son cortos y tienen pendientes entre 1,7 y 4,7 por ciento (E.N.D.E, 2010).

Las condiciones climáticas en esta zona son áridas (E.N.D.E, 2010), presentando, dos estaciones marcadas "época lluviosa" (diciembre a marzo) y "época de estiaje" (abril a noviembre). La precipitación y la evapotranspiración potencial media anual, calculada en base a registros del S.E.N.A.M.H.I (2022) para la estación Colcha K (2000-2021; Mapa N°1), es de 222,2 mm·año⁻¹ y de 629,1 mm·año⁻¹, respectivamente (Fig. 2.1).

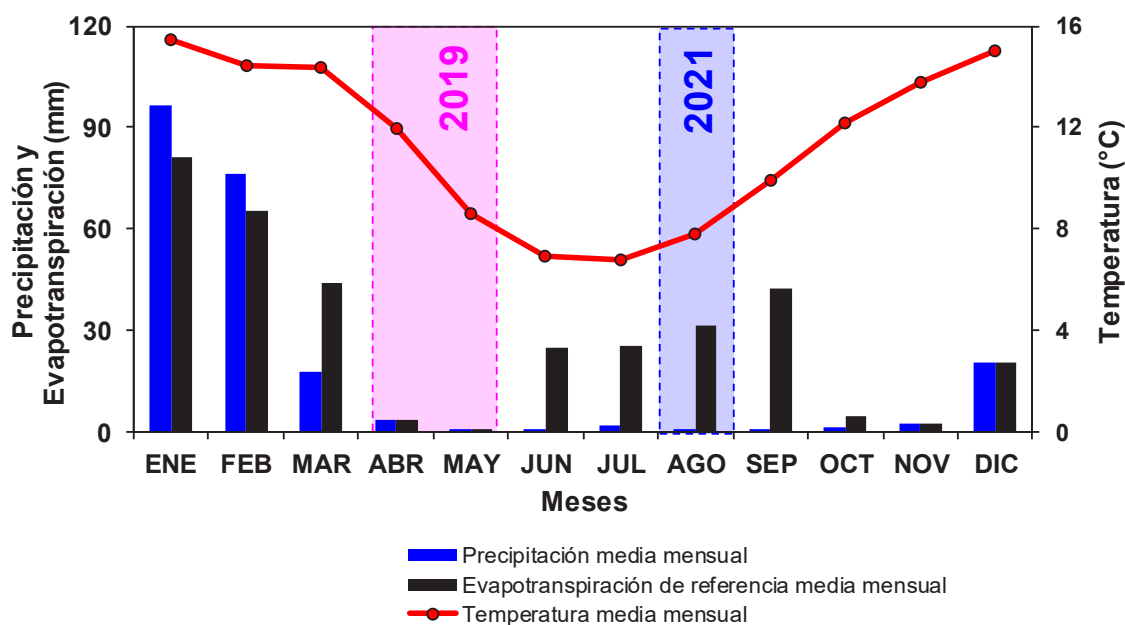
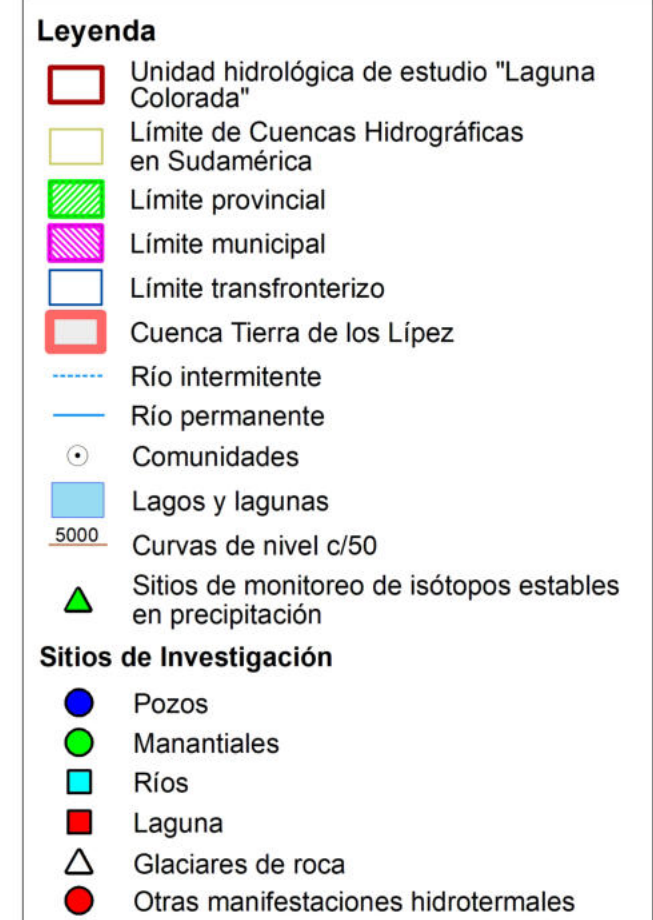
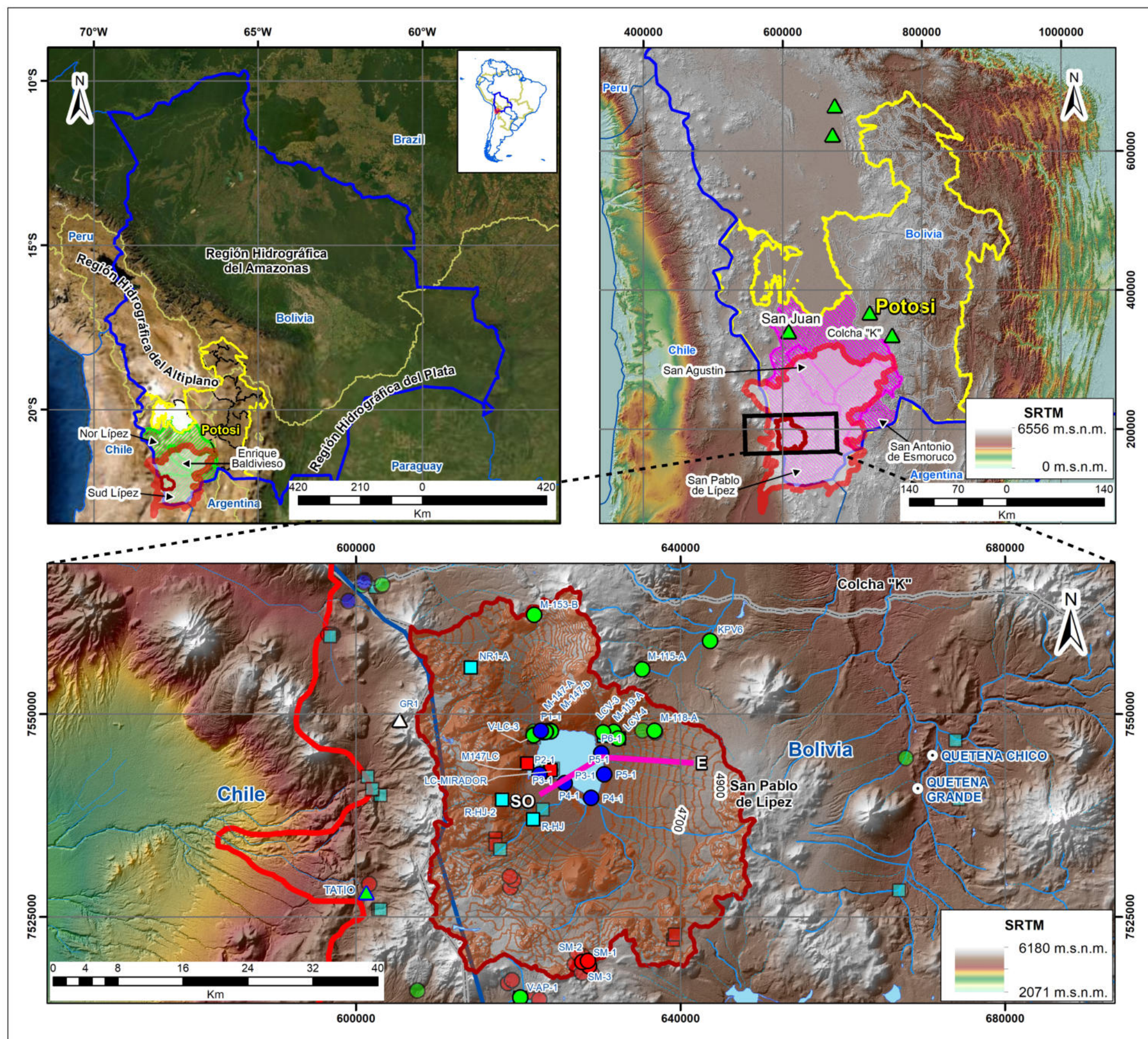


Figura 2.1 Precipitación, evapotranspiración de referencia y temperatura media mensual de la Estación Colcha K, ubicada a 172 km del sitio de estudio, para el periodo de registro 2000-2021 (ABEN, 2022).

El régimen climático no siempre fue tan árido como el actual, investigaciones científicas también han reportado patrones climáticos que favorecieron la formación de relieves glaciares y lacustres entre la Cordillera Oriental de Bolivia y el Altiplano Boliviano (Fritz et al., 2007; Flores Avilés et al., 2020). 'Ciclos glaciares' con condiciones húmedas y frías durante avances glaciares regionales y 'ciclos interglaciares' con condiciones cálidas y secas durante retrocesos glaciares regionales (Fritz et al., 2007; Flores Avilés et al., 2020).



Mapa N°1. Contexto geográfico de la unidad hidrológica de estudio. (superior izquierdo) Sud América y región hidrográfica del Altiplano, (superior derecho) dentro de los municipios de la Mancomunidad Gran Tierra de los Lipez. (Inferior) Ubicación de los sitios de investigación con información científica de isótopos estables e inestables de: i) estudios realizados antes de 2019 (transparencia al 50%) y aquellos ii) generados por la ABEN durante 2019 y 2021.

2.2.2. Geología e Hidrogeología

Las cuencas hidrológicas del Altiplano boliviano consisten en formas de relieve erosionadas en formaciones rocosas Paleozoicas y Terciarias, y rellenas de sedimentos del periodo Cuaternario (Flores Avilés, 2019).

En particular, en el Altiplano norte, las cuencas se encuentran dominadas por aguas subterráneas alojadas en sedimentos Cuaternarios, de origen fluvio-glacial y paleolacustre. Las formaciones rocosas constituyen la base impermeable de los acuíferos Cuaternarios (Flores Avilés et al., 2020; Flores Avilés et al., 2022).

En la unidad hidrológica de la Laguna Colorada, los afloramientos rocosos presentes en la zona se formaron principalmente durante los periodos del Terciario y del Cuaternario (Villaruel, 2014).

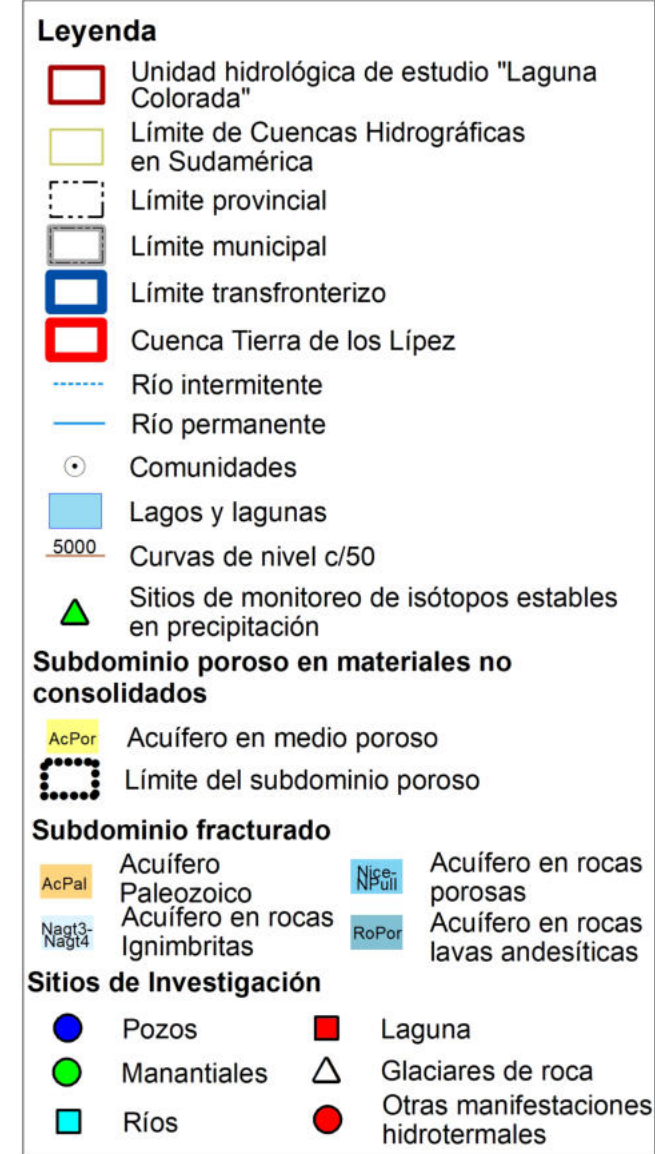
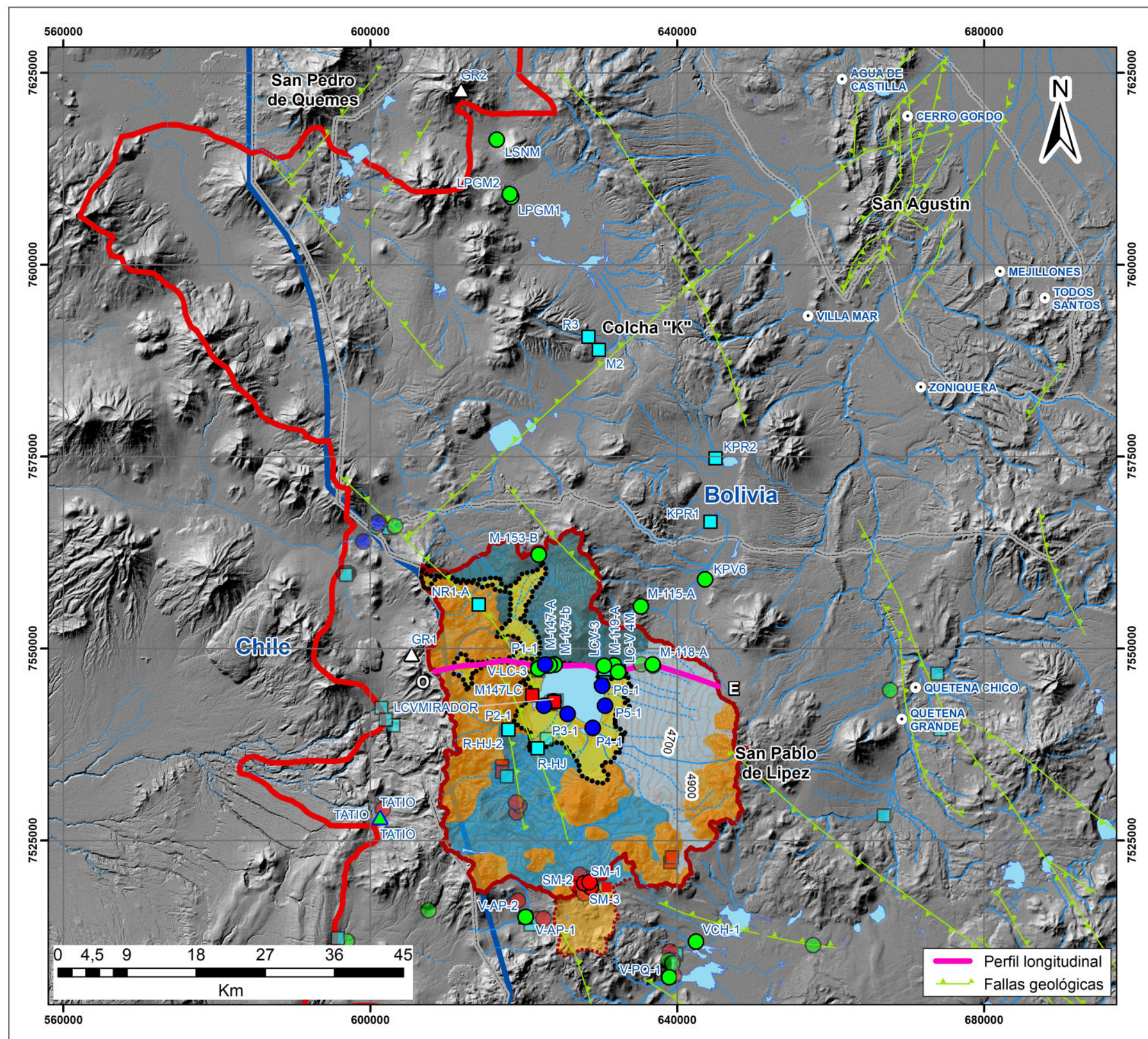
Según estudios geológicos y perforaciones realizadas en el sector de la Laguna Colorada (Delgadillo et al., 1986; Scandiffio 1990; Figueroa 2018), las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, consisten en (del más antiguo al más reciente): *durante el Plioceno* a) lavas andesíticas y dacíticas producto de un vulcanismo relativamente antiguo que sobreyacen a plataformas ignimbriticas, *durante el Pleistoceno* b) ignimbritas de composición dacítica y andesítica que sobreyacen a las unidades anteriores, c) flujos ignimbriticos de diferentes edades, que sobreyacen a las unidades anteriores, las capas ignimbriticas más antiguas son más compactas y actualmente se encuentran en partes elevadas, mientras que, las capas ignimbriticas superiores son menos compactas y vesiculadas afectadas por fenómenos de glaciación. Y finalmente, en algunos sectores de la zona, f) se evidencian sedimentos cuaternarios, producto de la erosión glacial de las rocas volcánicas descritas anteriormente.

Delgadillo et al. (1986), desarrolló un modelo geotérmico preliminar del sector de la Laguna Colorada, en el que reporta la presencia de una capa de sello constituida por horizontes ignimbriticos, que confina el reservorio geotérmico, con espesores muy variables y mínimos en áreas de manifestaciones superficiales. Este autor reportó que el fracturamiento de esta capa sello permitió que en muchos casos se produzcan fugas de calor del reservorio geotérmico (Delgadillo et al., 1986). De la misma forma,

Scandiffio (1990), también reportó que durante el periodo post-glacial se mantuvo una actividad neotectónica que actualmente es evidenciada por sistemas estructurales (fallas) que permiten el flujo y ascenso de los fluidos geotérmicos a niveles superficiales.

Así, en base a la información detallada anteriormente, en el presente estudio se considera que el 'Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez' presenta dos unidades hidrogeológicas: un i) subdominio poroso de materiales no consolidados, compuesto por sedimentos cuaternarios (arenas, gravas y arcillas) producto de la erosión glacial de rocas volcánicas, cuya base impermeable está constituida por horizontes ignimbríticos (no fracturados), y un ii) subdominio de rocas fracturadas, compuesto por rocas de origen volcánico (horizontes ignimbríticos), controlado por la presencia de sistemas estructurales, que se evidencian a través de manifestaciones hidrotermales (manantiales fríos y calientes, fumarolas, geysers) (Mapa N°2).

El espesor del subdominio poroso fue estimado en base a los registros de sondeos geofísicos reportados en E.N.D.E (2016). Las resistividades reportadas en Villarroel (2014), Revilla (2016) y E.N.D.E (2016) fueron calibradas con la litología de las perforaciones de los pozos SM-1, SM-2, SM-3 y SM-4, evidenciando espesores de capas de arenas, gravas y arcillas, entre 30 a 265 m.



2.3 Metodología

2.3.1. Estrategia de investigación

La Fig. 2.3 presenta la estrategia utilizada para el desarrollo del modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los López, en la zona piloto de la Laguna Colorada.

Inicialmente se diseñó y construyó una línea de base datos científicos isotópicos, hidrológicos, litológicos, geofísicos, hidrogeológicos y topográficos (Fig. 2.2) de estudios científicos realizados en la Cuenca Tierra de los López, de: O.I.E.A (1990); Risacher et al. (1999); Villarroel (2014); Ramos (2015); Revilla (2016); Figueroa (2018); Toro (2018).

Posteriormente, en base al análisis técnico-científico de la línea de base se identificaron los principales componentes del balance hídrico subterráneo (Fig. 2.3a, 2.3b) en la zona piloto Laguna Colorada, definiéndose sitios de investigación estratégicos de aguas subterráneas y superficiales en las partes: alta, media y baja de la unidad hidrológica de la Laguna Colorada (Mapa N°1) para la medición de isótopos estables e inestables.

El modelo del funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero en estado estacionario considera los principales componentes de entrada y de salida del balance hídrico subterráneo en el subdominio poroso, así como, procesos hidrológicos clave.

A continuación, se describen los componentes del balance hídrico subterráneo natural en el subdominio poroso del sistema acuífero:

$$\Delta S_{ASub.} = Q_{recarga} + Q_{manant.} + Q_{fluid.geot} - Q_{Evap.Asubt} - Q_{Lag.efluente}$$

Flujos de entrada

- Recarga ($Q_{recarga}$) (precipitación).

- Aporte de aguas subterráneas del subdominio de rocas fracturadas: manantiales calientes y fríos, fluidos geotérmicos ($Q_{manant.}$, $Q_{fluid.geot.}$).
- Aporte de aguas subterráneas a través de los límites de la unidad hidrológica de la Laguna Colorada.

Flujos de salida

- Descarga de aguas subterráneas en la Laguna Colorada, efluente ($Q_{Lag.efluente}$).
- Evaporación de las aguas subterráneas con niveles freáticos someros y/o en contacto con la atmósfera ($Q_{manant.}$, $Q_{fluid.geot.}$).

Por otra parte, a continuación, se describen los procesos hidrológicos clave que controlan la cantidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero:

- Evaporación de las aguas subterráneas del subdominio poroso y del fracturado.
- Mezcla durante la recarga y flujo de las aguas subterráneas.

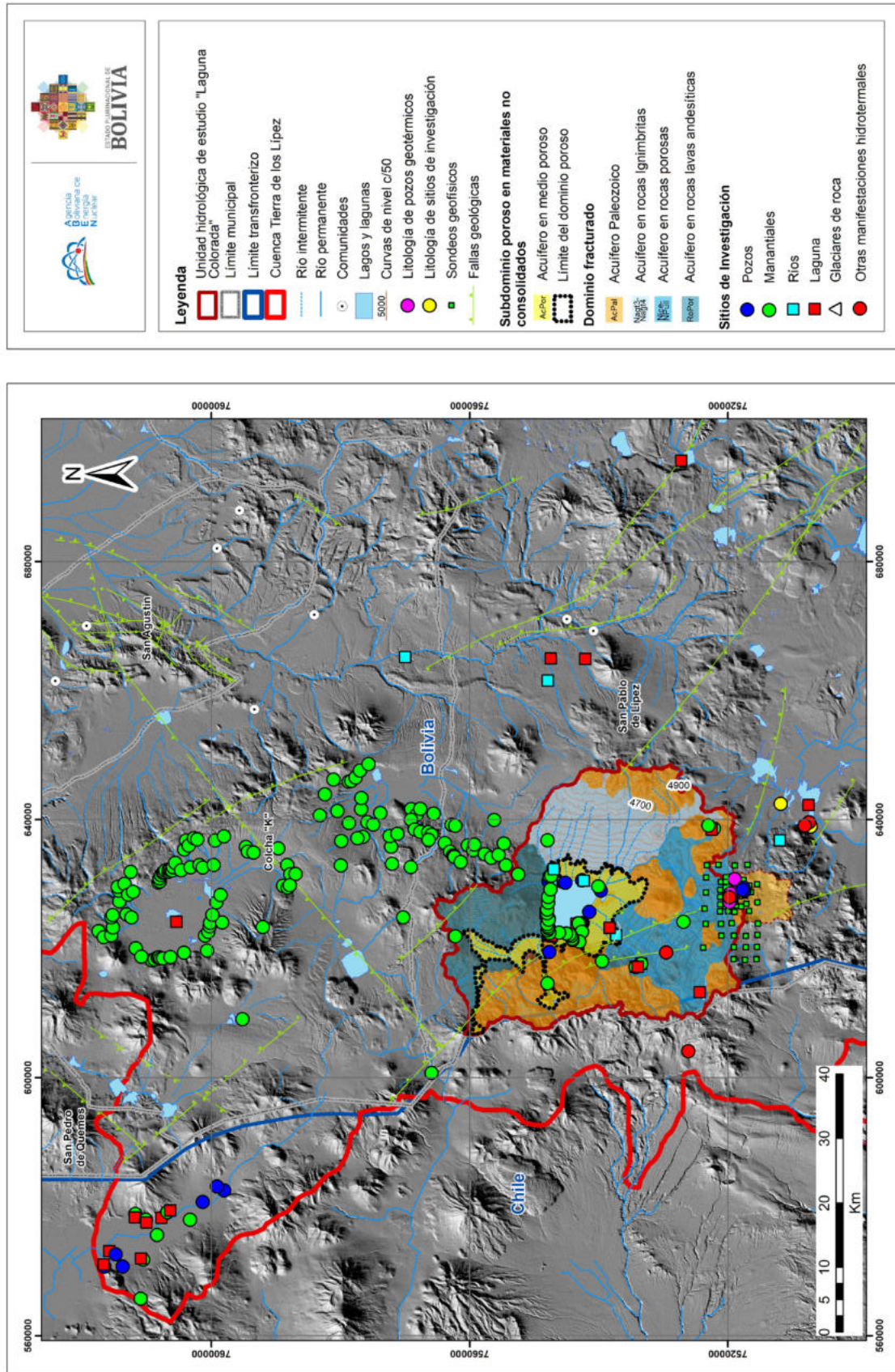


Figura 2.2 Línea de base de datos científicos temporales y geoespaciales SIG, mostrando sitios de investigación con información hidrográfica, litológica, geofísica, hidrogeológica y topográfica (ABEN, 2022).

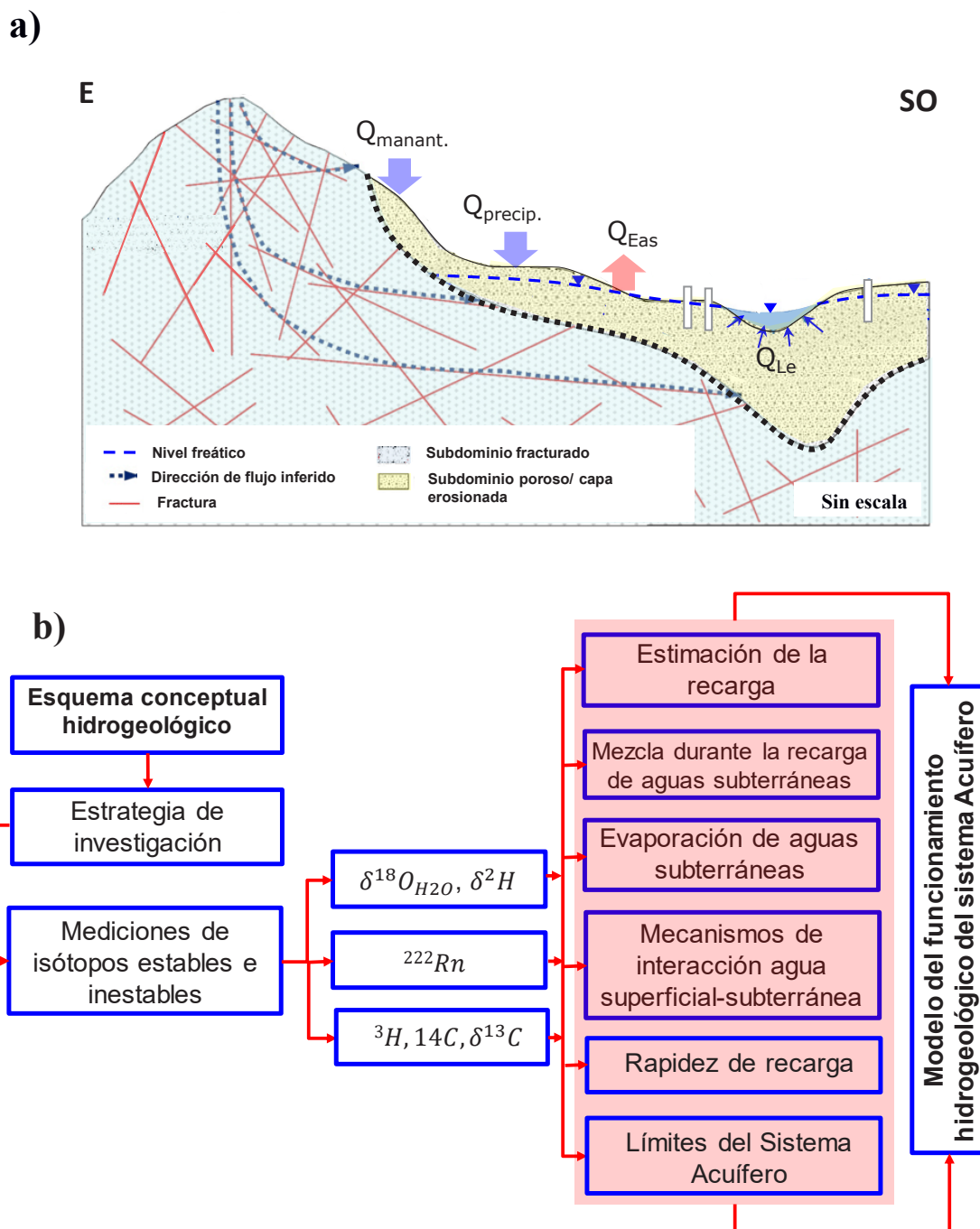


Figura 2.3 a) Esquema conceptual hidrogeológico del sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lipez (ver ubicación del perfil en el Mapa N°1), b) estrategia de investigación para el desarrollo del modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero mediante la aplicación de la hidrología isotópica (ABEN, 2022).

De esta manera, con el propósito de cuantificar los componentes del balance hídrico subterráneo en el subdominio poroso (Fig. 2.3b) se diseñaron y llevaron a cabo dos misiones científicas de campo, al final de la época lluviosa (abril y mayo de 2019) y durante la época de estiaje (agosto de 2021), para la recolección de muestras de agua para la medición de isótopos estables e inestables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$), y Radón-222 (^{222}Rn) (Tabla 2.2).

Las muestras de agua fueron recolectadas en sitios de investigación estratégicos de aguas subterráneas y superficiales: i) fuentes de agua ubicadas en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), ii) manifestaciones hidrotermales (manantiales fríos y calientes) ubicados en el subdominio de rocas fracturadas, y iii) fuentes de agua superficial (ríos) (Mapa N°1; Tabla 2.1, 2.2).

En el Mapa N°1, la referencia vertical de la altitud en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m) se encuentra basada en el modelo digital de terreno SRTM-GL1 30 m de resolución (Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global, N.A.S.A, 2000). Los colores hipsométricos representan la elevación en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m) del terreno.

2.3.2. Análisis Isotópicos

Las muestras de agua para el análisis de isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ fueron cuantificadas en un Analizador Isotópico de Agua-Vapor LGR (Los Gatos Research Model 912-0032) y reportadas en relación al Agua del océano medio estándar de Viena o VSMOW (por sus siglas en inglés) en permiles (‰). El error analítico fue menor que 0,2 ‰ y 0,6 ‰ para $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, respectivamente.

Las muestras de agua para el análisis de isótopos inestables de ^3H fueron cuantificadas mediante un contador Quantulus 1220 de PerkinElmer. Todas las muestras fueron analizadas mediante el procedimiento -*Liquid Scintillation Counting*, LSC por sus siglas en inglés- para muestras de bajo nivel utilizado para la datación de aguas subterráneas (Copia et al., 2021). El límite de detección de ^3H fue

de 0,15 Unidades de Tritio (UT) para 500 ml de muestras enriquecidas y 0,30 UT para 250 ml de muestras enriquecidas.

Los análisis isotópicos de Oxígeno-18, Deuterio y Tritio fueron realizados en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en Viena, Austria.

Las mediciones de isótopos inestables de Carbono-14 (^{14}C) fueron realizadas mediante conteo directo de átomos utilizando el análisis de espectrometría de masas con acelerador. Los valores medidos consideran el fraccionamiento isotópico durante la grafitización, fueron reportados en porcentaje de Carbono Moderno (pMC por sus siglas en inglés) y normalizados a un valor de $\delta^{13}\text{C}$ de -25 ‰ en relación al estándar Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB por sus siglas en inglés). El error analítico fue de $0,11 - 0,26 \text{ pMC} \pm \sigma$ para ^{14}C y $0,15 \text{ ‰} \pm \sigma$ para $\delta^{13}\text{C}$.

Los análisis isotópicos de Carbono-14 fueron realizados en el Centro de Investigación de Isótopos de la Universidad de Groningen, en Los Países Bajos, Amsterdam.

Finalmente, las concentraciones de actividad de ^{222}Rn fueron cuantificadas mediante un detector electrónico de Radón RAD-7 (DurrIDGE, USA) utilizando el accesorio RAD H_2O . El RAD-7 utiliza un detector semiconductor de Silicio, que recoge la energía de las partículas alfa y las convierte en señal eléctrica. El límite inferior de detección fue de 400 Bq m^{-3} . Las mediciones de Radón-222 fueron realizados en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), de la ABEN.

2.3.3. Evaluación de los datos isotópicos

2.3.3.1. Línea local de aguas meteóricas

La línea local de aguas meteóricas (Local Meteoric Water Line, LMWL por sus siglas en inglés), para el sitio de estudio, fue determinada en base a las composiciones isotópicas mensuales de la Estación de San Juan, para el periodo de registro 2008-2013, disponible en I.A.E.A/W.M. O (2021).

La marca isotópica ponderada de la precipitación para la estación de San Juan, ubicada a 146 km de la Laguna Colorada (ver Mapa N°1), fue calculada en base a la siguiente ecuación (Clark, 2015):

$$\delta_{pa} = \frac{\sum_{ene}^{dic} p_{mes} \cdot \delta_{pm}}{\sum_{ene}^{dic} p_{mes}} \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

Donde δ_{pa} es el promedio anual ponderado del delta Oxígeno -18 o Deuterio [‰], p_{mes} es la precipitación mensual [mm], y δ_{pm} es el promedio mensual ponderado del delta Oxígeno -18 o Deuterio [‰].

Además, por la proximidad a la zona de estudio se consideró la marca isotópica ponderada de la precipitación del sitio de monitoreo de El Tatio, ubicado a 27 km de la Laguna Colorada, en la zona transfronteriza con Chile (Mapa N°1). Valdivieso et al. (2022) reportó mediciones de Oxígeno-18 y Deuterio, de precipitación en El Tatio, realizadas durante diciembre de 2019, noviembre de 2020 y enero de 2021.

2.3.3.2. Componentes del balance hídrico subterráneo y procesos hidrológicos

2.3.3.2.1. Estimación de la recarga

La recarga media anual, por la infiltración de lluvia, en el subdominio poroso fue modelada mediante la ecuación propuesta por Allison et al. (1988) para regiones áridas:

$$\delta^2\text{H}_{\text{despl.LMWL}} = 22/\sqrt{Q_{\text{recarga}}} \quad \text{Ecuación 2. 2}$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{despl.LMWL}} = 3/\sqrt{Q_{\text{recarga}}} \quad \text{Ecuación 2. 3}$$

donde $\delta^2\text{H}_{\text{despl.LMWL}}$ es el desplazamiento del delta de Deuterio de las aguas subterráneas [‰] desde la línea local de aguas meteóricas, $\delta^{18}\text{O}_{\text{despl.LMWL}}$ es el desplazamiento del delta de Oxígeno-18 de las aguas subterráneas [‰] desde la línea local de aguas meteóricas, y Q_{recarga} es la recarga en [mm · año⁻¹].

2.3.3.2.2. Mezcla durante la recarga y flujo de aguas subterráneas

Para determinar el porcentaje de mezcla durante la recarga y flujo de aguas subterráneas, se planteó la siguiente hipótesis:

- Las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado del sistema acuífero, dependiendo de la distancia de la zona de recarga, presentan una mezcla de: i) *hipótesis 1*, aguas de precipitación de origen reciente (El Tatio), fluidos geotermales (SM-1), y aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca (GR2), o ii) *hipótesis 2*, aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca (GR2), manifestaciones hidrotermales (M-118) y fluidos geotermales (SM-1).

El valor de referencia de las composiciones isotópicas de Oxígeno-18 y Deuterio para: a) la precipitación de la estación de El Tatio, a 4.307 m s.n.m de altitud, fue extraído de Valdivieso et al. (2022), para b) los fluidos geotermales (SM-1) fue extraído de Figueroa (2018), y para las c) muestras de hielo recolectadas en el Glaciar Caquella (GR2), a 5.412 m s.n.m de altitud, fue extraído de Chaffaut (1998) (Tabla 2.1,2.2; Mapa N°2).

De esta manera, los aportes de las fuentes identificadas fueron cuantificados en base a un modelo de balance isotópico (Clark, 2015):

$$f_{GR2} = \frac{[Cl_{ASub.subd.poroso/fract.}] - [Cl_{El\ Tatio}] - f_{SM1}([Cl_{SM1}] - [Cl_{El\ Tatio}])}{[Cl_{GR2}] - [Cl_{El\ Tatio}]} \quad \text{Ecuación 2. 4}$$

$$f_{El\ Tatio} = \frac{\delta^{18}O_{ASub.subd.poroso/fract.} - \delta^{18}O_{GR2} - f_{SM1}(\delta^{18}O_{SM1} - \delta^{18}O_{GR2})}{\delta^{18}O_{El\ Tatio} - \delta^{18}O_{GR2}} \quad \text{Ecuación 2. 5}$$

Para la ecuación 2.4: f_{GR2} es la fracción relativa de aguas meteóricas producto del deshielo de los glaciares de roca [adimensional], $[Cl_{ASub.subd.poroso/fract.}]$ es la concentración de cloruro de las aguas subterráneas alojadas en el subdominio poroso y/o en el subdominio fracturado [$mg \cdot L^{-1}$], $[Cl_{El\ Tatio}]$ es la concentración de cloruro de las aguas de precipitación de El Tatio [$mg \cdot L^{-1}$], f_{SM1}

es la fracción relativa del fluido geotermal [adimensional], $[Cl_{SM1}]$ es la concentración de cloruro de los fluidos geotermales $[mg \cdot L^{-1}]$, y $[Cl_{GR2}]$ es la concentración de cloruro de las aguas meteóricas producto del deshielo de los glaciares de roca $[mg \cdot L^{-1}]$.

Para la ecuación 2.5: $f_{El\ Tatio}$ es la fracción relativa de las aguas de precipitación de El Tatio, $\delta^{18}O_{Asub.subd.poroso/fract}$ es el delta Oxígeno-18 de las aguas subterráneas alojadas en el subdominio poroso y/o subdominio fracturado [‰], $\delta^{18}O_{GR2}$ es el delta Oxígeno-18 de las aguas meteóricas producto del deshielo de los glaciares de roca [‰], $\delta^{18}O_{SM1}$ es el delta Oxígeno-18 del fluido geotermal [‰], y $\delta^{18}O_{El\ Tatio}$ es el delta Oxígeno-18 de las aguas de precipitación de El Tatio.

2.3.3.2.3. Evaporación de aguas subterráneas someras

La fracción de pérdida por evaporación durante la recarga de aguas subterráneas en el subdominio porosos del sistema acuífero, fue modelada en base a la ecuación de destilación de Rayleigh (Clark & Fritz, 1997):

$$\delta^{18}O_{gw} - \delta^{18}O_{prec} = \varepsilon^{18}O_{total} \cdot \ln f \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde $\delta^{18}O_{gw}$ es el delta de oxígeno-18 de las aguas subterráneas [‰], $\delta^{18}O_{prec}$ es el delta de oxígeno-18 de la precipitación, $\varepsilon^{18}O_{total}$ es el enriquecimiento total por evaporación [‰], y f es la fracción residual de agua. $\delta^{18}O_{gw} - \delta^{18}O_{prec}$ se puede determinar gráficamente en base a la pendiente de evaporación local y $\varepsilon^{18}O_{total} = \varepsilon^{18}O_{l-v} + \Delta\varepsilon^{18}O_{bl-v}$; $\varepsilon^{18}O_{l-v}$ [‰], es el factor de fraccionamiento para el intercambio de agua-vapor en equilibrio para ^{18}O y es una función de la temperatura, y $\Delta\varepsilon^{18}O_{bl-v}$ [‰], es el efecto cinético como función de la humedad.

2.3.3.2.4. Descarga hacia la Laguna Colorada efluente

La descarga de las aguas subterráneas hacia la Laguna Colorada fue estimada a través de un modelo de balance de masas de ^{222}Rn , considerando el intercambio de gases y la desintegración radioactiva del Radón-222, en base a la siguiente ecuación:

$$Rn_d \cdot Q_r = Rn_{gw} \cdot \frac{1 - \exp(-\alpha \cdot L)}{L \cdot \alpha} \cdot Q_{gw} + Rn_u \cdot \exp(-\alpha \cdot L) \cdot (Q_r - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{v} + \frac{D^{0,5}}{v^{0,5} \cdot h^{1,5}} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Para las Ec. 2.7 y 2.8: Rn_d , Rn_u , Rn_{gw} son las concentraciones de actividad de ^{222}Rn medidas aguas abajo y aguas arriba de los ríos, y en aguas subterráneas, respectivamente [Bq/m^3]; Q_r y Q_{gw} son las descargas de ríos y aguas subterráneas, respectivamente [m^3/s]; α es el coeficiente de pérdida del Radón causado por la desintegración radioactiva y el intercambio de gases; L es la distancia entre dos sitios de investigación de fuentes de agua superficial [m]; v es la velocidad promedio entre dos sitios de investigación de fuentes de agua superficial [m/s]; h es la profundidad del río [m]; λ es el coeficiente de desintegración radioactiva ($\lambda = 2,08 \times 10^{-6} s^{-1}$); D es la difusividad molecular del Radón [cm^2/s], $-\log D = (980/T) + 1,59$, y T es la temperatura absoluta del agua en [K]. Por tanto, la descarga de aguas subterráneas Q_{gw} y la proporción de la descarga de aguas superficiales Q_{gw}/Q_r puede ser calculada resolviendo la Ec. 2.7.

De manera previa a la construcción del modelo de balance de masas de ^{222}Rn , se realizó la corrección por desintegración radioactiva considerando un tiempo constante de 132,4 horas (vida media de un átomo de Radón-222). Así, el factor de corrección por desintegración (DCF) fue calculado en base a la siguiente ecuación:

$$DCF = \exp (T/132,4) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde DCF es el factor de corrección por desintegración radioactiva; T , es el tiempo de desintegración en horas.

2.3.3.3. Rapidez de recarga en el subdominio poroso

2.3.3.3.1. Datación de las aguas subterráneas

Las mediciones de Tritio de las aguas subterráneas del sistema acuífero (subdominio poroso y fracturado) fueron interpretadas cualitativamente considerando las siguientes hipótesis:

- La recarga de las aguas subterráneas de los subdominios que presentan valores no detectables de Tritio ingresaron en el sistema antes de 1953, año en el que se produjo la liberación de elevadas cantidades de Tritio en la atmósfera de manera artificial, Clark (2015).
- La recarga de las aguas subterráneas se origina en la cadena montañosa de la Cordillera Occidental. Para validar esta hipótesis se utilizaron los valores de Tritio de $2,60 \pm 0,30$, reportados por Houston (2007) para la precipitación de la estación de El Tatio.

Por otra parte, las edades aparentes de las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado fueron calculadas mediante la siguiente ecuación (Clark, 2015):

$$t = -8267 \cdot \ln \left(\frac{a_t^{14C}}{a_0^{14C}} \right) \quad \text{Ecuación 2. 10}$$

Donde a_0^{14C} es la actividad del carbono moderno (100 pMC) que no fue constante en el pasado, fluctuando entre 10% durante el Holoceno, y 20% a 30% durante el final del Pleistoceno; a_t^{14C} es la actividad medida en las aguas subterráneas.

Las edades aparentes fueron corregidas mediante la determinación de un factor de dilución, q , que representa una fracción de reducción de a_0^{14C} a algunos valores menores que 100 pMC considerando las siguientes hipótesis:

Hipótesis en el subdominio fracturado:

- En el subdominio fracturado ocurre dilución del ^{14}C debido al intercambio de carbonato entre las rocas que alojan el agua subterránea y el DIC.

Hipótesis en el subdominio poroso:

- La calcita presente en los sedimentos que rellenan la unidad hidrológica de la Laguna Colorada (arenas, gravas y arcilla), tiene un valor promedio de $\delta^{13}C > +1.0 \text{ ‰}$.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1. Composiciones Isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en las aguas subterráneas del sistema acuífero

La ecuación de la Línea Local de Aguas Meteoricas (LMWL) para la Estación San Juan (Figura 2.4) ($\delta^2\text{H} = 8,1 \delta^{18}\text{O} + 15,7$) presenta una pendiente ligeramente elevada de la Línea Global de Aguas Meteoricas (GMWL) ($\delta^2\text{H} = 8,0 \delta^{18}\text{O} + 10$) (Clark, 2015) y un intercepto (15,7) más elevado.

Las líneas meteoricas locales con pendientes e interceptos elevados con respecto a la GMWL son a menudo reportados en regiones áridas del mundo (e.g. Kang et al., 2017).

La marca isotópica ponderada de la precipitación para la estación de San Juan presenta una composición isotópica de -14,3 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -99,8‰ para $\delta^2\text{H}$, cuyos promedios ponderados corresponden a al menos 10 meses de valores de ^{18}O y ^2H para el periodo de registro (2008-2013).

Por otra parte, la marca isotópica ponderada de la precipitación para la estación de El Tatio presenta composiciones isotópicas de -6,6 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -35,7 ‰ para $\delta^2\text{H}$ (Fig. 2.4).

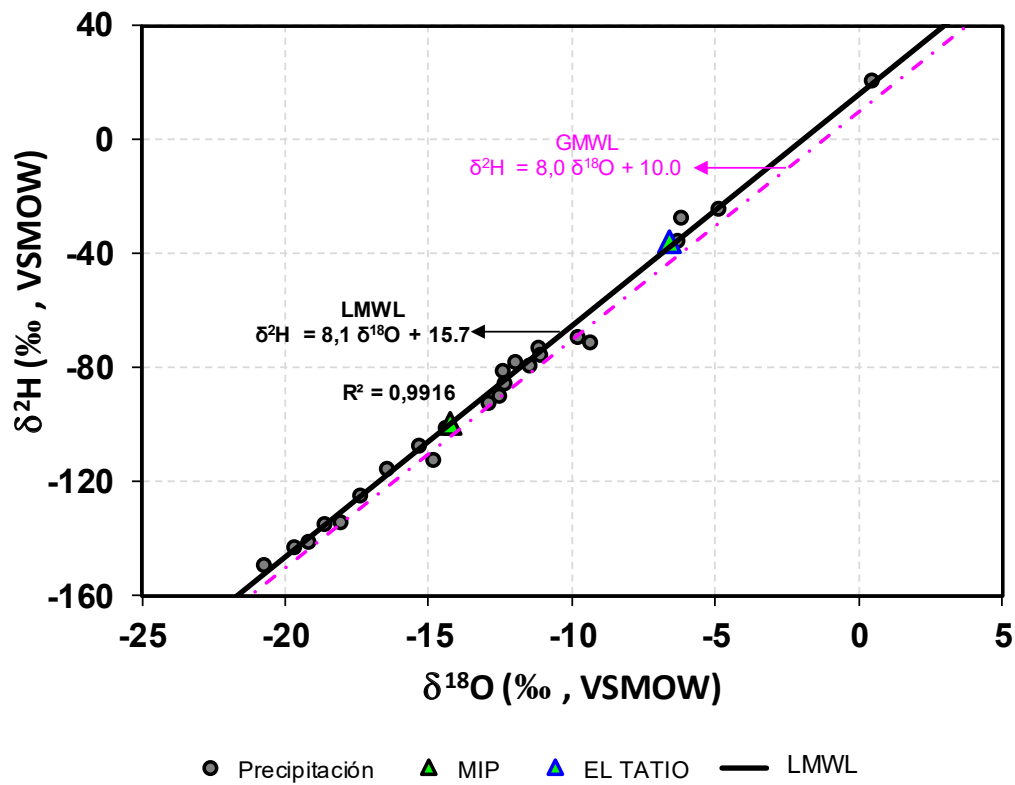


Figura 2.4 Línea Local de Agua Meteoricas (LMWL) y marca isotópica ponderada de la precipitación (MIP) para la estación de San Juan (elaboración propia en base a datos disponibles en I.A.E.A/W.M.O (2021)(ABEN, 2022).

En relación a las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas del sistema acuífero en la zona piloto de la Laguna Colorada se evidencia que al final de la época lluviosa de 2019 hubo una variación de -12,8 ‰ a -10,2 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -97,7 ‰ a -75,5 ‰ para $\delta^2\text{H}$ en el subdominio poroso de materiales no consolidados, mientras que, las variaciones fueron entre -14,3 ‰ a -11,6 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -104,7 ‰ a -97,3 ‰ para $\delta^2\text{H}$ en el subdominio fracturado (Fig. 2.5; Tabla 2.1).

Durante la época de estiaje de 2021, las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas presentaron una variación de -12,9 ‰ a -9,3 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -97,3 ‰ a -75,3 ‰ para $\delta^2\text{H}$ en el subdominio poroso, y de -13,0 ‰ a -8,4 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -97,2 ‰ a -71,9 ‰ para $\delta^2\text{H}$ en el subdominio fracturado (Fig. 2.5; Tabla 2.2).

Los resultados de un análisis comparativo sobre la variación espacial y temporal de las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas en el subdominio poroso (P3-1) evidencian un enriquecimiento isotópico de 0,6 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ y de 2 ‰ para $\delta^2\text{H}$, de 2019 a 2021, presentando una variación de -9,9 ‰ a -9,3 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -77,4 ‰ a -75,4 ‰ para $\delta^2\text{H}$. Y de igual manera, en el subdominio fracturado (manantial LCV-2), se evidencia enriquecimiento isotópico de 0,3 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ y de 1,4 ‰ para $\delta^2\text{H}$, de 2019 a 2021, presentando una variación de -12,4 ‰ a -12,1 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -94,8 ‰ a -93,4 ‰ para $\delta^2\text{H}$ (Fig. 2.5; Mapa N°3; Mapa N°4).

Tabla 2.1 Datos científicos de isótopos estables/ inestables e información hidroquímica generada en el marco del Proyecto BOL 7005 durante la misión científica de campo 2019. Se incluye información científica adicional de Chaffaut (1998), Houston (2007), Figueroa (2018), y Valdivieso et al. (2022) (ABEN, 2022).

#	Código	Fuente	Tipo	Dominio	Fecha	X UTM (m)	Y UTM (m)	Altitud (m s.n.m) SRTM	Prof. del Pozo (m)	Nivel Estático (m)	T °C	TDS mg/L	EC µS/cm	pH	Eh (mV)	OD (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Mn (mg/L)	B (mg/L)	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	³ H (UT)	
Misión Científica de Campo 2019																															
1	LCV-1	Manantial	Superficial	Poroso	30/4/2019	623159	7547763	4299	n.a.	n.a.	21,3	240,0	482,0	7,8	172,8	1,6	253,8	79,6	10,1	6,2	3,3	253,8	0,9	84,4	29,2	< 0,04	1,1	-12,5	-95,0	0,2	
2	LCV-2	Manantial	Superficial	Poroso	30/4/2019	623375	7547796	4300	n.a.	n.a.	21,5	200,0	398,0	7,8	95,6	1,6	214,7	63,6	9,2	6,0	3,0	214,7	0,8	60,1	28,3	< 0,04	1,0	-12,4	-94,8	0,3	
3	LCV-3	Manantial	Superficial	Fracturado	30/4/2019	630464	7547728	4352	n.a.	n.a.	21,5	184,0	369,0	7,9	26,1	1,6	201,7	58,6	8,6	5,7	3,0	201,7	0,7	61,1	25,2	< 0,04	1,9	-12,4	-94,8	<0.11	
4	LCV-4	Manantial	Superficial	Poroso	30/4/2019	632312	7546953	4343	n.a.	n.a.	21,9	194,0	388,0	7,9	25,1	1,6	240,7	64,6	8,6	6,5	3,2	240,7	0,4	60,0	27,4	< 0,04	1,5	-12,6	-95,1	<0.24	
5	P4-1	Pozo	Subterránea	Poroso	1/5/2019	629007	7539651	4295	6,95	1,6	12,3	355,0	710,0	8,5	104,5	1,3	169,2	138,1	16,6	9,8	1,8	169,2	1,5	121,5	43,1	< 0,04	4,4	--	--	--	
6	P5-1	Pozo	Subterránea	Poroso	1/5/2019	630619	7542546	4291	7,48	0,6	16,8	200,0	399,0	7,5	85,1	1,7	156,2	49,0	5,1	13,0	6,2	156,2	1,1	57,6	24,6	< 0,04	5,5	-12,8	-97,7	<0.11	
7	P6-1	Pozo	Subterránea	Poroso	1/5/2019	630240	7545162	4295	8,76	1,2	8,6	251,0	501,0	8,0	55,3	1,9	244,0	65,5	5,2	17,7	8,6	244,0	1,0	30,5	55,9	< 0,04	1,7	-10,8	-88,7	0,4	
8	P2-1	Pozo	Subterránea	Poroso	1/5/2019	622648	7542542	4295	4,2	1,25	18,6	755,0	1510,0	8,0	47,7	1,6	224,5	253,2	29,6	25,3	14,3	224,5	3,6	305,4	106,0	< 0,04	2,2	-10,2	-75,5	<0.13	
9	P3-1	Pozo	Subterránea	Poroso	1/5/2019	625720	7541461	4295	7,57	1,2	14,8	540,0	1080,0	8,0	66,4	1,6	175,7	146,1	23,6	29,6	15,8	175,7	3,9	156,5	98,3	< 0,04	2,6	-10,0	-77,4	0,4	
10	P1-1	Pozo	Subterránea	Poroso	1/5/2019	622790	7547914	4294	4	0,57	10,1	273,0	545,0	7,8	78,7	1,9	273,3	55,6	14,8	12,4	7,3	273,3	1,3	92,8	37,4	< 0,04	0,2	-11,1	-92,1	<0.21	
11	LCV-5	Río	Superficial	-	1/5/2019	n.a.	n.a.	0	n.a.	n.a.	11,3	65,0	130,0	8,2	36,1	2,4	165,9	11,0	1,1	3,9	3,6	165,9	0,3	2,4	15,7	< 0,04	< 0,10	-13,0	-97,5	<0.13	
12	KPV6	Manantial	Subterránea	Fracturado	2/5/2019	643652	7559004	4477	n.a.	n.a.	3,3	83,0	166,0	8,0	33,0	3,2	263,5	11,6	4,8	8,9	2,6	263,5	0,1	10,4	17,8	< 0,04	0,3	-11,6	-97,3	<0.36	
13	M2	Río	Superficial	Fracturado	2/5/2019	629772	7588888	4555	n.a.	n.a.	9,7	23,0	47,0	8,2	53,0	2,7	224,5	4,2	2,1	3,4	1,3	224,5	0,5	1,2	3,7	< 0,04	0,7	-14,5	-105,7	<0.2	
Otra información disponible - Figueroa (2018).																															
14	SM-1	Pozo Geotérmico	Subterránea	Fracturado	1/1/2013	628746	7518887	4861	1114	n.a.	260	n.a.	n.a.	7	n.a.	n.a.	n.a.	3281	569	166	0,03	177,5	n.a.	5786	22,14	n.a.	n.a.	-7,3	-83,8	n.a.	
15	SM-2	Pozo Geotérmico	Subterránea	Fracturado	25/4/2013	627895	7519430	4909	1264	n.a.	258	n.a.	n.a.	7,1	n.a.	n.a.	n.a.	3208	548	151	0,02	217,1	n.a.	5583	22,72	n.a.	n.a.	-7,4	-84,4	n.a.	
16	SM-3	Pozo Geotérmico	Subterránea	Fracturado	23/2/2013	628597	7519539	4890	n.a.	n.a.	255	n.a.	590	4,3	n.a.	n.a.	n.a.	3346	559	170	0,08	158,8	n.a.	5822	23,68	n.a.	n.a.	-9	-89,5	n.a.	
Otra información disponible - Chaffaut (1998).																															
17	GR1	Glaciar de roca	Glaciar de roca	Fracturado	15/2/1996	605400,5	7549200,7	4809	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-4,21	-24,8	n.a.
18	GR2	Glaciar de roca	Glaciar de roca Caquella	Fracturado	27/7/1996	611845	7622681,6	5397	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-11,04	-81,4	n.a.
Otra información disponible - Valdivieso (2022) - Houston (2007)																															
19	TATIO	Precipitación	Precipitación	Fracturado	2019 - 2021	605400,5	7549200,7	4310																5				-6,6	-35,69	2,6	

LD Límite Detectable
 n.a. Dato no disponible o no analizado

Tabla 2.2 Datos científicos de isótopos estables/ inestables e información hidroquímica generada por la ABEN, en el marco del Proyecto BOL 7005, durante la misión científica de campo 2021. Se incluye información científica adicional de Chaffaut (1998), Houston (2007), Figueroa (2018), y Valdivieso et al. (2022) (ABEN, 2022).

#	Código	Fuente	Tipo	Dominio	Date	X UTM (m)	Y UTM (m)	Altitud (m s.n.m) SRTM	Prof. del Pozo (m)	Nivel Estático (m)	T °C	EC µS/cm	pH	Eh (mV)	OD (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	²²² Rn Mean C _{Rn} (Bq·m ⁻³)	S.D. C _{Rn} (Bq·m ⁻³)	²²² Rn Mean CORRECTED C _{Rn} (kBq·m ⁻³)	δ ¹³ C ‰	Error ±1 Sigma	¹⁴ C p MC	Error ±1 Sigma			
Misión Científica de Campo 2021																																
1	M-153-B	Manantial	Superficial	Fracturado	16/8/2021	621974	7562215	4807	n.a.	n.a.	1,4	87,0	7,4	123,6	6,5	8,8	10,7	1,2	1,0	12,4	-12,3	-96,8	17000,0	1930,0	17,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
2	LC-V 4M	Río	Superficial	Poroso	16/8/2021	632382	7547011	4345	n.a.	n.a.	8,7	160,0	8,3	142,2	7,5	34,6	42,2	0,3	2,6	22,0	-12,3	-94,3	8000,0	995,0	8,4	-10,0	0,2	68,7	0,2			
3	LC-V3-A	Río	Superficial	Fracturado	16/8/2021	630557	7547287	4317	n.a.	n.a.	9,8	135,0	8,5	130,8	6,9	19,2	23,4	0,1	4,0	19,9	-12,1	-89,8	7020,0	1590,0	7,4	n.a	n.a	n.a	n.a			
4	M-147-A	Manantial	Superficial	Poroso	17/8/2021	624001	7547935	4297	n.a.	n.a.	8,4	589,0	8,4	106,4	7,1	33,3	40,7	0,4	125,6	45,8	-12,5	-94,6	6020,0	753,0	6,4	-8,6	0,2	46,6	0,2			
5	M-147-b	Manantial	Superficial	Poroso	17/8/2021	624028	7547861	4296	n.a.	n.a.	14,6	654,0	8,8	82,6	6,9	34,6	42,2	0,6	173,8	67,1	-12,0	-93,1	7350,0	988,0	7,8	-8,0	0,2	50,5	0,2			
6	L-CV2-A	Manantial	Superficial	Poroso	17/8/2021	623424	7547842	4301	n.a.	n.a.	21,8	383,0	8,1	108,2	4,9	55,8	68,1	1,0	55,9	35,0	-12,1	-93,4	47000,0	3380,0	50,8	-7,9	0,2	26,0	0,1			
7	LC-V5M	Manantial	Superficial	Poroso	17/8/2021	623160	7547765	4300	n.a.	n.a.	21,1	495,0	7,8	75,4	4,7	55,4	67,6	1,2	82,9	44,8	-11,8	-92,2	36000,0	2180,0	38,1	-7,8	0,2	22,7	0,1			
8	LCVMIRADOR	Manantial	Superficial	Poroso	17/8/2021	623921	7543096	4295	n.a.	n.a.	29,2	1448,0	7,3	60,0	3,4	150,0	183,0	1,1	276,7	146,9	-9,9	-74,3	21000,0	2040,0	21,9	-6,0	0,2	8,1	0,1			
9	LC-MIRADOR	Laguna	Superficial	Poroso	17/8/2021	623979	7543077	4288	n.a.	n.a.	11,0	123000,0	8,8	-15,7	6,0	ND	n.a	<LD	50234,0	22847,6	-1,5	-35,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
10	M147LC	Laguna	Superficial	Poroso	17/8/2021	621103	7543899	4293	n.a.	n.a.	5,5	123600,0	8,7	15,7	7,3	ND	n.a	<LD	53744,0	12573,6	-1,6	-35,1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
11	VCH-1	Manantial	Superficial	Fracturado	18/8/2021	642470	7511802	4395	n.a.	n.a.	17,9	738,0	8,0	41,5	5,5	20,4	24,9	1,5	170,8	55,5	-8,4	-71,9	21000,0	1790,0	22,5	-7,7	0,2	57,2	0,2			
12	V-PQ-1	Manantial	Superficial	Fracturado	18/8/2021	638972	7507156	4398	n.a.	n.a.	39,7	1276,0	7,7	55,9	3,4	90,8	110,8	<LD	182,4	251,0	-10,5	-86,0	22000,0	1680,0	23,5	-7,3	0,2	7,3	0,1			
13	V-AP-1	Río	Superficial	Fracturado	18/8/2021	620216	7514999	4771	n.a.	n.a.	8,8	12070,0	6,9	103,1	6,0	18,5	22,6	<LD	4084,2	418,2	-11,1	-90,5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
14	V-AP-2	Manantial	Superficial	Fracturado	18/8/2021	620252	7515034	4776	n.a.	n.a.	17,9	868,0	7,7	93,2	4,9	36,7	44,7	2,4	190,2	112,3	-10,0	-75,7	16000,0	2800,0	17,1	-7,1	0,2	27,6	0,1			
15	R-HJ	Río	Superficial	Poroso	18/8/2021	621800	7537011	4368	n.a.	n.a.	3,8	508,0	8,5	57,6	7,4	181,3	221,1	<LD	2,3	93,5	-9,5	-67,7	12000,0	795,0	12,5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
16	R-HJ-2	Río	Superficial	Fracturado	18/8/2021	617993	7539425	4518	n.a.	n.a.	0,5	155,0	8,5	52,8	7,4	34,6	42,2	<LD	0,2	93,5	-10,7	-75,4	22000,0	1160,0	22,6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
17	V-LC-3	Manantial	Superficial	Poroso	19/8/2021	621930	7547438	4294	n.a.	n.a.	18,6	972,0	7,9	62,5	5,0	34,9	40,2	1,3	207,4	122,1	-11,0	-84,7	10000,0	874,0	10,8	-8,3	0,2	49,3	0,2			
18	P3-1	Pozo	Subterránea	Poroso	19/8/2021	625719	7541459	4295	7,8	1,2	10,4	1041,0	7,6	132,8	4,0	145,0	176,9	3,5	151,8	133,2	-9,3	-75,4	11000,0	1160,0	11,8	-5,4	0,2	16,5	0,1			
19	P4-1	Pozo	Subterránea	Poroso	19/8/2021	629007	7539649	4295	7,7	1,6	9,7	760,0	8,3	96,7	3,5	108,3	132,2	4,8	114,6	76,0	-10,6	-91,1	11000,0	1100,0	11,9	-4,4	0,2	50,8	0,2			
20	P5-1	Pozo	Subterránea	Poroso	19/8/2021	630620	7542545	4291	8,5	1,0	16,3	411,0	7,3	124,1	5,0	55,0	67,1	1,2	61,9	40,2	-12,9	-97,3	11000,0	1000,0	11,9	-7,6	0,2	49,4	0,2			
21	M-118-A	Manantial	Superficial	Fracturado	19/8/2021	636812	7547924	4526	n.a.	n.a.	16,2	142,0	7,9	91,7	5,3	30,4	37,1	2,1	3,0	22,7	-13,0	-97,2	10000,0	705,0	10,8	-9,7	0,2	37,5	0,2			
22	M-115-A	Manantial	Superficial	Fracturado	19/8/2021	635286	7555495	4629	n.a.	n.a.	0,0	214,0	7,9	94,8	8,1	46,7	56,9	<LD	5,4	35,5	-12,4	-93,8	10000,0	1160,0	10,8	-9,9	0,2	98,2	0,3			
23	M-119-A	Manantial	Superficial	Fracturado	19/8/2021	631799	7547807	4378	n.a.	n.a.	2,7	302,0	8,0	66,8	7,4	39,2	47,8	<LD	6,4	84,9	-10,4	-84,6	10000,0	904,0	10,8	-8,9	0,2	100,0	0,3			
24	NR1-A	Río	Superficial	Fracturado	19/8/2021	614122	7555730	4671	n.a.	n.a.	5,3	118,0	7,8	46,0	6,3	18,3	22,4	0,1	2,8	177,6	-11,2	-88,7	9410,0	799,0	10,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		
25	M-141-A	Manantial	Superficial	Poroso	19/8/2021	621909	7547367	4293	n.a.	n.a.	17,9	991,0	8,1	20,5	5,1	30,8	37,6	1,6	211,6	124,2	-11,4	-85,2	9240,0	927,0	9,8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		

Continuación Tabla 2.2

#	Código	Fuente	Tipo	Dominio	Date	X UTM (m)	Y UTM (m)	Altitud (m s.n.m) SRTM	Prof. del Pozo (m)	T °C	EC μS/cm	pH	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Cl- (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	SiO ₂ (ppm)	B (ppm)	F (ppm)	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	³H ‰	Exceso δ ² H ‰	Cl mg l ⁻¹
Otra información disponible - Figueroa (2018).																											
26	SM-1	Pozo Geotérmico	Subterránea	Fracturado	1/1/2013	628746	7518887	4861	114	260	n.a.	7	3281	569	166	0,03	177,5	5786	22,14	633,5	131	3,07	-7,3	-83,8	n.a.	n.a	n.a
27	SM-2	Pozo Geotérmico	Subterránea	Fracturado	25/4/2013	627895	7519430	4909	1264	258	n.a.	7,1	3208	548	151	0,02	217,1	5583	22,72	1406	127	3,2	-7,4	-84,4	n.a.	n.a	n.a
28	SM-3	Pozo Geotérmico	Subterránea	Fracturado	23/2/2013	628597	7519539	4890		255	590	4,3	3346	559	170	0,08	158,8	5822	23,68	480,5	122	3,13	-9	-89,5	n.a.	n.a	n.a
Otra información disponible - Chaffaut (1998).																											
29	GR1	Glaciar de roca	Superficial	Fracturado	15/2/1996	605401	7549201	4809		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-4,21	-24,8	n.a.	n.a	n.a
30	GR2	Glaciar de roca Caquilla	Superficial	Fracturado	27/7/1996	611845	7622682	5397		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-11,04	-81,4	n.a.	n.a	n.a
Otra información disponible - Valdivieso (2022) - Houston (2007).																											
31	TATIO	Precipitación	Precipitación	Fracturado	2019 - 2021	6054005	7549200,7	4310		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-6,6	-35,69	2,6	16,13	5

n.a. Dato no disponible o no analizado.

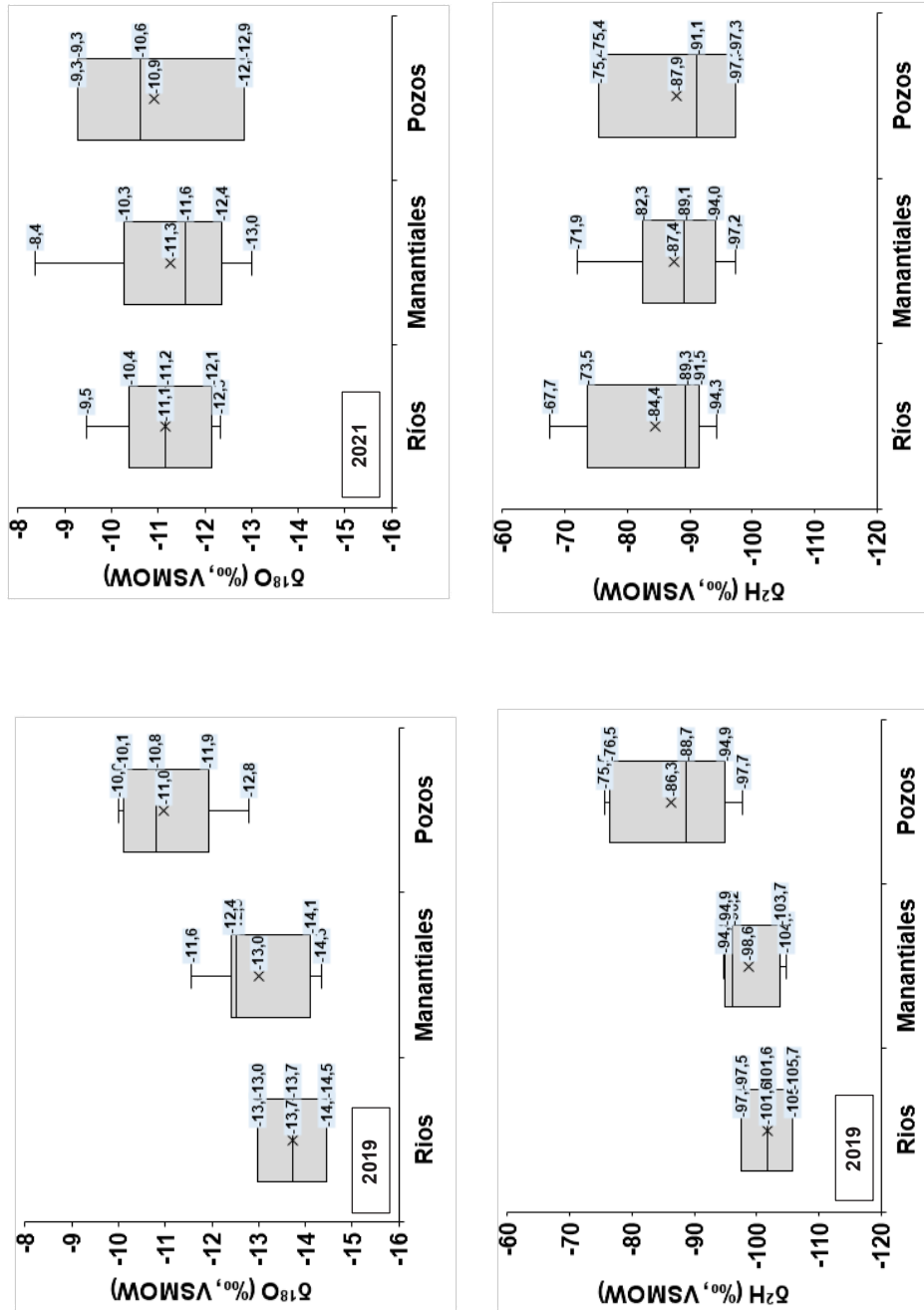


Figura 2.5 Diagramas de caja de las composiciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales), y correspondiente a fuentes de agua superficial (ríos); a) al final de la época lluviosa de 2019, y b) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).

Por otra parte, las fuentes de agua superficial en la zona piloto de la Laguna Colorada correspondiente a ríos mostraron una variación de -14,4 ‰ a -12,9 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -97,2 ‰ a -71,9 ‰ para $\delta^2\text{H}$ en 2019. Y de -12,3 ‰ a -9,5 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -94,3 ‰ a -67,7 ‰ para $\delta^2\text{H}$ en 2021 (Fig. 2.5; Tabla 2.1, 2.2).

Las fuentes de agua superficial correspondiente a lagunas (Laguna Colorada) presentaron composiciones isotópicamente enriquecidas para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, presentando valores de -1,5 ‰ y -35,0 ‰, respectivamente, en 2021 (Tabla 2.1, 2.2).

En el diagrama de las composiciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 2.6 a, b) es posible evidenciar que, en general, las aguas subterráneas en la zona piloto de la Laguna Colorada no siguen una tendencia a lo largo de la LMWL ni de la GMWL lo cual indica que la precipitación moderna presenta una mínima influencia o ninguna en la recarga del sistema acuífero, sugiriendo que la misma se dio bajo un régimen climático diferente.

Asimismo, en la Fig. 2.6(a,b) se evidencia que las aguas subterráneas alojadas en el subdominio poroso de materiales no consolidados (símbolos azules), así como las manifestaciones hidrotermales del subdominio fracturado (símbolos verdes) reflejan fraccionamiento secundario por evaporación. Esto se observa en las muestras que siguen la tendencia de la 'línea de evaporación' presentando enriquecimiento isotópico con una pendiente de $s = 5,5$ a $5,6$; valores propios de una superficie de agua en contacto con la atmósfera (Clark and Fritz, 1997).

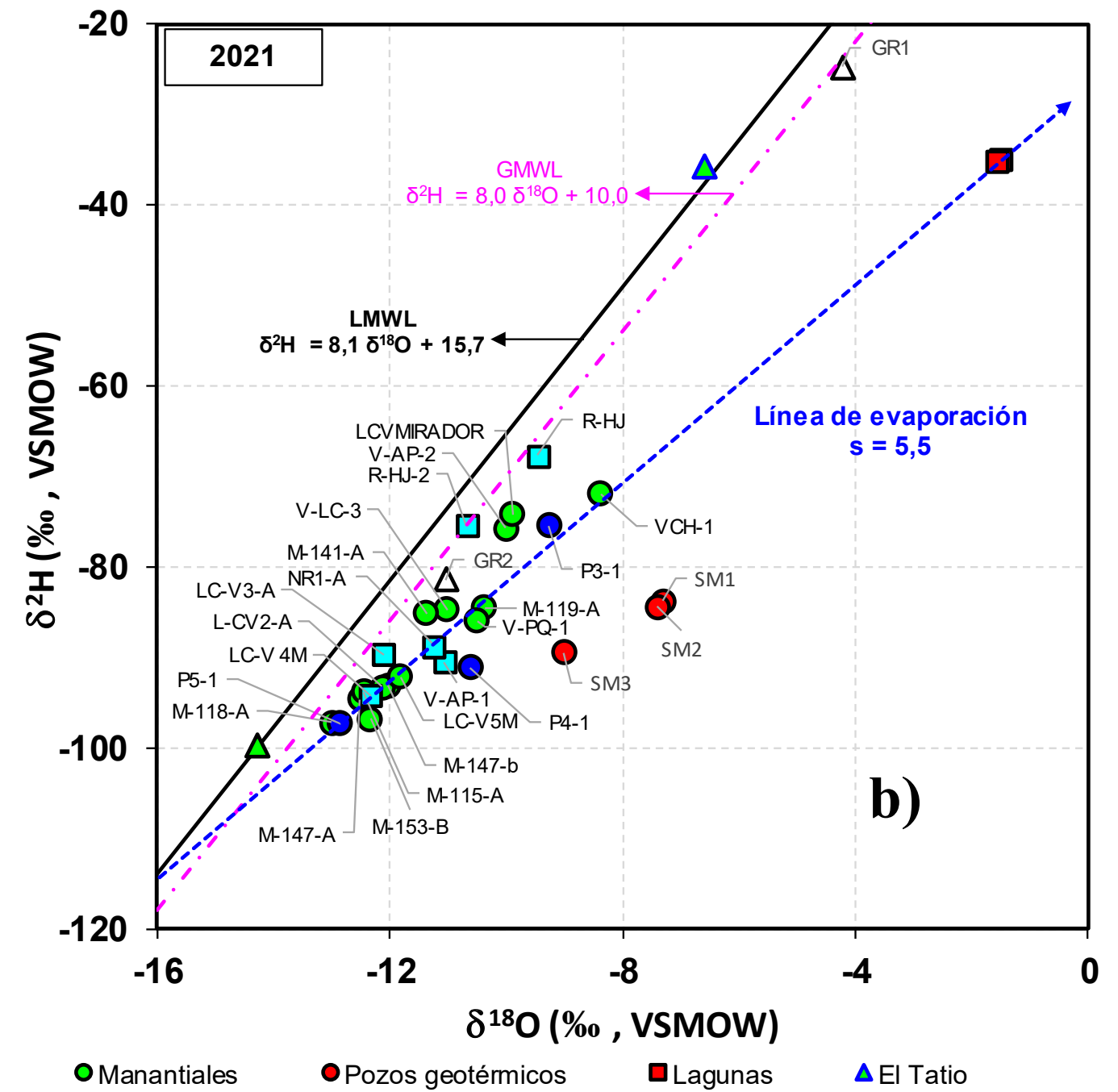
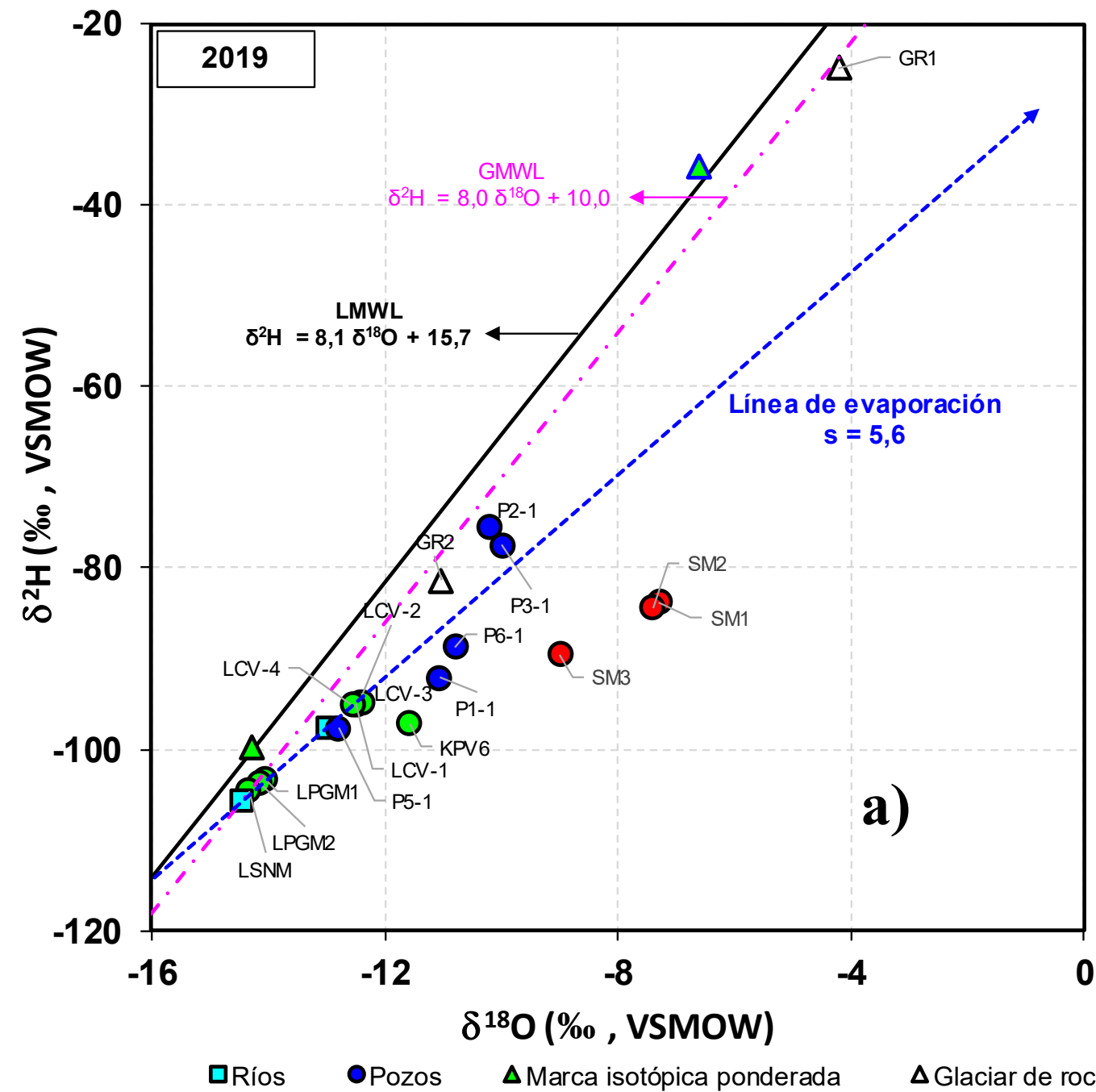
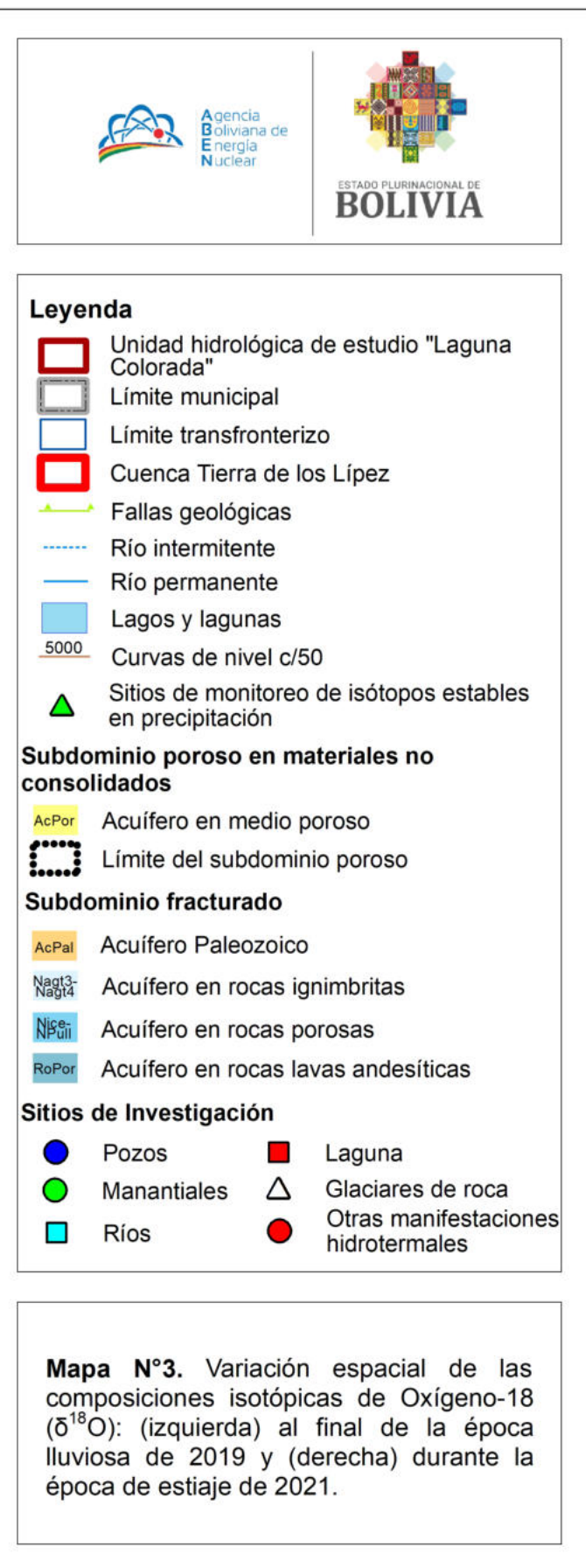
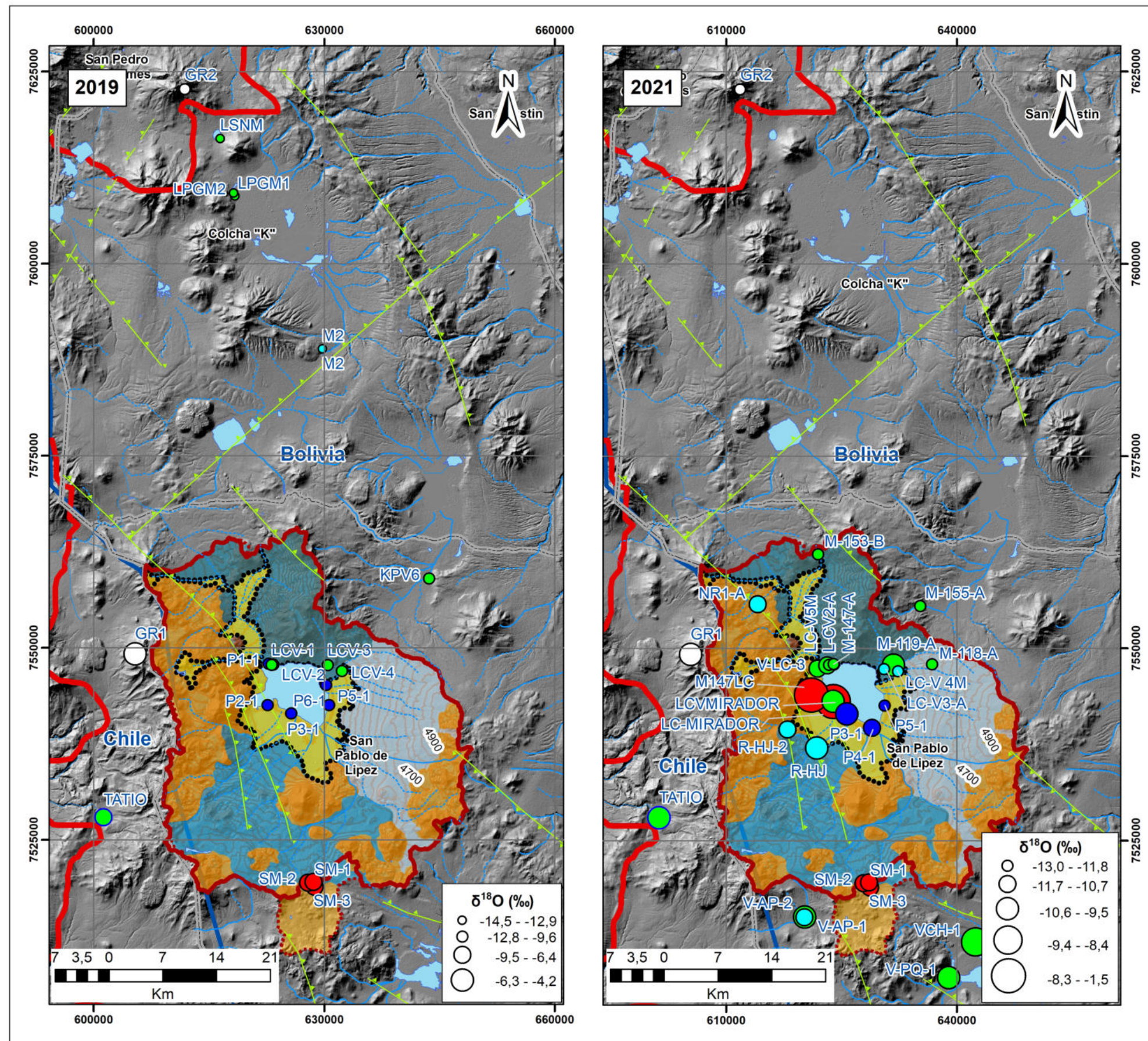
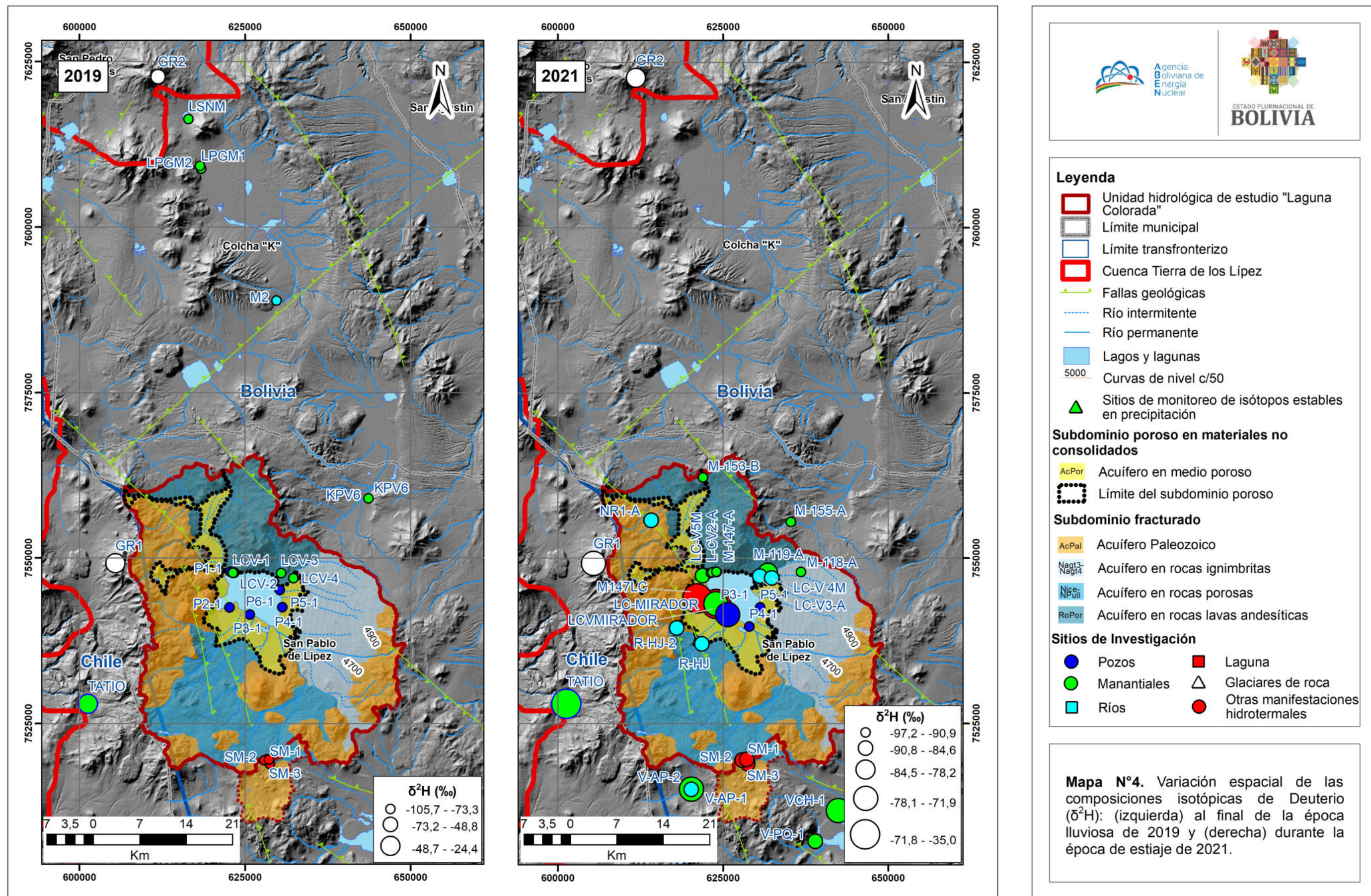


Figura 2.6 Diagramas de las composiciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^1\text{O}$ de fuentes de agua subterránea en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas): a) al final de la época lluviosa de 2019, y b) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).





En la Fig. 2.7 (a, b, c, d) se presentan diagramas de altitud vs. las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, para los datos generados al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021.

Las firmas isotópicas de la precipitación de El Tatio (triángulo verde con línea exterior azul) y del Glaciar de Roca Caquella (triángulo blanco, GR2) coadyuvaron en la determinación de la altitud de recarga del sistema acuífero, en el subdominio poroso y en el subdominio fracturado (Fig. 2.7 a, b, c, d).

Los resultados evidencian que la altitud de recarga de las aguas subterráneas del sistema acuífero, se encuentra entre los 4.700 y 6.000 m s.n.m. Esta altitud corresponde a la cadena montañosa de la Cordillera Occidental que encierra a la unidad hidrológica de la 'Laguna Colorada'.

Asimismo, se observó que las composiciones isotópicas de la precipitación experimentaron empobrecimiento isotópico del orden de 0,4 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de 0,4 ‰ $\delta^2\text{H}$ por cada 100 m de incremento en la altitud (Fig. 2.7 a, b, c, d).

Estos valores concuerdan con los valores reportados por Clark (2015), verificándose que, a elevadas altitudes, donde el promedio de la temperatura es baja, la precipitación es isotópicamente empobrecida.



Misión Científica de Campo 2021, liderada por
Investigadores de la ABEN
'Zona Piloto Laguna Colorada'.

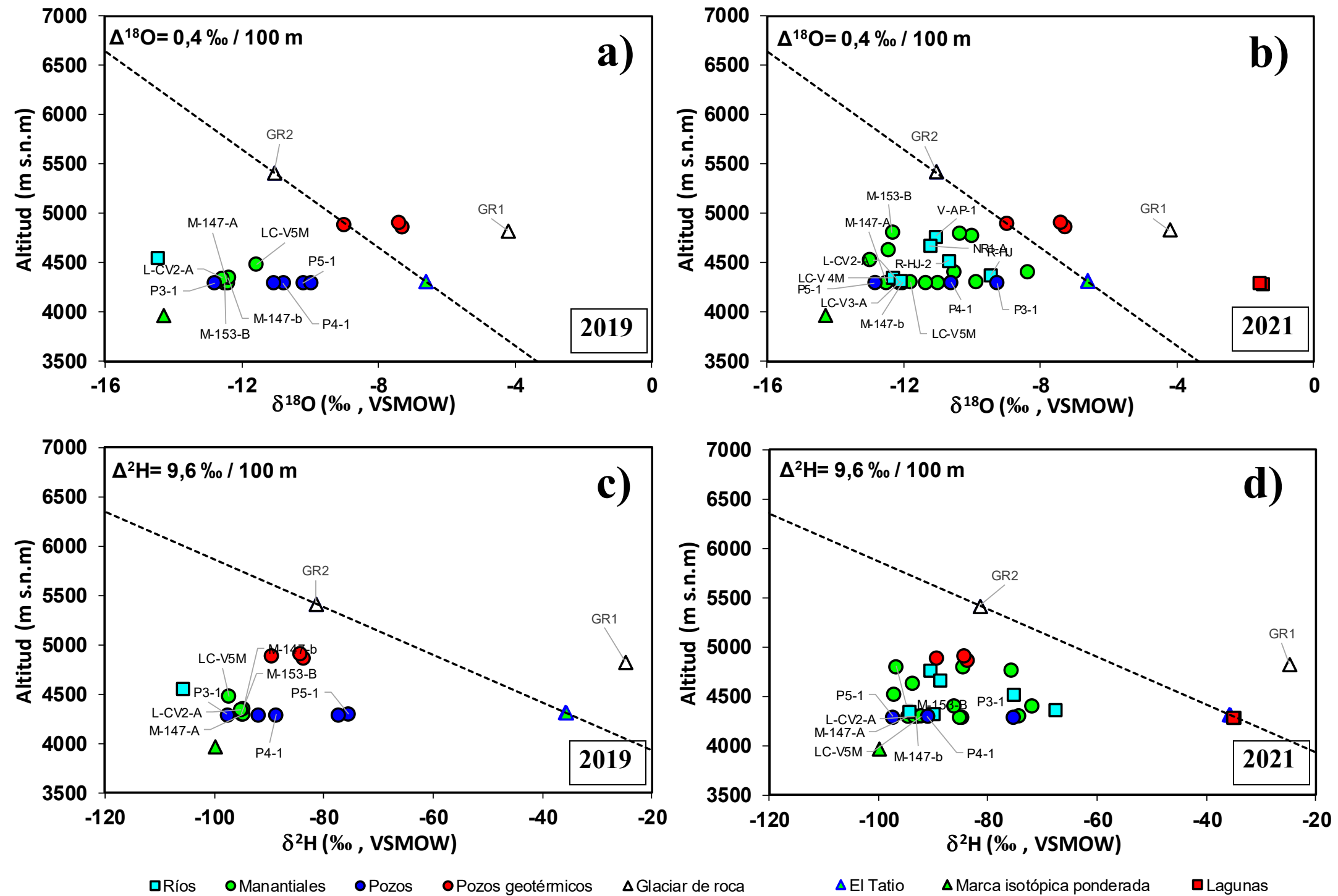


Figura 2.7 Diagramas de altitud vs. las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ (a y b) y $\delta^2\text{H}$ (c y d) de fuentes de agua subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), del subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas): al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).

Por otro lado, en la Fig. 2.8 (a, b, c, d) se presentan diagramas de exceso de deuterio (D_{exceso}) vs. las composiciones isotópicas de Oxígeno-18 y Deuterio, al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021.

En esta figura se observa que las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado presentan valores de exceso de Deuterio (D_{exceso}) menores a 10‰. Y una tendencia de enriquecimiento isotópico, lo cual evidencia que la recarga de las aguas subterráneas experimentó una fuerte evaporación durante su caída o en la superficie. Asimismo, los valores de D_{exceso} más bajos (entre +5 a -23 ‰) son isotópicamente más enriquecidos, registrando un efecto de evaporación aún mayor, y generalmente corresponden a fuentes de agua superficial (ríos, lagunas) y a aguas subterráneas someras (pozos).

Asimismo, en la Fig. 2.8 (a, b, c, d) se evidencia que los valores de exceso de deuterio vs. $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado presentan una relación con las composiciones isotópicas del Glaciar de Roca Caquella (GR2). Lo cual evidencia que la recarga de las aguas subterráneas del sistema acuífero presenta un aporte del hielo acumulado en las grietas de los glaciares de roca ubicados en la cadena montañosa de la Cordillera Occidental. Según Chaffaut (1998) el hielo acumulado en el Glaciar de Roca Caquella (GR2) experimentó procesos de evaporación y condensación durante un régimen climático sub-moderno.



Misión Científica de Campo 2021: recolección de muestras en la Laguna Colorada para el análisis de isótopos estables de Deuterio y Oxígeno-18.

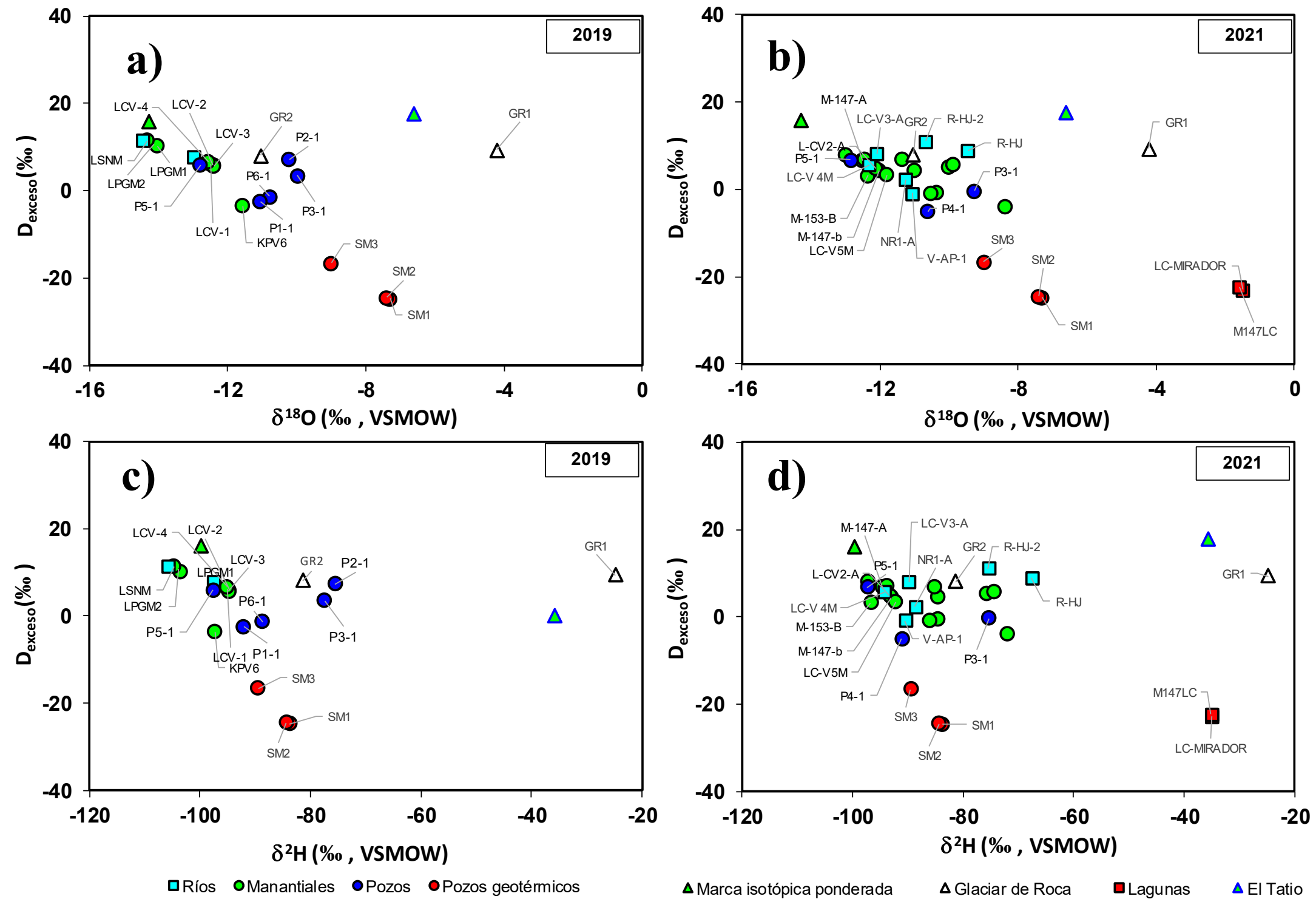


Figura 2.8 Diagramas de exceso de Deuterio vs. las composiciones isotópicas de $\delta^{18}O$ (a, b) y δ^2H (c, d) en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos, ríos, lagunas), y en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).

En relación, a los componentes del balance hídrico del sistema acuífero en el subdominio poroso, se evidenció que:

- La recarga media anual por precipitación, $Q_{recarga}$ (Fig.2.2;2.3) es de $7 \text{ a } 8 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$.
- Se presenta una pérdida por evaporación del 58% ($\% Q_{Evap.Asubt}$, Ec. 2.6). Es decir, sólo el 42% del volumen del reservorio de aguas subterráneas descarga hacia la Laguna Colorada y el resto se evapora. Para la determinación de la fracción de pérdida por evaporación, se consideró la firma isotópica de precipitación (intersección línea de evaporación con la LMWL Fig.2.6 a, b) con composiciones isotópicas de: -16,2 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -116 ‰ $\delta^2\text{H}$, Y la firma isotópica correspondiente a fuentes de agua superficial de la Laguna Colorada: -1,6‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -15,9 ‰ $\delta^2\text{H}$.

En referencia a los procesos hidrológicos de mezcla durante la recarga y flujo de aguas subterráneas se pudo evidenciar que:

- Al Sud-oeste del sistema acuífero, desde la zona de recarga y en la trayectoria de flujo de aguas subterráneas, tanto en el subdominio poroso como en el fracturado (Ec.2.4;2.5), se presenta una mezcla del: 39 al 76% de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca (f_{GR2}), 21 al 58% de aguas de precipitación de origen reciente ($f_{El\text{ Tatio}}$) y una mínima influencia, del 3 al 5% de fluidos geotermales (f_{SM-1}) (Fig. 2.9; Tabla 2.3).
- Al Nor-este y Nor-oeste de la zona de estudio, tanto en el subdominio poroso como en el fracturado, se presenta una mezcla del: 6 al 94% de aguas correspondientes a manifestaciones hidrotermales (f_{M-118A}), del 5 al 91% de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca (f_{GR2}), y una mínima influencia, del 1 al 4% de fluidos geotermales (f_{SM-1}) (1 al 4%) (Fig. 2.9; Tabla 2.3).

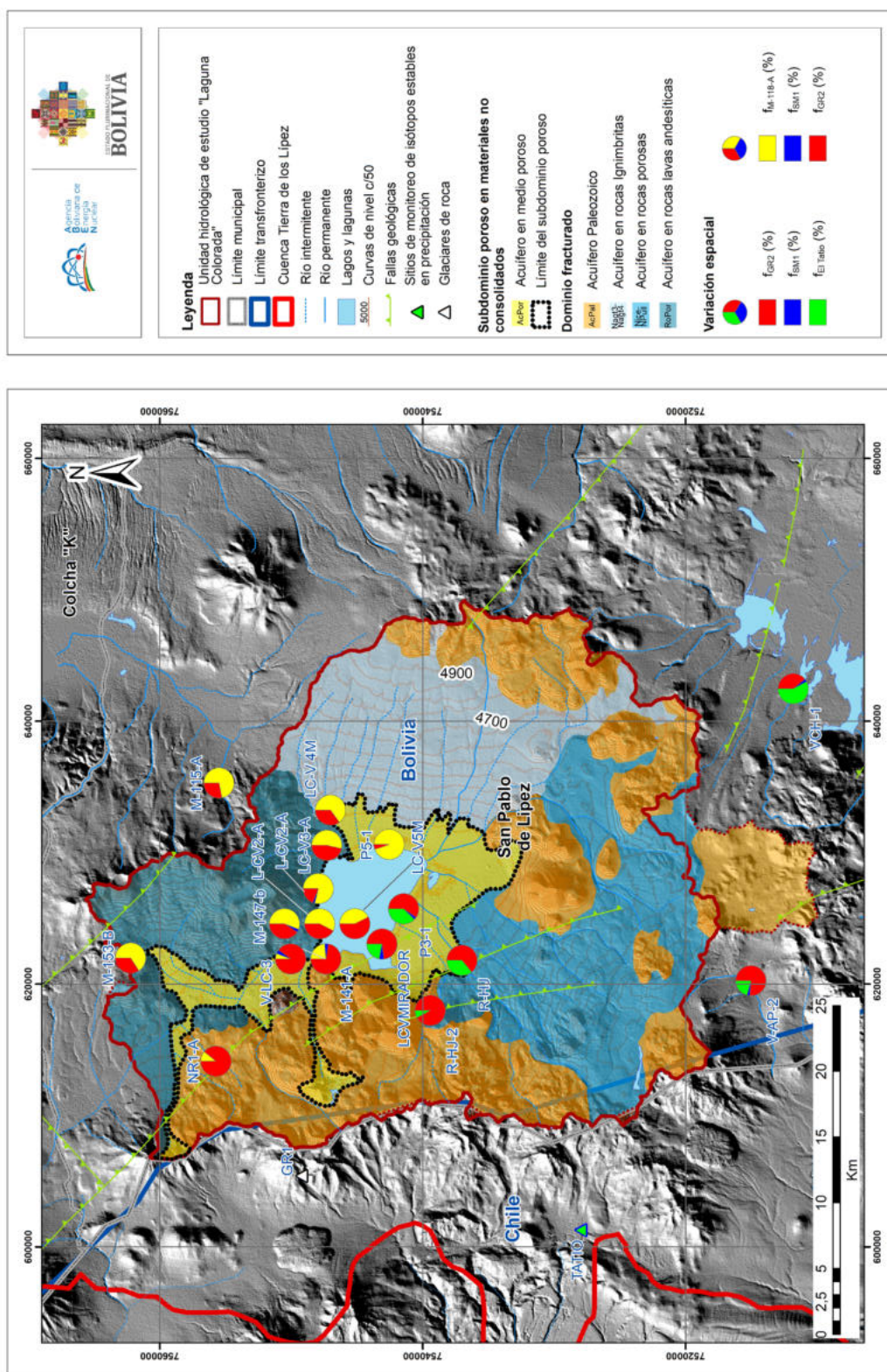


Figura 2.9 Variación espacial de las fracciones relativas de mezcla durante la recarga y flujo de aguas subterráneas en el sistema acuífero (ABEN, 2022).

Tabla 2.3 Resultados de la cuantificación de fracciones relativas para los modelos de balance isotópico de tres fuentes en base a las hipótesis planteadas en la sección 2.3.3.2.2 (ABEN, 2022).

Código	Tipo	f _{GR2} (%)	f _{SM1} (%)	f _{El Tatio} (%)	Código	Tipo	F _{M-118-A} (%)	f _{SM1} (%)	f _{GR2} (%)		
Hipótesis 1 (Sud-Oeste)					Hipótesis 2 (Nor-Este y Nor- Oeste)						
15	R-HJ	Río	64	0	36	2	LC-V 4M	Río	65	0	35
16	R-HJ-2	Río	92	0	8	3	LC-V3-A	Río	53	0	46
8	LCVMIRADOR	Manantial	73	5	22	24	NR1-A	Río	11	0	89
11	VCH-1	Manantial	39	3	58	1	M-153-B	Manantial	66	0	34
14	V-AP-2	Manantial	76	3	21	4	M-147-A	Manantial	79	2	19
18	P3-1	Pozo	60	3	38	5	M-147-b	Manantial	56	3	41
						6	L-CV2-A	Manantial	57	1	42
						7	LC-V5M	Manantial	42	1	57
						17	V-LC-3	Manantial	6	4	91
						22	M-115-A	Manantial	72	0	28
						25	M-141-A	Manantial	24	4	73
						20	P5-1	Pozo	94	1	5

2.4.2. Concentraciones de ²²²Rn en las aguas subterráneas del sistema acuífero

Las concentraciones de las actividades de ²²²Rn de las aguas subterráneas del sistema acuífero presentan valores de 11,9 kBq·m⁻³ en el subdominio poroso. Y de 6,4 a 38,1 kBq·m⁻³ en el subdominio fracturado (Mapa N°5; Fig. 2.10).

La evidencia científica sugiere que la fuente de Radón-222 de las aguas subterráneas del sistema acuífero está relacionada con el tipo de rocas volcánicas de la zona de estudio y la presencia de sistemas estructurales (Mapa N°5).

En efecto, los niveles de gas Radón-222 en los sedimentos del subdominio poroso (arenas, gravas y arcillas) y las concentraciones de Radón-222 presentes en el agua alojada en estos sedimentos, son una consecuencia de la generación de Radón producto de la desintegración radiactiva del Radio-226 (²²⁶Ra), su incorporación en el medio de flujo, y el transporte del fluido dentro del subdominio poroso y/o por el aporte de aguas del subdominio fracturado.

Las concentraciones de las actividades de ^{222}Rn detectadas en las aguas subterráneas del subdominio fracturado (manantiales) están relacionadas con las actividades de ^{226}Ra distribuidas, de manera preferencial, a lo largo del sistema estructural (fallas). Es importante considerar que en muchos ambientes hidrogeológicos se han reportado elevadas concentraciones de Radón-222, aún en presencia de rocas no enriquecidas en Uranio-238 o Radio-226 (Cook y Herczeg, 1999).

Por otro lado, las concentraciones de las actividades de ^{222}Rn correspondientes a las fuentes de agua superficial (ríos), de 7,4 a 22,6 $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Mapa N°5; Fig. 2.10) presentan valores similares a las aguas subterráneas del sistema acuífero, lo cual sugiere un aporte de las aguas subterráneas.

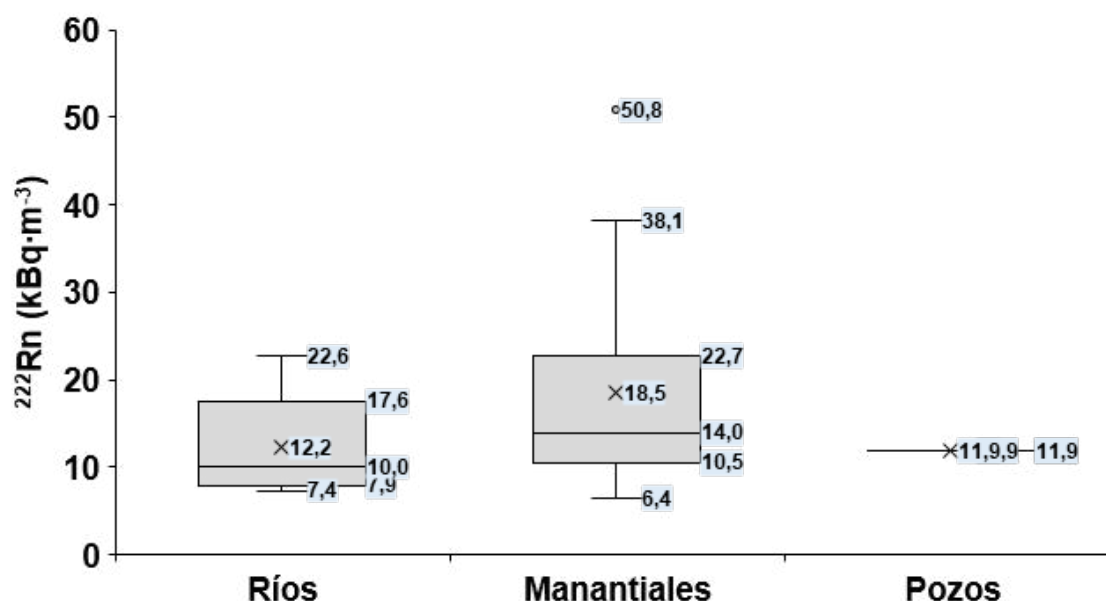


Figura 2.10 Diagramas de caja de las concentraciones de actividad de Radón-222 en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), y en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales), durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).

En la Fig. 2.11 (a,d) se presentan diagramas de la conductividad eléctrica (CE) y Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) vs. Radón-222 (^{222}Rn).

En esta figura se evidencia que la solubilidad del ^{222}Rn en las aguas subterráneas de los subdominios poroso y fracturado aumenta a medida que disminuye la salinidad (CE) (Fig. 2.11 a).

De igual manera, la solubilidad del ^{222}Rn en las aguas subterráneas del subdominio poroso aumenta a medida que disminuye la temperatura (Fig. 2.11 d).

Para estimar el flujo subterráneo en el subdominio poroso mediante la Ley de Darcy y Ec. 2.7 y 2.8 se asumieron valores de conductividad hidráulica horizontal (K_h) y porosidad efectiva (n) de la literatura (Kruseman & De Ridder, 1990). El gradiente hidráulico (i) fue estimado en base a las mediciones hidrogeológicas (Nivel estático, Tabla 2.2) realizadas en los piezómetros instalados alrededor de la Laguna Colorada.

Tabla 2.4 Estimación del flujo subterráneo en el subdominio poroso, Perfil E-O Mapa N°8, Fig. 2.15 (ABEN, 2022).

Subdominio	Área de la Sección Subdominio (Perfil E-O) (km ²)	Área geoespacial del Subdominio (km ²)	Área Sección Laguna Colorada (km ²)	K_h (m/s)	i	Porosidad efectiva (n)	q (m año ⁻¹)	v (m año ⁻¹)	Descarga hacia la Laguna Colorada Q (m ³ s ⁻¹)
Poroso (Arena media, grava y arcilla)	1,3	204,8	0,28	0,00009	0,0001	0,2	0,3	1,4	395.119
				0,0005	0,0001	0,2	1,6	7,9	2.195.108

De acuerdo a la Tabla 2.4, la descarga de aguas subterráneas del subdominio poroso hacia la Laguna Colorada varía entre 395.119 – 2.195.108 m³ · año⁻¹. Sin embargo, es importante destacar, conforme a lo determinado anteriormente que se presenta una pérdida por evaporación del 58% (% $Q_{Evap.Asubt}$, Ec. 2.6). Es decir, se estima que sólo 165.950 – 921.945 m³ · año⁻¹ de aguas subterráneas del subdominio poroso descarga hacia la Laguna Colorada y el resto se evapora.



Misión Científica de Campo 2021: Mediciones in-situ en un
piezómetro de monitoreo
'Zona Piloto Laguna Colorada'.

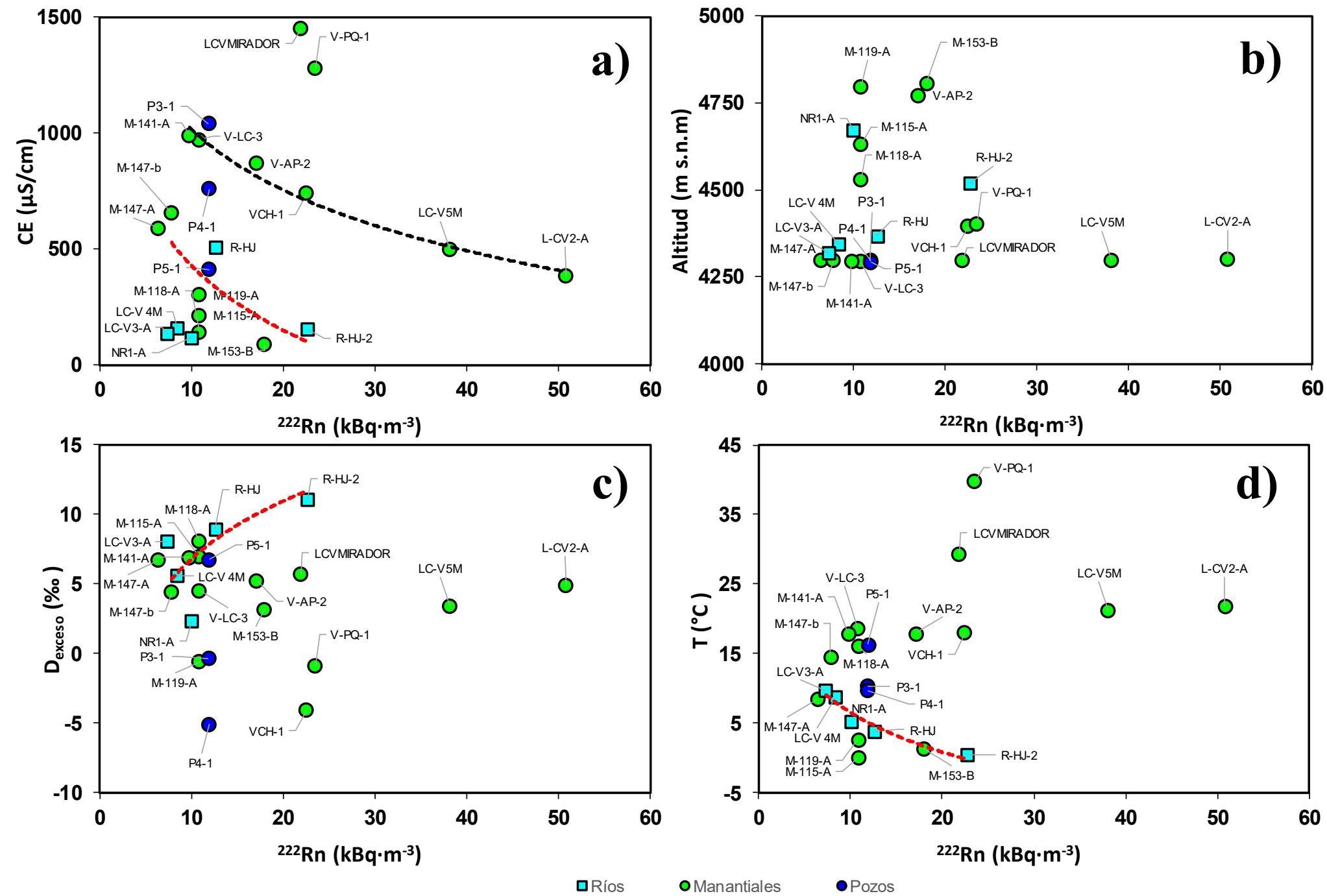
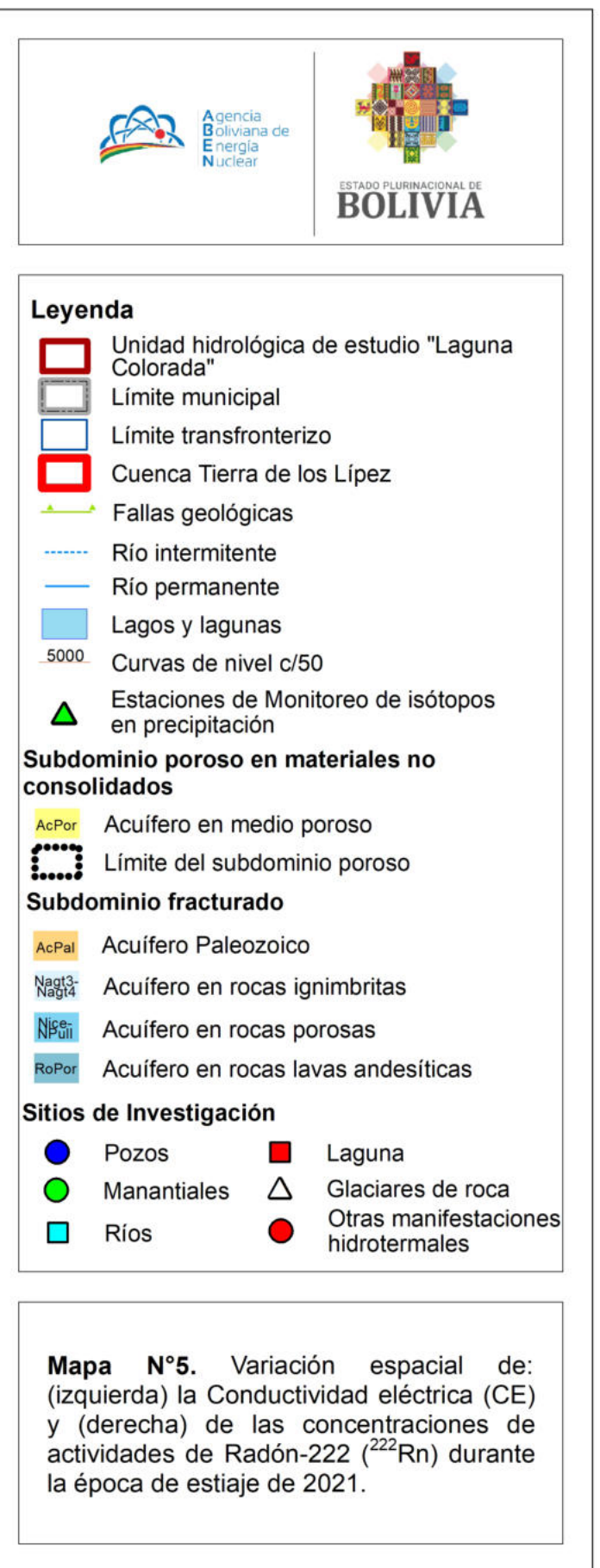
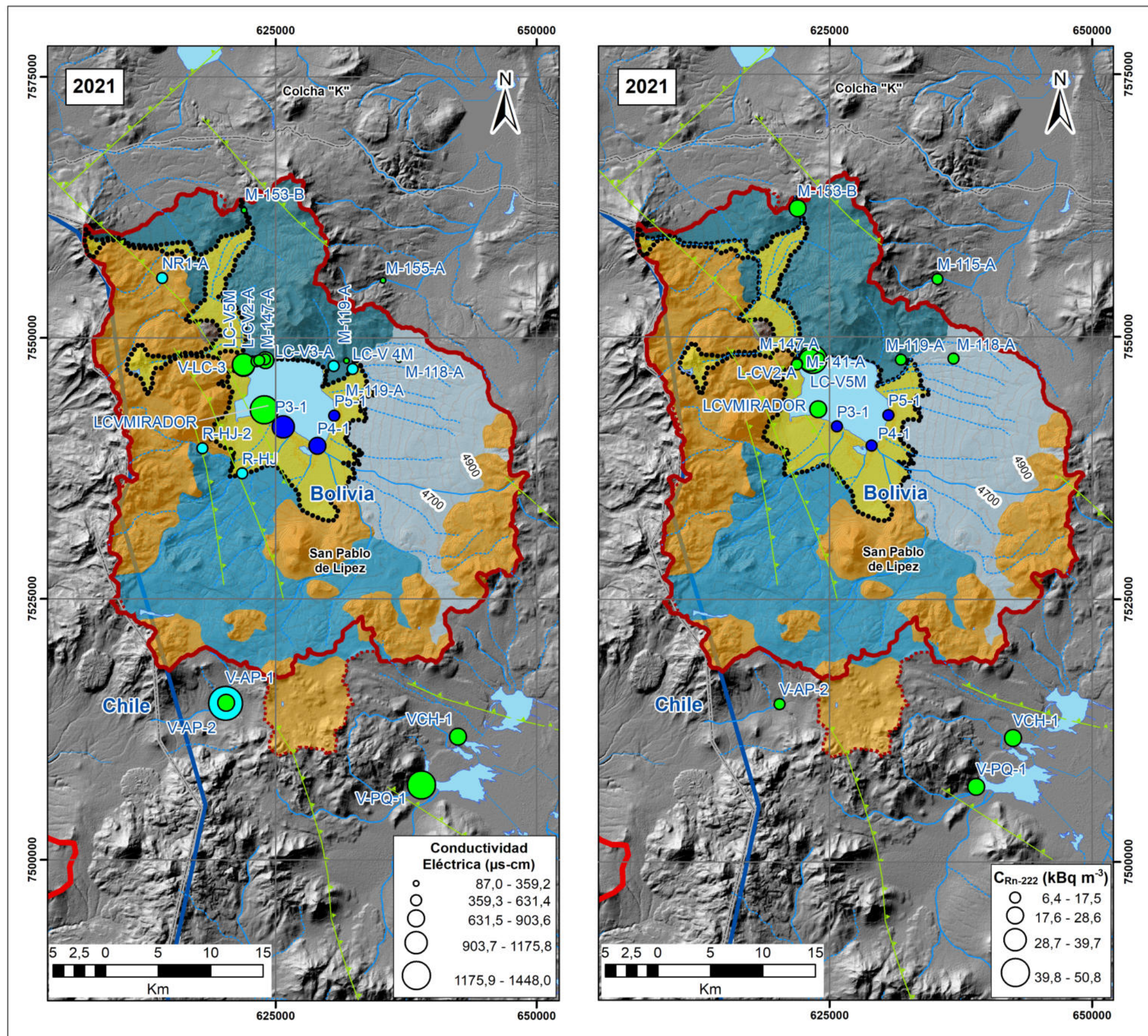


Figura 2.11 Diagramas de: a) conductividad eléctrica (CE) vs. Radón-222; b) altitud vs. Radón-222; c) exceso de deuterio (D_{exceso}) vs. Radón-222; d) Temperatura (T) vs. Radón-222, de fuentes de agua subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), del subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).



2.4.3. Concentraciones de ^3H en las aguas subterráneas del sistema acuífero

En relación a las hipótesis planteadas en la sección 2.3.3.3.1, la entrada de aguas de precipitación de origen reciente al sistema acuífero, presenta concentraciones de Tritio similares al valor reportado por Houston (2007) para la precipitación de la estación de El Tatio, de $2,60 \pm 0,30$ UT.

El valor de Tritio medido por Houston (2007) para la precipitación de El Tatio coincide con los valores de Tritio reportados en el Altiplano Norte para la estación de Laicacota (I.A.E.A/W.M.O, 2022). Las concentraciones de Tritio en la precipitación de la estación de Laicacota se encuentran en el rango de 2 UT para el agua recargada en 1996 y de 3 UT para el agua recargada en 2002.

Por otro lado, las concentraciones de Tritio en las aguas subterráneas del subdominio poroso presentan valores de 0,1 a 0,4 UT, mientras que, las aguas subterráneas del subdominio fracturado presentan valores similares, de 0,1 a 0,36 UT (Fig. 2.12 a; Figura 2.13 a, c; Tabla 2.1, 2.2; Mapa N°6). Lo cual evidencia que las aguas subterráneas libres de Tritio, según las hipótesis planteadas, presentan un efecto paleoclimático (símbolos verdes y azules trazados por debajo de la línea local de aguas meteóricas – LMWL (Fig. 2.6).

La evidencia científica de Tritio, correspondiente a fuentes de agua subterránea localizadas en la parte baja de la unidad hidrológica de la Laguna Colorada (Mapa N°6), sugiere que la recarga de las aguas subterráneas tanto en el subdominio poroso como en el subdominio fracturado se dio bajo un régimen climático diferente al actual.

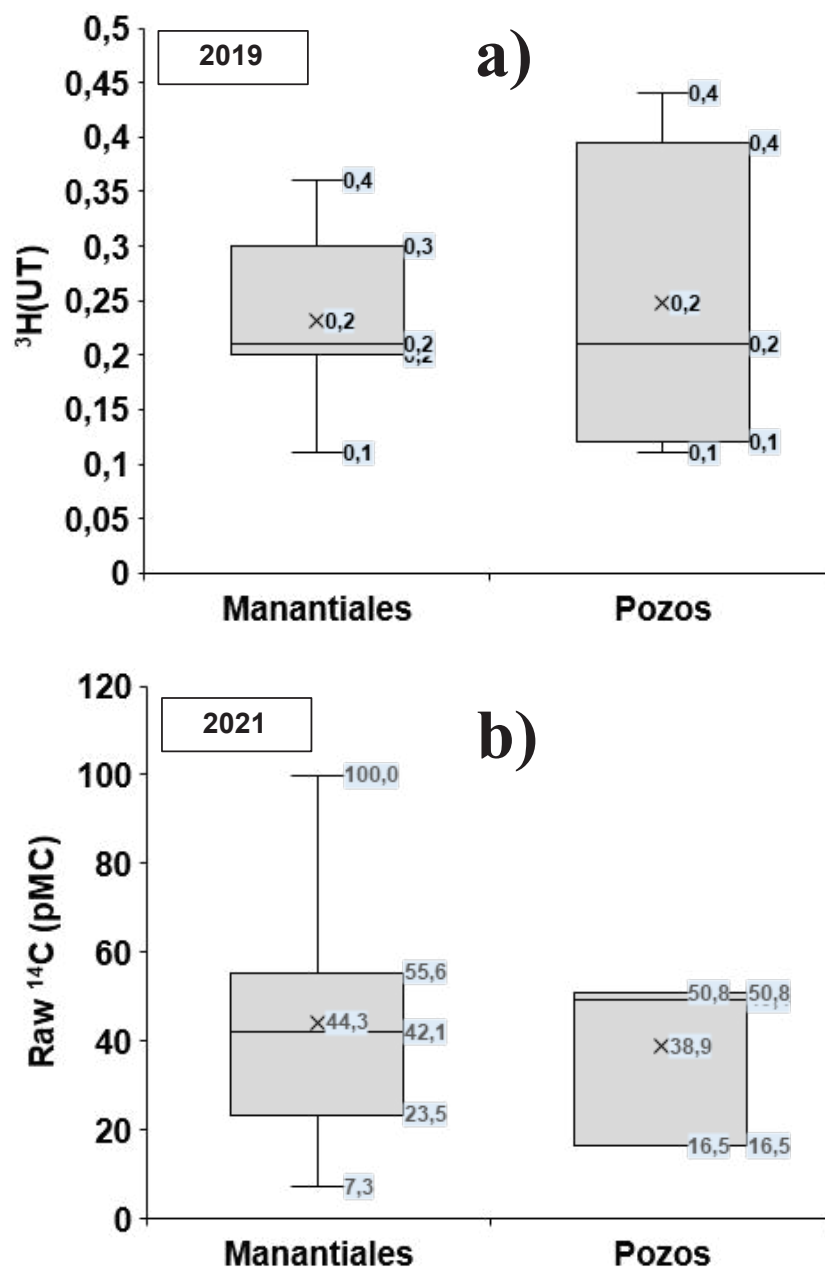
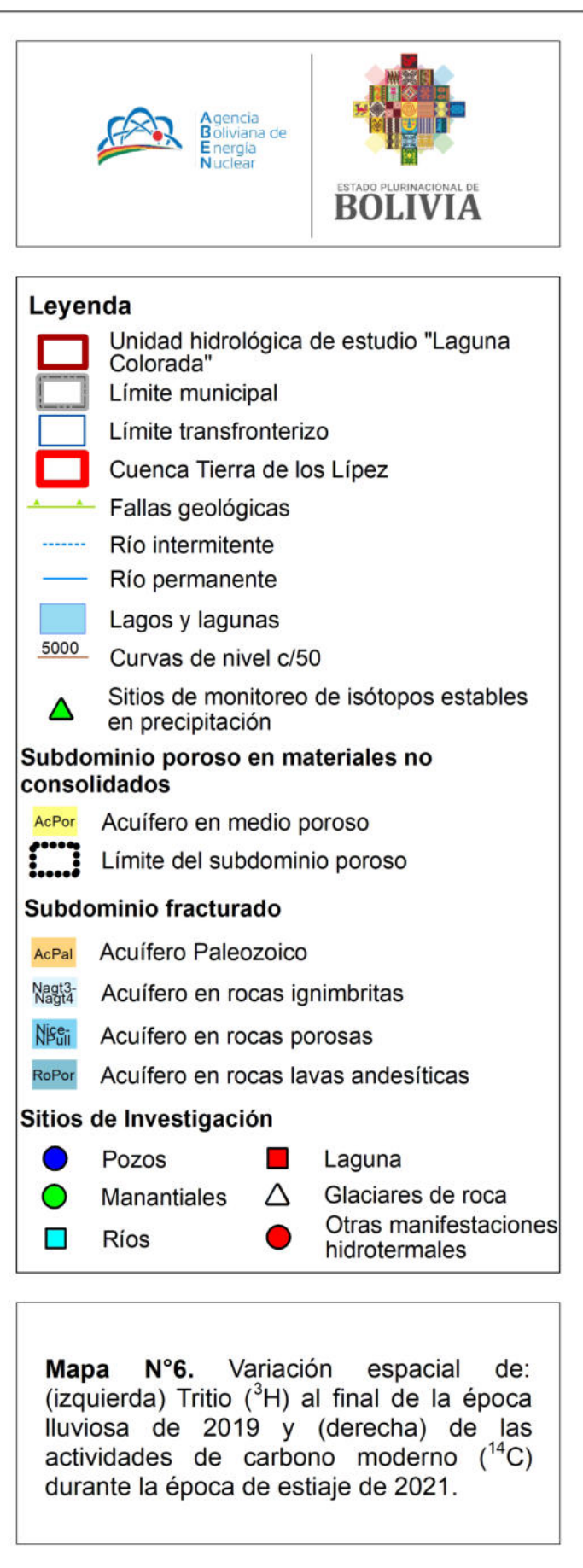
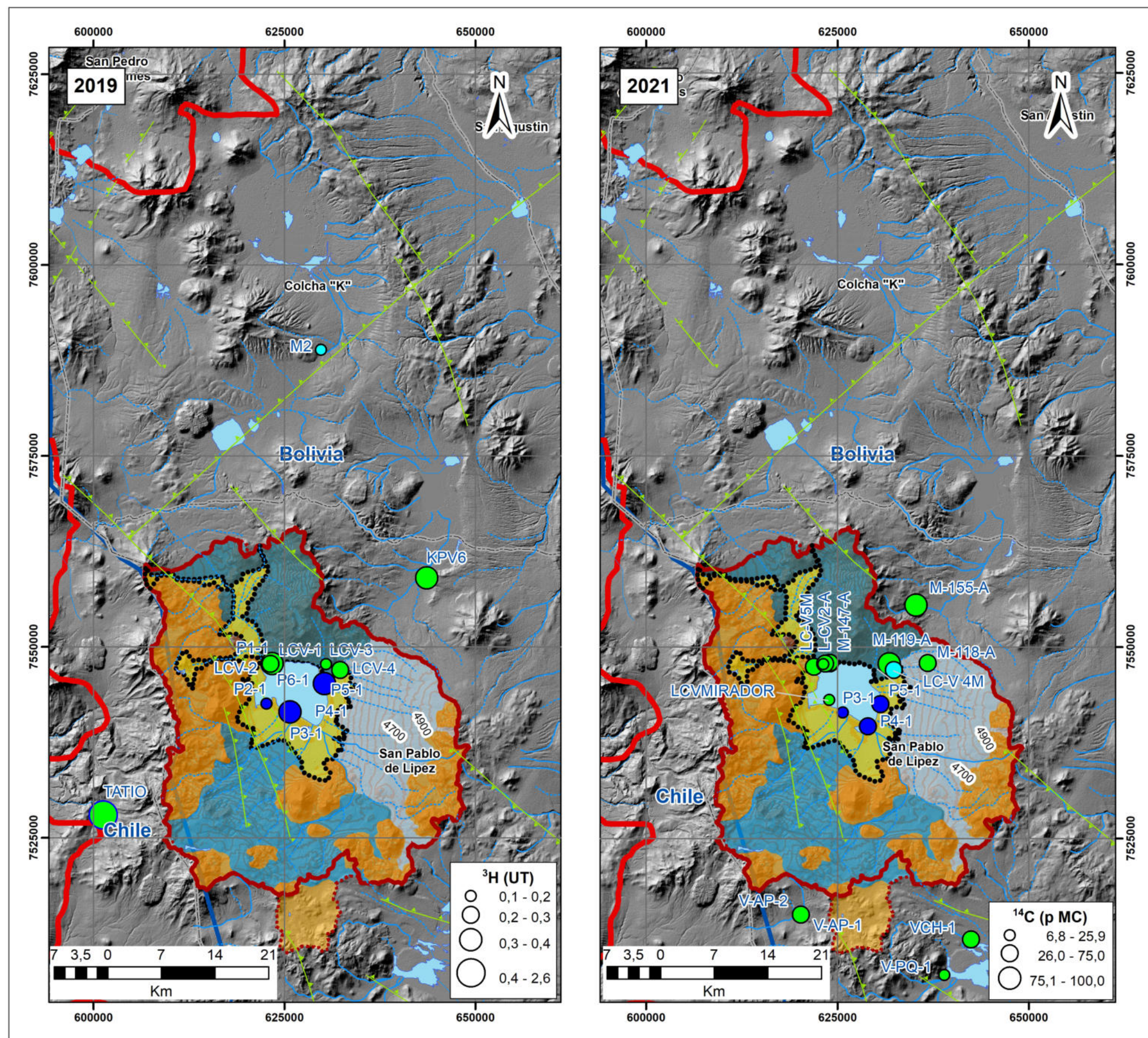


Figura 2.12 Diagramas de caja de: a) las concentraciones de: Tritio (^3H) y b) actividades de Carbono Moderno ($\text{Raw } ^{14}\text{C}$) en el subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), y en el subdominio de rocas fracturadas (manantiales), al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).



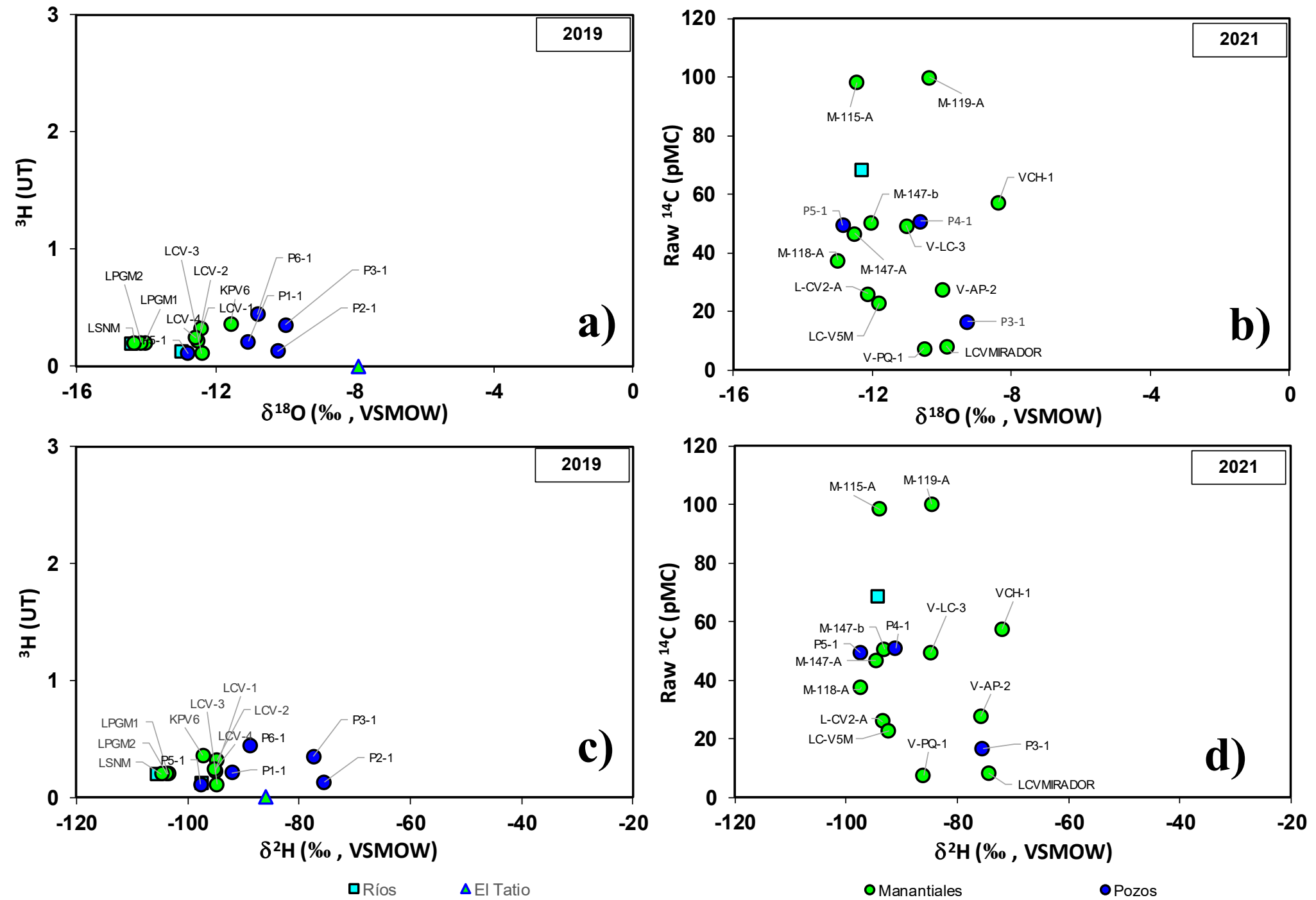


Figura 2.13 Diagramas de las concentraciones de: (a,c) Tritio (^3H) vs. $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ y (b,d) actividades de Carbono Moderno (Raw ^{14}C) vs. $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, de fuentes de aguas subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos) y del subdominio de rocas fracturadas (manantiales, pozos geotérmicos), y de fuentes de agua superficial (ríos, lagunas), al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).

2.4.4. Composiciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y actividades de ^{14}C en las aguas subterráneas del sistema acuífero

Las actividades de Carbono Moderno en las aguas subterráneas del subdominio poroso (pozos) presentan valores de 16,5 a 50,8 pMC (Mapa N°7), mientras que, las aguas subterráneas del subdominio fracturado (manantiales) muestran valores de 7,3 a 100 pMC (Fig. 2.12 b; Mapa N°7).

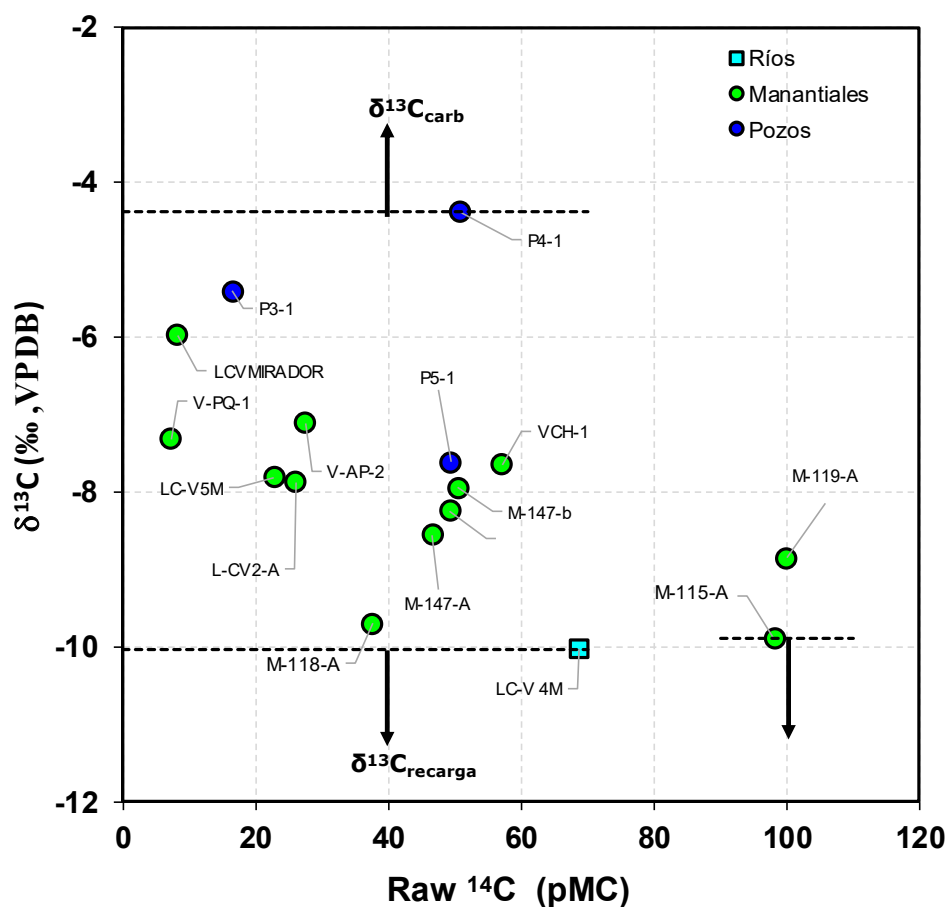


Figura 2.14 Diagrama de las composiciones isotópicas de Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) vs. las actividades de Carbono Moderno ($\text{Raw } ^{14}\text{C}$), de fuentes de agua subterránea del subdominio poroso de materiales no consolidados (pozos), y del subdominio de rocas fracturadas (manantiales), y de fuentes de agua superficial (ríos) durante la época de estiaje 2021 (ABEN, 2022).

En la Fig. 2.14 (b, d) es posible determinar el valor del $\delta^{13}C_{Recarga}$ como una función del $R_{aw}^{14}C$ (Radiocarbono aparente) para las aguas subterráneas del subdominio poroso (pozos) y para las aguas subterráneas del subdominio fracturado (manantiales). Así, los valores de $\delta^{13}C_{Recarga}$ de las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado presentan valores $\geq -10\text{‰}$, mientras que, los valores de carbonatos presentes en los sedimentos y rocas del sistema acuífero ($\delta^{13}C_{carbonato}$) presentan valores $\geq -4,3\text{‰}$.

En la Tabla 2.5 se presentan los resultados del cálculo de las edades aparentes (Ec. 2.10), presentando valores de 5.830 a 14.896 años en las aguas subterráneas del subdominio poroso, y de 4.612 a 21.603 años en las aguas subterráneas del subdominio fracturado. Estos valores sugieren que las aguas subterráneas del sistema acuífero se recargaron durante el Holoceno y Pleistoceno Superior.

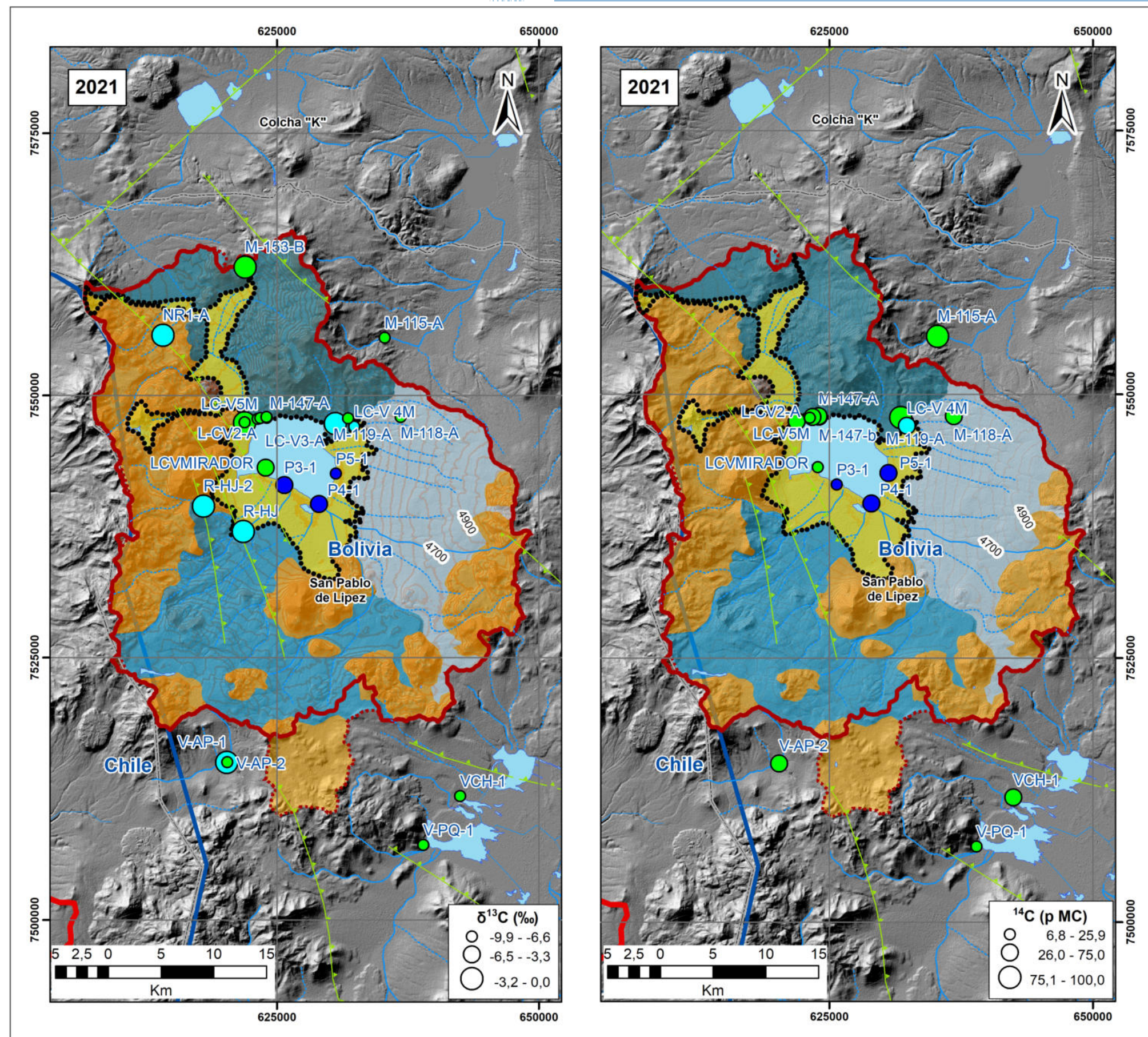
De acuerdo a Lavenu (1995) el Pleistoceno Superior en el Altiplano Sur, está marcado por los depósitos arcillosos o arcilloso-arenoso del Lago Minchin, mientras que el límite del Pleistoceno medio-Holoceno se caracteriza por depósitos lacustres, que se encuentran alrededor de los salares Uyuni y Coipasa que se atribuyen a la fase del Lago Tauca. Según Chaffaut (1995) la extensión de la fase lacustre Tauca corresponde a la última transición glacial-interglacial del Altiplano Boliviano que ocurrió entre 13.000 a 15.500 años (Antes del Presente).

Tabla 2.5 Resultados del cálculo de la edad aparente de las aguas subterráneas del subdominio poroso y fracturado, incluyendo la probable época de recarga (ABEN, 2022).

#	Código	Tipo	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	Error	^{14}C (p MC)	Error	t (años)	Probable época de recarga
			‰	$\pm\sigma$	p MC	$\pm\sigma$		
2	LC-V 4M	Río	-10,03	0,15	68,72	0,19	3.101	Holoceno
4	M-147-A	Manantial	-8,55	0,15	46,61	0,19	6.311	Holoceno
5	M-147-b	Manantial	-7,95	0,15	50,48	0,16	5.651	Holoceno
6	L-CV2-A	Manantial	-7,87	0,15	25,97	0,12	11.146	Holoceno
7	LC-V5M	Manantial	-7,81	0,15	22,70	0,12	12.258	Holoceno
8	LCVMIRADOR	Manantial	-5,97	0,15	8,14	0,08	20.737	Pleistoceno Superior
11	VCH-1	Manantial	-7,66	0,15	57,24	0,18	4.612	Holoceno
12	V-PQ-1	Manantial	-7,33	0,15	7,33	0,08	21.603	Pleistoceno Superior
14	V-AP-2	Manantial	-7,12	0,15	27,60	0,12	10.643	Holoceno
17	V-LC-3	Manantial	-8,25	0,15	49,28	0,16	5.850	Holoceno
18	P3-1	Pozo	-5,41	0,15	16,50	0,11	14.896	Pleistoceno Superior
19	P4-1	Pozo	-4,39	0,15	50,84	0,16	5.593	Holoceno
20	P5-1	Pozo	-7,62	0,15	49,40	0,16	5.830	Holoceno
21	M-118-A	Manantial	-9,70	0,15	37,54	0,15	8.100	Holoceno



Misión Científica de Campo 2021: Científica boliviana de la
Agencia Boliviana de Energía Nuclear
'Zona Piloto Laguna Colorada'.



Leyenda

- Unidad hidrológica de estudio "Laguna Colorada"
- Límite municipal
- Límite transfronterizo
- Cuenca Tierra de los Lipez
- Fallas geológicas
- Río intermitente
- Río permanente
- Lagos y lagunas
- Curvas de nivel c/50
- Sitios de monitoreo de isótopos estables en precipitación
- Subdominio poroso en materiales no consolidados
 - Límite del subdominio poroso
 - Acuífero en medio poroso
- Subdominio fracturado
 - Acuífero Paleozoico
 - Acuífero en rocas ignimbritas
 - Acuífero en rocas porosas
 - Acuífero en rocas lavas andesíticas
- Sitios de Investigación
 - Pozos
 - Manantiales
 - Ríos
 - Laguna
 - Glaciares de roca
 - Otras manifestaciones hidrotermales

Mapa N°7. Variación espacial de: (izquierda) las composiciones isotópicas de Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) y (derecha) de las actividades de Carbono Moderno (^{14}C) durante la época de estiaje de 2021.

2.4.5. Modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez

En la Figura 2.15 se presenta el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Tierra de los Lípez.

El Sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada) consiste en: i) un subdominio poroso y un ii) subdominio fracturado.

El subdominio poroso está compuesto por arenas, gravas y arcillas, cuyo espesor varía de 30 a 265 metros, y presenta una base impermeable constituida por horizontes ignimbríticos (no fracturados). Los niveles de agua subterránea en el subdominio poroso presentan valores de 0,6 a 1,6 m por debajo del nivel del terreno.

Por otro lado, el subdominio fracturado está compuesto por rocas de origen volcánico (horizontes ignimbríticos), controlado por la presencia de sistemas estructurales (fallas), que se evidencian a través de manifestaciones hidrotermales (manantiales fríos y calientes, fumarolas, geysers).

El análisis, tratamiento e interpretación de la evidencia científica isotópica, a través de modelos matemáticos, permitió determinar que:

- La recarga de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez, en la zona piloto de la Laguna Colorada, se origina en la cadena montañosa de la Cordillera Occidental, a una altitud de 4.750 y 6.000 m s.n.m.
- La recarga media anual por precipitación de las aguas subterráneas del subdominio poroso es de $7 \text{ a } 8 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$.
- La recarga de aguas subterráneas del sistema acuífero registró un efecto de evaporación fuerte durante su caída o en la superficie, presentando valores de exceso de Deuterio (D_{exceso}) menores a 10%. Y un efecto de evaporación aún más fuerte, en las fuentes de agua superficial (ríos, lagunas)

y fuentes de agua subterránea somera evidenciando valores de D_{exceso} (entre +5 a -23 ‰) isotópicamente enriquecidos.

- El 42% del volumen original del reservorio de aguas subterráneas (subdominio poroso) descarga hacia la Laguna Colorada, presentando una pérdida por evaporación del 58 %. Así, se estima una descarga del subdominio poroso hacia la Laguna Colorada de $165.950 - 921.945 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ evaporándose de $229.169 - 1.273.163 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$.

Por otra parte, desde la zona de recarga y en la trayectoria de flujo de las aguas subterráneas hacia la Laguna Colorada, se evidencia que:

- En el Sud-Oeste del sistema acuífero, las aguas subterráneas presentan una mezcla del 39 al 76 % de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares, del 21 al 58% de aguas de precipitación de origen reciente, y una mínima influencia, del 3 al 5% de fluidos geotermales.
- En el Nor-Este y Nor-Oeste del sistema acuífero, las aguas subterráneas presentan una mezcla del 6 al 94 % de aguas correspondientes a manifestaciones hidrotermales, del 5 al 91 % de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca, y una mínima influencia, del 1 al 4% de fluidos geotermales.

Las concentraciones de las actividades de Radón-222 en las aguas alojadas en el subdominio poroso, $11,9 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, son una consecuencia de la generación de Radón producto de la desintegración radiactiva del Radio-226 (^{226}Ra), de su incorporación en el medio de flujo, y del transporte del fluido dentro del subdominio poroso y/o el aporte de aguas del subdominio fracturado.

Las concentraciones de ^{222}Rn detectadas en las aguas subterráneas del subdominio fracturado, de 6,4 a $38,1 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, están relacionadas con las actividades de ^{226}Ra distribuidas de manera preferencial a lo largo del sistema estructural (fallas).

Las concentraciones de Tritio en las aguas subterráneas del subdominio poroso, de 0,1 a 0,4 UT, y de las aguas subterráneas del subdominio fracturado, de 0,1 a 0,36 UT, son una evidencia de que las aguas se recargaron bajo un régimen climático diferente al actual.

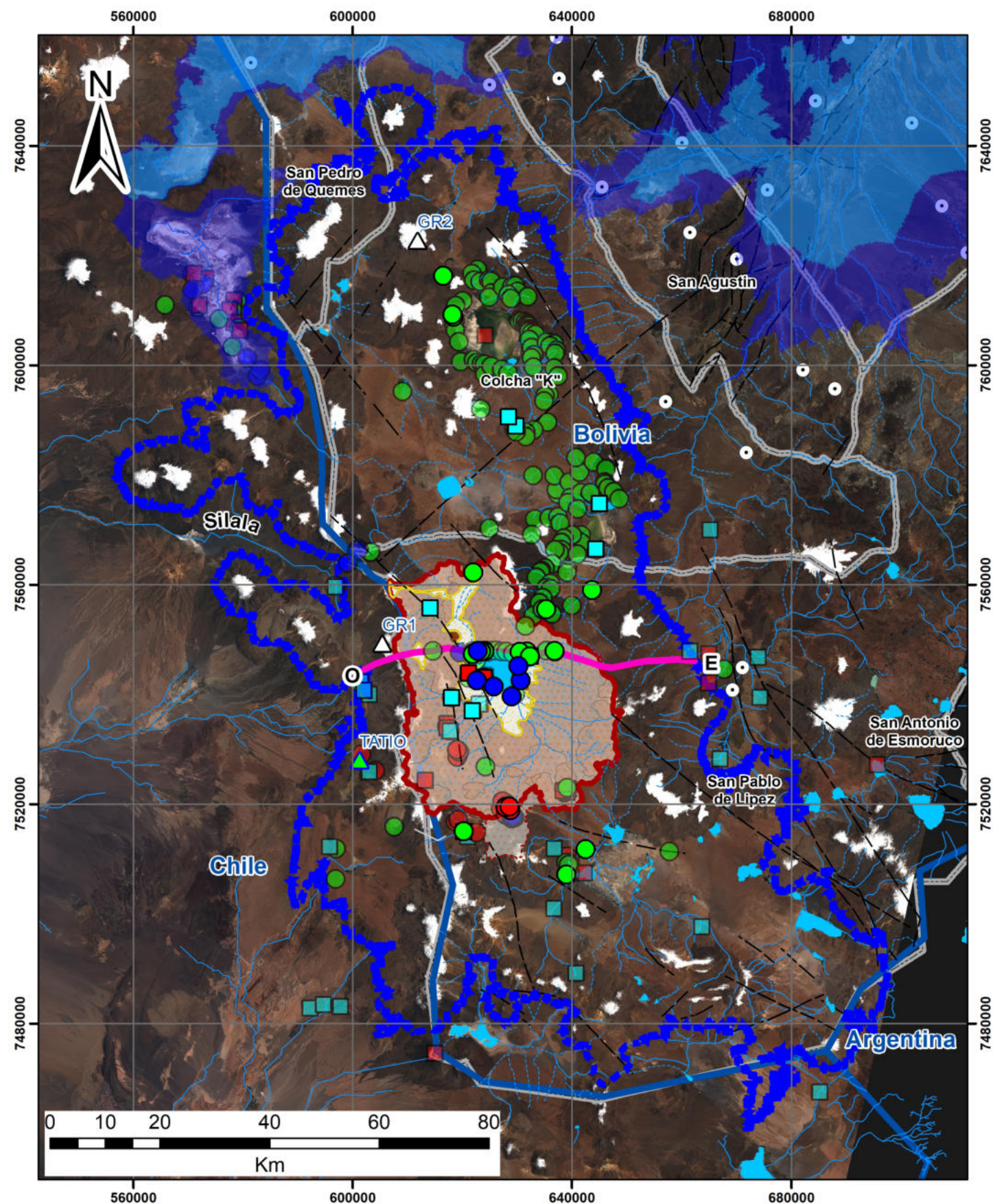
De hecho, las edades aparentes de las aguas subterráneas del sistema acuífero, de 5.830 a 14.896 años en el subdominio poroso, y de 4.612 a 21.603 años en el subdominio fracturado, evidencian que las aguas subterráneas del sistema acuífero se recargaron durante el Holoceno y Pleistoceno Superior, durante la última transición glacial-interglacial del Altiplano Boliviano que se atribuye a la extensión de la fase lacustre Tauca.

Finalmente, en base a la evidencia científica isotópica generada y al análisis técnico-científico de la línea de base de datos hidrológicos, litológicos, geofísicos hidrogeológicos y topográficos (Fig. 2.2), se infirieron los límites del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los López (línea azul punteada Mapa N°8).

Así, el sistema acuífero limita: i) en su frontera norte con los afloramientos rocosos ubicados en el Municipio de San Pedro de Quemes, ii) en su frontera oriental con los afloramientos rocosos ubicados al este del municipio de Colcha K y dentro del Municipio de San Pablo de López, iii) en su frontera occidental con los afloramientos rocosos mayormente ubicados en Chile, y iv) en su frontera sur con los afloramientos rocosos ubicados al sur del Municipio de San Pablo de López.



Misión Científica de Campo 2022, liderada por Científica de la ABEN
'Zona Piloto Cuenca del Amazonas, sector Municipio de Cobija'.



Legenda

- Unidad hidrológica de estudio "Laguna Colorada"
 - Límite municipal
 - Límite transfronterizo
 - Cuenca Tierra de los Lipez
 - Río intermitente
 - Río permanente
 - 5000 Curvas de nivel c/50
 - Subdominio poroso de materiales no consolidados
 - Límite del subdominio poroso
 - Subdominio fracturado
 - Lagunas
 - Extensión aproximada Paleolago Cabana
 - Extensión aproximada Paleolago Mataro
 - Límite del Sistema Acuífero
 - Perfil longitudinal
 - Fallas geológicas
- Sitios de Investigación**
- | | |
|--|--|
| ● Pozos | ■ Laguna |
| ● Manantiales | △ Glaciares de roca |
| ■ Ríos | ● Otras manifestaciones hidrotermales |

Mapa N°8. Mapa mostrando la ubicación del perfil E-O y los límites del sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lipez, inferidos en base a la evidencia científica generada por la ABEN. En transparencia se presentan los sitios de investigación de la línea de base de datos científicos construida por la ABEN.

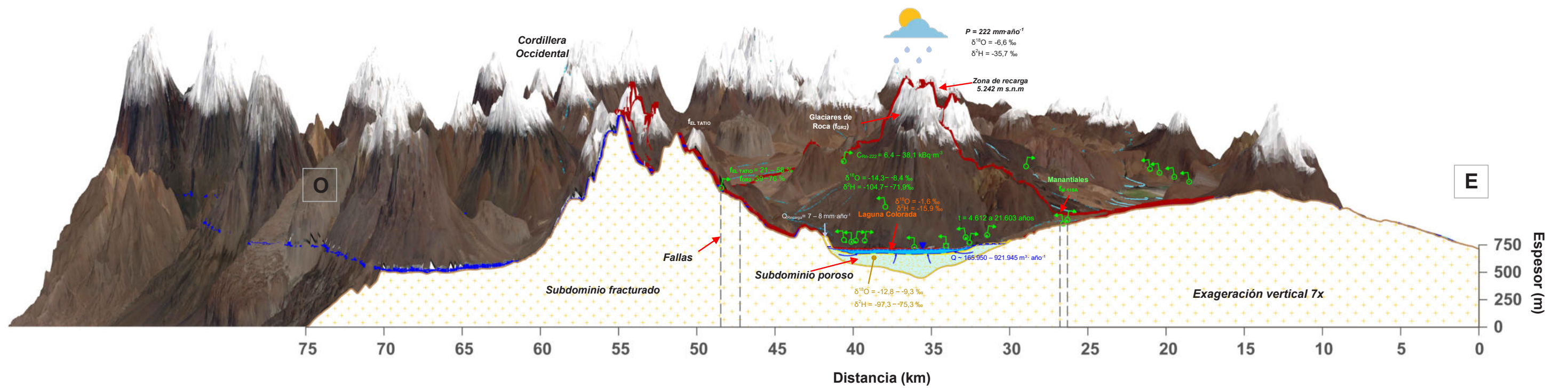


Figura 2.15 Modelo Conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Tierra de los Lipez (Perfil E-O Mapa N°23) (ABEN, 2022).

2.5 Conclusiones del Capítulo 2

El modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada), basado en evidencia científica isotópica, consolidó la comprensión de los componentes del balance hídrico subterráneo y los procesos hidrológicos clave que controlan la dinámica de los flujos subterráneos.

Este modelo es la base para el desarrollo de un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas. Y una herramienta poderosa para contribuir al fortalecimiento de la gestión integrada en materia de aguas transfronterizas en el Estado Plurinacional de Bolivia.

La metodología presentada en este estudio para el desarrollo del modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez puede replicarse en otras cuencas de la región árida del Altiplano Sud con condiciones hidrogeológicas e hidrológicas similares.

El presente estudio permitió consolidar una base organizada de datos científicos geoespaciales SIG para el desarrollo de futuras investigaciones sobre recursos hídricos subterráneos y/o para el apoyo de acciones a nivel local, regional, nacional, lo cual favorecerá el intercambio de información/datos científicos entre Bolivia, Chile y Argentina coadyuvando al establecimiento de acuerdos operativos específicos en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez.

Para concluir, tal como se demuestra en este estudio, la aplicación de la hidrología isotópica utilizando evidencia científica de isótopos estables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) y de isótopos inestables de: Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C) y Radón-222 (^{222}Rn) se constituye en una herramienta valiosa para el desarrollo de estudios e investigaciones sobre la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos.

2.6 Perspectivas del Capítulo 2

Se requieren futuras investigaciones para mejorar la robustez del modelo del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez, con el propósito de desarrollar un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas.

Es así que algunas investigaciones, posteriores a este estudio, podrían estar dirigidas a:

- 1) Investigar y validar la geometría y el espesor del subdominio poroso (arenas, gravas y arcillas) del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez, a la escala de los límites inferidos en base a la evidencia científica generada en el marco del presente estudio (línea punteada azul Mapa N°8).
- 2) Investigar las propiedades hidráulicas del sistema acuífero aplicando la hidrología isotópica mediante trazadores artificiales (radioisótopos).
- 3) Investigar las condiciones de frontera del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez (línea punteada azul Mapa N°8) mediante la aplicación de la hidrología isotópica. En particular, en el límite occidental inferido (i.e. zona Silala), donde se plantea la hipótesis de fronteras de no flujo y de descarga de aguas subterráneas.
- 4) Establecer una Red de Monitoreo de la Calidad y Cantidad de los Recursos Hídricos Subterráneos, en toda la extensión del Sistema Acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez, mediante la aplicación de la hidrología isotópica, como alerta temprana sobre los impactos de la extracción y la contaminación de los recursos hídricos subterráneos.
- 5) Implementar colectores de precipitación y realizar el monitoreo temporal de isótopos estables e inestables en precipitación, en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez.

6) Realizar mediciones hidrológicas de caudales en los sitios de las manifestaciones hidrotermales (manantiales calientes y fríos). La realización de mediciones temporales en los sitios identificados en la línea de base de datos científicos (Fig. 2.2) permitirá el desarrollo de un modelo numérico en estado transitorio, el cual podría ayudar a investigar escenarios futuros incluyendo el impacto del cambio climático.

Dirección General Ejecutiva de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear-ABEN

MSc. Ing. Hortensia Jiménez Rivera
Directora General Ejecutiva de la ABEN

Declaración de Contribución de Autoría

PhD. Ing. Gabriela Patricia Flores Avilés- *Especialista en Análisis de Desarrollo y Proyectos Científicos de la ABEN: Conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, redacción y visualización científica.*

2.7 Referencias del Capítulo 2

- ABEN (2022) Agencia Boliviana de Energía Nuclear. Compendio de Hidrología Isotópica. Tablas, figuras y cartografía (Mapa N°1 al 8) generada en el marco FASE I Proyecto Científico 'Prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas transfronterizas piloto, de las tres regiones hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia mediante la aplicación de la hidrología isotópica, 2022-2025'. Documento inédito aprobado para su publicación.
- Bayanzul B, Nakamura K, Machida I, Watanabe N, Komai T (2019). Construction of a conceptual model for confined groundwater flow in the Gunii Khooloi Basin, Southern Gobi Region, Mongolia. *Hydrogeology Journal*. 27(5):1581-1596, doi 10.1007/s10040-019-01955-8
- Chaffaut I (1998). Precipitations D'Altitude, Eaux Souterraines et Changements Climatiques de L'Altiplano Nord-Chilien. París, Francia. Anexo II 1 – 4.
- Clark I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press Taylor & Francis Group; p. 121-164.
- Clark ID, Fritz P (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press LLC; p. 43-64.
- Cook P, Herczeg A (2000). *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Springer Science+Business Media New York; p. 175-194.
- Copia L, Wassenaar L, Terzer-Wassmuth S, Belachew D, Araguas-Araguas L (2021). Comparative evaluation of 2H- versus 3H-based enrichment factor determination on the uncertainty and accuracy of low-level tritium analyses of environmental waters. *Applied Radiation and Isotopes*. 176:109850, doi 10.1016/j.apradiso.2021.109850
- Delgadillo Z, Rosales H, Gonzáles R (1987). Estudio de Factibilidad Geotérmica en el área de Laguna Colorada "Estudios Geocientíficos de Superficie"; p. 98.
- E.N.D.E. (2010). Empresa Nacional de Electricidad. Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral (EEIA-AI) Proyecto Geotérmico Laguna Colorada y Línea de Transmisión Eléctrica; p. 4-1, 4-65, Anexo Figuras Cap.4.
- E.N.D.E. (2016). Empresa Nacional de Electricidad. Datos de precipitación, temperatura y viento de la Estación Sol de Mañana.
- Fernandes PG, Carreira PM & Nunes D (2009). Environmental isotopes (^{15}N and ^{18}O) in the assessment of groundwater degradation: Aveiro Quaternary aquifer (NW Portugal). *J Radioanal Nucl Chem* 281, 157–160 . <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0062-2>.
- Figuerola Y (2018). Geochemical and Isotopic Characteristics of the Laguna Colorada Geothermal Area – SW Bolivia. Report 16 in: *Geothermal training in Iceland 2018*. UNU-GTP, Iceland, 229-256.

- Flores Avilés GP (2019). A groundwater basin multidisciplinary approach to conceptualize subsurface flow and trace nitrate contamination sources. Lake Titicaca, Bolivia. PhD thesis, École Doctorale Terre-Univers-Environnement, University of Grenoble Alpes, France; p. 245.
- Flores Avilés GP, Descloitres M, Duwig C, Rossier Y, Spadini L, Legchenko A et al (2020). Insight into the Katari-Lago Menor Basin aquifer, Lake Titicaca-Bolivia, inferred from geophysical (TDEM), hydrogeological and geochemical data. *Journal of South American Earth Sciences*. 99:102479, doi 10.1016/j.jsames.2019.102479.
- Flores Avilés GP, Spadini L, Sacchi E et al. (2022). Hydrogeochemical and nitrate isotopic evolution of a semiarid mountainous basin aquifer of glacial-fluvial and paleolacustrine origin (Lake Titicaca, Bolivia): the effects of natural processes and anthropogenic activities. *Hydrogeol J* 30, 181–201. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02434-9>.
- Flores Avilés GP (2022). Procesos hidrológicos y origen de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada mediante aplicaciones de la hidrología isotópica. *Revista Científica Nuclear Bolivianamente*. Agencia Boliviana de Energía Nuclear. 1,2022: 17-28.
- Fritz S, Baker P, Seltzer G, Ballantyne A, Tapia P, Cheng H et al. (2007). Quaternary glaciation and hydrologic variation in the South American tropics as reconstructed from the Lake Titicaca drilling project. *Quaternary Research*. 68(3):410-420, doi 10.1016/j.yqres.2007.07.008.
- Hoefs J. (2009). *Stable Isotope Geochemistry*. 6th Edition. Springer; p. 58-68.
- Houston J (2007). Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques, *Journal of Hydrology*. 334: 534-544, doi 10.1016/j.jhydrol.2006.10.030.
- I.A.E.A/INIS (2021). Repositorio Virtual Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Accesible en: <https://inis.iaea.org>.
- I.A.E.A (2021). Global Network of Isotopes in Rivers. International Atomic Energy Agency. The GNIR Database. Disponible en: <https://nucleus.iaea.org/wiser>. International Atomic Energy Agency.
- I.A.E.A/WMO (2022). Global Network of Isotopes in Precipitation. International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization. The GNIP Database. Disponible en: <https://nucleus.iaea.org/wiser>.
- J.I.C.A. (2013). Proyecto Preparatorio para el Proyecto Construcción de la Central Geotérmica de Laguna Colorada – Proyecto Final. Agencia de Cooperación Internacional del Japón; p. 1 – 32.
- J.I.C.A. (2015). Asistencia Especial para la implementación del proyecto (SAPI) para el proyecto de construcción de la planta Geotérmica Laguna Colorada (Fase 1 de la Primera Etapa). Agencia de Cooperación Internacional del Japón; p. 5-12, 18-28.

- Kammoun S, Re V, Trabelsi R, Zouari K, Daniele S (2018). Assessing seasonal variations and aquifer vulnerability in coastal aquifers of semi-arid regions using a multi-tracer isotopic approach: the case of Grombalia (Tunisia). *Hydrogeology Journal*. 26(8):2575-2594, doi 10.1007/s10040-018-1816-0
- Kang S, Yi Y, Xu Y, Xu B, Zhang Y (2017). Water Isotope framework for lake water balance monitoring and modelling in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 12:289-302, doi 10.1016/j.ejrh.2017.05.007.
- Kruseman GP, de Ridder NA (1992) Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. ILRI Publication 47, p. 99, p.196.
- MMAYA (2016) Plan de Manejo Preliminar de los Acuíferos de Purapurani y Viacha. Ministerio de Medio Ambiente y Agua/Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, La Paz, Bolivia, p. 89-98.
- M.M.A.Y.A (2022). Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia. Base de datos disponible en: <http://vibh.mmaya.gob.bo/vibh/database/22;jsessionid=22bec218e07380938a8ce6362cfe#pablo>.
- M.R.E (2022). Ministerio de Relaciones Exteriores del Estado Plurinacional de Bolivia. Dirección General de Límites, Fronteras y Aguas Internacionales Transfronterizas. Gestión de Recursos Hídricos Transfronterizos. Presentación Reunión de Coordinación de Trabajo ABEN-MRE, 31/01/2022; p. 1-18.
- Mudarra M, Andreo B, Marín A, Vadillo I, Barberá J (2014). Combined use of natural and artificial tracers to determine the hydrogeological functioning of a karst aquifer: the Villanueva del Rosario system (Andalusia, southern Spain). *Hydrogeology Journal*. 22(5):1027-1039, doi 10.1007/s10040-014-1117-1
- N.A.S.A. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Project from the National Aeronautics and Space Administration. 2000; Disponible en: <http://dds.cr.usgs.gov/ee-data/coveragemaps/shp/ee/srtm/srtm.zip>.
- Ortega L (2022). Resultado de 18 muestras de agua para el proyecto 'BOL 7005'. Muestras 'M-153-B' y 'LC-V3-A'; p. 1.
- Ramos PR (2015). Well Data Analysis and Volumetric Assessment of the Sol de Mañana Geothermal Field, Bolivia. Report 30 in: Geothermal training in Iceland 2015. UNU-GTP, Iceland, 665-688.
- Revilla DM (2016). Analysis of Bit Operations: Laguna Colorada Geothermal Project, Bolivia. Report 36 in: Geothermal training in Iceland 2016. UNU-GTP, Iceland, 771-796.
- Risacher F, Alonso H, Salazar C (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones - Chile. 1(51): II 1-55.

- Saavedra O, Soruco W, Camargo A., Butrón C (2017). Balance hídrico integrado hidrológico e hidrogeológico de la unidad hidrológica Laguna Colorada con análisis de cambio climático. Publicación de MMAyA y Cooperación Suiza en Bolivia; p. 157.
- Scandiffio G & Alvarez M (1990). Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en América Latina. Actas de una Reunión final de coordinación de investigaciones celebrada en San José, Costa Rica, 12-16 de Noviembre de 1990. Organismo Internacional de Energía Atómica; p. 77-114.
- S.E.N.A.M.H.I (2022). Sistemas de Información. Disponible en: <http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Toro LE (2018). Developing Integral Management of Water Resources in the South Lipez Province Using Isotope Hydrology. Informe técnico complementario; p. 8-17, 26-27.
- U.N.E.C.E & U.N.E.S.C.O (2021). Indicator | SDG 6 Data [Internet]. Sdg6data.org. 2022 [cited 31 March 2022]. Disponible en: <https://sdg6data.org/indicator/6.5.2>. United Nations Economic Commission for Europe & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- U.S.G.S. (2021). U.S. Geological Survey Earth Explorer. Landsat 8 L1 TP. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Valdivieso S et al. (2022). Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama. Science of the Total Environment. 806 (2022) 150271: 1-14, doi 10.1016/j.scitotenv.2021.150271.
- Viguié B, Jourde H, Yáñez G, Lira E, Leonardi V, Moya C et al. (2018). Multidisciplinary study for the assessment of the geometry, boundaries and preferential recharge zones of an overexploited aquifer in the Atacama Desert (Pampa del Tamarugal, Northern Chile). Journal of South American Earth Sciences. 86:366-383, doi 10.1016/j.jsames.2018.05.018.
- Villarroel DG (2014). Geochemical studies of geothermal fluid and evaluation of well test results from wells SM-01, SM-02 and SM-03, Sol de Mañana field, geothermal project, Laguna Colorada, Bolivia. Report 32 in: Geothermal training in Iceland 2014. UNU-GTP, Iceland, 697-720.
- Wassenaar L, Terzer-Wassmuth S, Douence C, Araguas-Araguas L, Aggarwal P, Coplen T (2018). Seeking excellence: An evaluation of 235 international laboratories conducting water isotope analyses by isotope-ratio and laser-absorption spectrometry. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 32(5):393-406, doi 10.1002/rcm.8052.
- Xanke J, Liesch T, Goeppert N, Klinger J, Gassen N, Goldscheider N (2017). Contamination risk and drinking water protection for a large-scale managed aquifer recharge site in a semi-arid karst region, Jordan. Hydrogeology Journal. 25(6):1795-1809, doi 10.1007/s10040-017-1586-0.
- Zhao D, Wang G, Liao F. et al (2018). Groundwater-surface water interactions derived by hydrochemical and isotopic (^{222}Rn , deuterium, oxygen-18) tracers in the Nomhon area, Qaidam Basin, NW China, Journal of Hydrology 565: 650-661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.066>.

CAPÍTULO 3: IMPACTO DEL PROYECTO EN EL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

El OIEA, a través del Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005, en su rol de promover y transferir conocimientos técnicos sobre el uso de la Hidrología Isotópica, coadyuvó al Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia a través de su Estatal Agencia Boliviana de Energía Nuclear – ABEN, en: i) la capacitación de sus recursos humanos, ii) el fortalecimiento de la capacidad analítica de su laboratorio de hidrología isotópica, y iii) la continuidad de la investigación científica mediante la aplicación de la hidrología isotópica.

3.1 Capacitación de Recursos Humanos de la ABEN

En el marco del Proyecto BOL 7005, la ABEN gestionó con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Misión Virtual de una Experta, en el Manejo y Uso del Equipo de Radón RAD 7 – DURRIDGE y organizó el “Curso de Capacitación sobre la Medición de Radón-222 en Agua mediante el Detector Electrónico RAD 7, tal cual se detalla a continuación.

3.1.1. *Curso de Capacitación sobre la medición de Radón-222 en agua*

El curso de capacitación sobre la medición de Radón-222 en agua fue organizado por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear, con el propósito de responder adecuadamente a los requerimientos del país en ciencia y tecnología nucleares, promoviendo e impulsando la investigación, gestión y aplicaciones de la hidrología isotópica, para contribuir de manera eficiente a la evaluación y gestión de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Objetivos del Curso de Capacitación:

- i) Promover e impulsar la investigación, gestión y aplicaciones de la hidrología isotópica para contribuir de manera eficiente a la evaluación y gestión de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en Bolivia.
- ii) Fortalecer las competencias del Técnico Químico-Analista de la ABEN, en el uso, ensamblaje, instalación, y manejo del Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE'.

Expositor: PhD. Victoria Moreno Balta (Doctora en Física de la Universidad de Barcelona España).

Población Objetivo:

- i) Ministerios, Institutos del Estado, y Universidades, como:
 - Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN).
 - Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).
 - Dirección General de Límites, Fronteras y Aguas Internacionales (DGLFAIT) del Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE).
 - Empresa Nacional de Electricidad (E.N.D.E) – Área Recursos Ambientales.
 - Autoridad Binacional del Lago Titicaca - Sistema Hídrico TDPS.
 - Ministerio de Medio Ambiente y Agua (M.M.A.Y.A).
 - Universidad Autónoma Tomás Frías (U.A.T.F).
 - Dirección de Aguas, Cuencas y Riego - Gobierno Autónomo Departamental de Oruro.
 - Universidad Técnica de Oruro (U.T.O).
- ii) Técnico Químico-Analista de la ABEN.

Total, participantes: 25 (Fotografía 3.1).

Duración y modalidad: Este evento fue realizado de manera virtual del 7 al 19 de julio, de 2021, con una duración de 12 horas académicas.



Fotografía 3.1 a y b) Ensamblaje del Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE', c y d) Capacitación de la Técnico Químico-Analista de la ABEN, en el uso, ensamblaje, instalación, y manejo del Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE'.

3.2 Fortalecimiento de la capacidad analítica del Laboratorio de Hidrología Isotópica de la ABEN

En el marco del Proyecto BOL 7005, la ABEN gestionó a través del OIEA donaciones y/o envíos por un total de BOB 553.527,37 (Quinientos cincuenta y tres mil quinientos veinte siete con 37/100 bolivianos), con el propósito de mejorar la capacidad analítica del Laboratorio de Hidrología Isotópica de la ABEN mediante la dotación de tecnología nuclear de última generación y materiales de laboratorio, para el desarrollo de estudios analíticos, además del desarrollo de investigaciones, proyectos, y estudios científicos mediante la aplicación de la hidrología isotópica.

A continuación, se detallan los materiales y equipos consignados a favor de la ABEN.

3.2.1 Equipo de Laboratorio RAD 7 – DURRIDGE y materiales de laboratorio

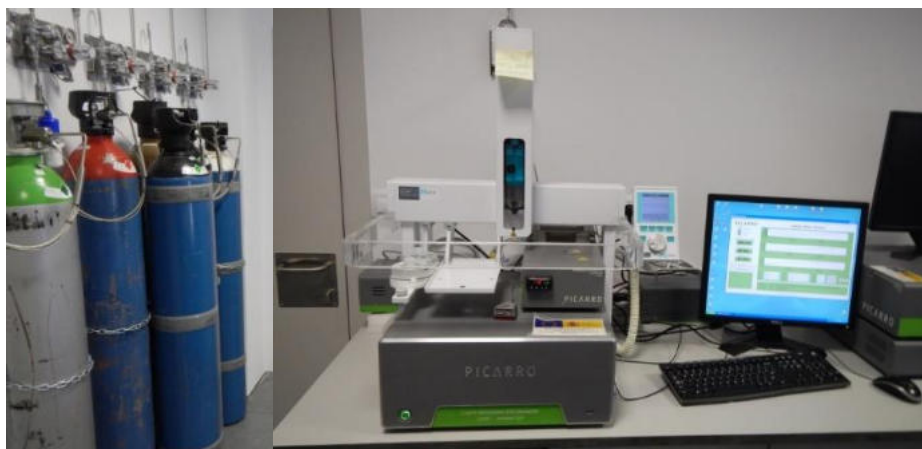
Propósito del envío realizado por el OIEA: Mejorar la capacidad analítica del Laboratorio de Hidrología Isotópica de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) mediante la dotación de tecnología nuclear de última generación (Equipo de Laboratorio RAD 7 – DURRIDGE) y materiales de laboratorio (Fotografía 3.2), para el desarrollo de estudios analíticos de radioisótopos de Radón-222 (^{222}Rn), además del desarrollo de investigaciones, proyectos, estudios mediante aplicaciones de la hidrología isotópica, en el marco del Proyecto BOL 7005.



Fotografía 3.2 a) Equipo Detector Electrónico de Radón-222 'RAD-7 DURRIDGE', b) multiparámetro portátil digital, c) medidor de niveles piezométricos de pozos (rango 0–100 m), d) kit de prueba de alcalinidad, e) bomba sumergible para el monitoreo de pozos de 40 mm.

3.2.2 Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i

Propósito del envío realizado por el OIEA: Mejorar la capacidad analítica del Laboratorio de Hidrología Isotópica de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), mediante la dotación de tecnología nuclear de última generación - *Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i* (Fotografía 3.3), para proporcionar estudios analíticos de isótopos estables de agua oxígeno-18 y deuterio (^{18}O y ^2H), además del desarrollo de investigaciones, proyectos, estudios mediante las aplicaciones de la hidrología isotópica, en el marco del Proyecto BOL 7005.



Fotografía 3.3 Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i.

3.2.3 Materiales de laboratorio (fungibles) Kit de Muestreo para Carbono-14

Propósito del envío realizado por el OIEA: Dotar a la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) de materiales de laboratorio, de uso exclusivo para las Misiones Científicas de Campo (Campañas de Muestreo) (Fotografía 3.4), diseñadas, organizadas y planificadas en el marco del Proyecto BOL 7005.



Fotografía 3.4 Kit de Muestreo para Carbono-14.

3.2.4 Materiales de referencia para la calibración del Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i

Propósito del envío realizado por el OIEA: Dotar a la ABEN de materiales de laboratorio, de uso exclusivo para la calibración de los equipos de tecnología nuclear de última generación: *Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i* (Fotografía 3.5) para el análisis de isótopos estables de agua oxígeno-18 y deuterio (^{18}O y ^2H), en el marco del Proyecto BOL 7005.



Fotografía 3.5 a) y b) Materiales de referencia para la calibración del Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i.

3.3 Desarrollo de la Investigación Científica en el Estado Plurinacional de Bolivia mediante la aplicación de la hidrología isotópica

3.3.1 Misión Científica de Campo 2021 en la Unidad Hidrológica Laguna Colorada - Cuenca Tierra de los Lípez -, del 14 al 21 de agosto de 2021

En el marco del Proyecto BOL 7005, la ABEN diseñó, planificó, organizó y financió una Misión Científica de Campo en la Unidad Hidrológica 'Laguna Colorada'.

La fase de ejecución de la Misión Científica fue realizada del 14 al 21 de agosto de 2021, liderada por un Equipo de Investigadores de la ABEN, con el apoyo de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) y Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF).

El objetivo principal de la Misión Científica fue: i) realizar mediciones in-situ de: pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad, ii) mediciones radioisótopos de Radón-222, iii) mediciones hidrológicas e hidrogeológicas, y iv) la recolección de muestras para análisis de iones mayoritarios y metales, isótopos estables de deuterio y oxígeno-18, y radioisótopos de radiocarbono, en 25 puntos cartográficos (ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos) de la unidad hidrológica de la Laguna Colorada (Fotografía 3.6, Figura 3.1; 3.2), para el posterior desarrollo de un modelo hidrogeológico, mediante aplicaciones de la hidrología isotópica, sobre los procesos hidrológicos clave que controlan la cantidad de las aguas subterráneas.



Fotografía 3.6 Memoria Fotográfica de cada punto cartográfico validado en terreno por la ABEN mediante el mapeo integrado de aguas superficiales y subterráneas en la unidad hidrológica Laguna Colorada

Cont.fotografía 3.6

Laguna M147 LC	Vertiente VCH-1	Vertiente V-PQ-1
		
Río V-AP-1	Vertiente V-AP-2	Río R-HJ
		
Río R-HJ-2	Vertiente V-LC-3	Pozo P3-1
		

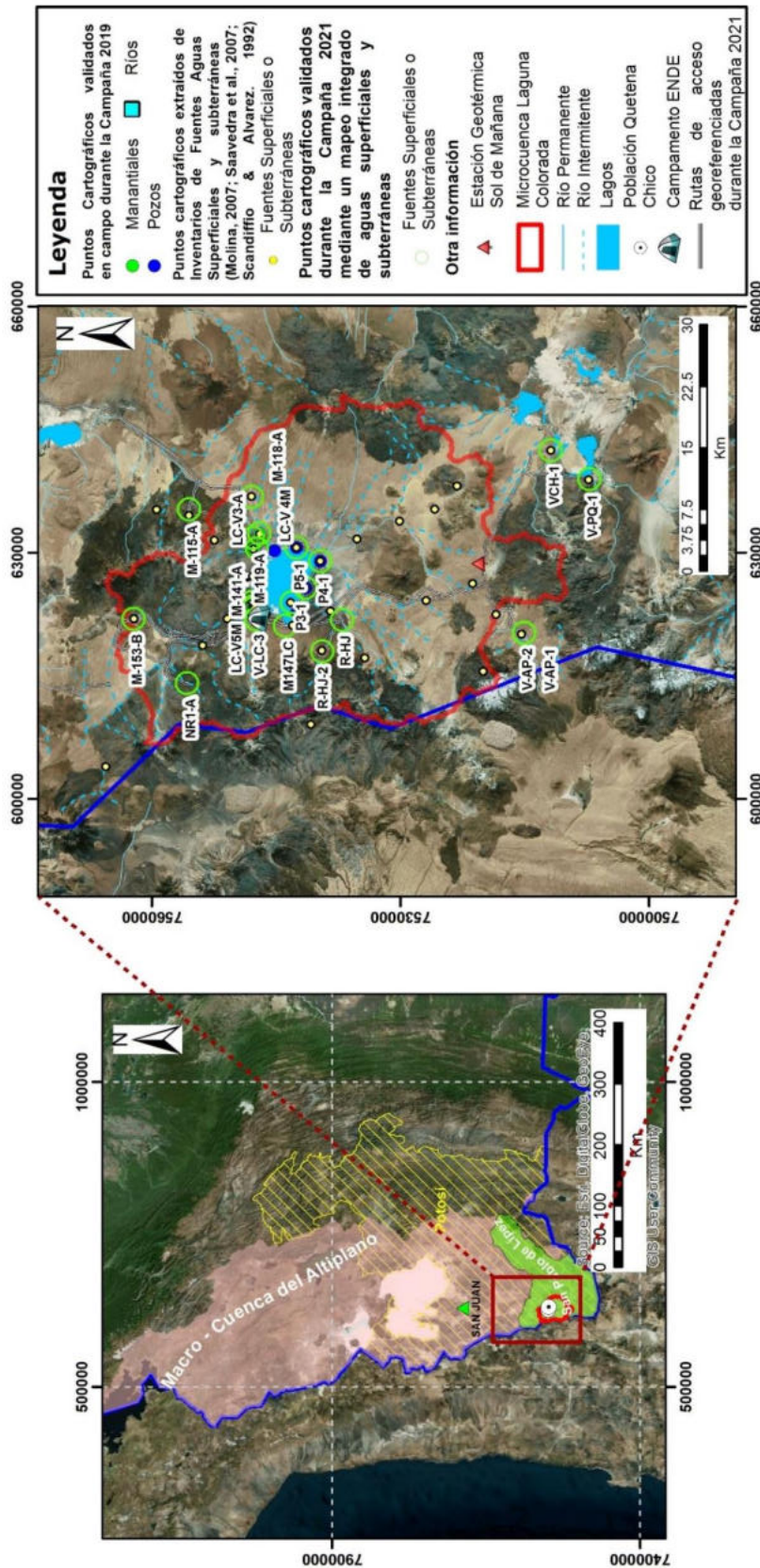


Figura 3.1 Localización del área de estudio, unidad hidrológica Laguna Colorada, mostrando los 25 puntos cartográficos (ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos) validados en terreno por la ABEN mediante el mapeo integrado de aguas superficiales y subterráneas. En cada punto cartográfico se realizaron mediciones in-situ de: i) pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad, radioisótopos de radón 222, ii) mediciones hidrogeológicas e hidrogeológicas, y iii) la recolección de muestras para análisis de iones mayoritarios y metales, isótopos estables de deuterio y oxígeno-18, y radioisótopos de radiocarbono.

6 DOMINGO 29/08/2021

www.ahoraelpueblo.bo

Ahora
EL PUEBLO

Tecnología

Redacción Central

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) impulsa y promueve la investigación, gestión y aplicaciones de la tecnología nuclear empleando la hidrología isotópica, con el fin de contribuir a la evaluación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en Bolivia, para establecer y ejecutar políticas para la adecuada gestión de los recursos hídricos.

Actualmente, la ABEN es contraparte principal del Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005 denominado 'Desarrollo de la gestión integral de los recursos hídricos en la provincia sud Lípez empleando hidrología isotópica', parcialmente financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

En el estudio, con el propósito de establecer un marco de cooperación interinstitucional, se amanaron esfuerzos para potenciar los procesos de investigación con convenios entre la ABEN y la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), la Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF) de Potosí, se conforma de esta manera un equipo multidisciplinario de trabajo.

La Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia establece que el agua es un recurso finito, vulnerable, estratégico y cumple una función social, cultural y ambiental.

Así, la implementación de la 'Política Nacional de Uso Eficiente del Agua Potable y Adaptación al Cambio Climático', para 'Vivir Bien' es de vital importancia para el Estado.

Del 10 al 21 de agosto de 2021, la ABEN dirigió y supervisó la ejecución de una misión científica de mediciones en el lugar y la recolección de muestras en ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos, localizados en la microcuenca de la Laguna Colorado, para que con la ayuda de las aplicaciones de la energía nuclear los científicos puedan comprender los componentes del ciclo del hidrológico, con el fin de evaluar la cantidad, la calidad y la sostenibilidad del agua en esa región. Y así aportar datos para la gestión de los recursos hídricos según los planes de desarrollo del Estado.

Tradicionalmente, la evaluación de la cantidad de los recursos hídricos a la escala de cuencas hidrográficas, mediante el cálculo de



Equipo multidisciplinario ABEN y UATF, recolecta muestras en una vertiente en un paraje alto de la microcuenca de la Laguna Colorado.

FOTO: ABEN

IMPLEMENTA CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR

ABEN trabaja en la evaluación de los recursos hídricos

Para potenciar los procesos de investigación se establecieron convenios con la Universidad Mayor de San Andrés y la Universidad Autónoma Tomás Frías.

Los componentes del ciclo hidrológico, ha requerido de grandes inversiones financieras y extensos programas de campo, sobre todo en áreas remotas del país que carecen de infraestructura adecuada.

De manera alternativa, la hidrología isotópica resulta ser menos costosa, ya que el cálculo de estos componentes requiere del análisis de isotopos de muestras de agua, y su posterior tratamiento e interpretación mediante modelos matemáticos, ofreciendo resultados precisos y eficientes, pudiéndose además aplicar con mayor facilidad a la escala de cuencas.

Finalmente, es importante destacar que la ABEN cuenta con un Laboratorio de Hidrología Isotópica, con tecnología nuclear de última generación, con un equipo de profesionales altamente especializados, para proporcionar estudios, análisis de isotopos, estable de agua oxígeno-18 y deuterio (D50 y D18) y radioisotopos de ración-222 (222Rn), además del desarrollo de investigaciones, proyectos, estudios y aplicaciones de la hidrología isotópica.

La docente docente de la UATF Gabriela Nolasco Ponce Arévalo, responsable del proyecto BOL 7005, dirige la misión científica en la Laguna Colorado.

La misión científica de la ABEN

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear tiene la misión de implementar y ejecutar la política en materia de tecnología nuclear, promover y desarrollar en el país la investigación en el campo de la ciencia y tecnología nuclear y sus aplicaciones, con fines pacíficos, operar las instalaciones nucleares en el marco del Programa Nuclear Boliviano (PNB), entre otras acciones.



FOTO: GABRIELA PONCE

Figura 3.2 Misión Científica de la ABEN Noticia publicada en el Periódico del Esta Plurinacional de Bolivia, disponible en [https://www.ahoraelpueblo.bo/aben-trabaja-en-la-evaluacion-de-los-recursos-hidricos/\(29/08/2021\)](https://www.ahoraelpueblo.bo/aben-trabaja-en-la-evaluacion-de-los-recursos-hidricos/(29/08/2021)).

3.3.2 Misión Científica de Campo en la zona transfronteriza piloto de la región hidrográfica del Amazonas (sector Municipio de Cobija)

La ABEN, en el marco de su Proyecto Científico: 'Prospección y Mapeo de la Disponibilidad y Sostenibilidad de los Recursos Hídricos en zonas Transfronterizas Piloto, de las tres regiones Hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia, mediante la aplicación de la Hidrología isotópica, 2022-2025' - FASE I - realizó tareas preliminares de visitas de inspección de campo para la validación y mapeo integrado de sitios de investigación estratégicos de fuentes de aguas superficiales y subterráneas mediante la aplicación de la hidrología isotópica (Radón-222), en la zona transfronteriza piloto de la región hidrográfica del Amazonas (sector Municipio de Cobija).

El objetivo del proyecto piloto en la región hidrográfica del Amazonas es identificar y cuantificar los mecanismos de interacción agua superficial - subterránea y su efecto en los ríos durante períodos de bajo caudal, mediante un enfoque multidisciplinario utilizando trazadores isotópicos: i) isótopos radioactivos de radón (^{222}Rn), ii) isótopos estables de oxígeno-18 y deuterio ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), y iii) trazadores hidroquímicos. Por lo que, en una etapa preliminar, se realizó la prospección y mapeo integrado de fuentes de aguas superficiales y subterráneas mediante la aplicación de la hidrología isotópica con la meta de definir una red de monitoreo y el posterior diseño de misiones científicas que se efectuarán tomando como parámetro un año hidrológico.

Así, del 23 al 28 de mayo de 2022, en base a un análisis técnico-científico, un Equipo de Científicos de la ABEN, realizaron visitas de inspección de campo para la validación y mapeo integrado, mediante la aplicación de la hidrología isotópica, de 24 sitios (fuentes de aguas superficiales y subterráneas), definiéndose en base a un diseño y análisis técnico-científico, 14 sitios de investigación estratégicos (símbolos verdes), donde se realizaron las tareas de: a) mediciones in-situ de parámetros físico-químicos, b) recolección de muestras, y c) mediciones de Radón-222 (Fotografía 3.7; Figura 3.3; Figura 3.4).



Fotografía 3.7 Memoria Fotográfica de cada sitio de investigación estratégico (punto cartográfico) validado en terreno por la ABEN, donde se realizaron las tareas de: i) validación y mapeo integrado, ii) mediciones in-situ, iii) recolección de muestras, y iv) mediciones de Radón-222.

Cont. Fotografía 3.7



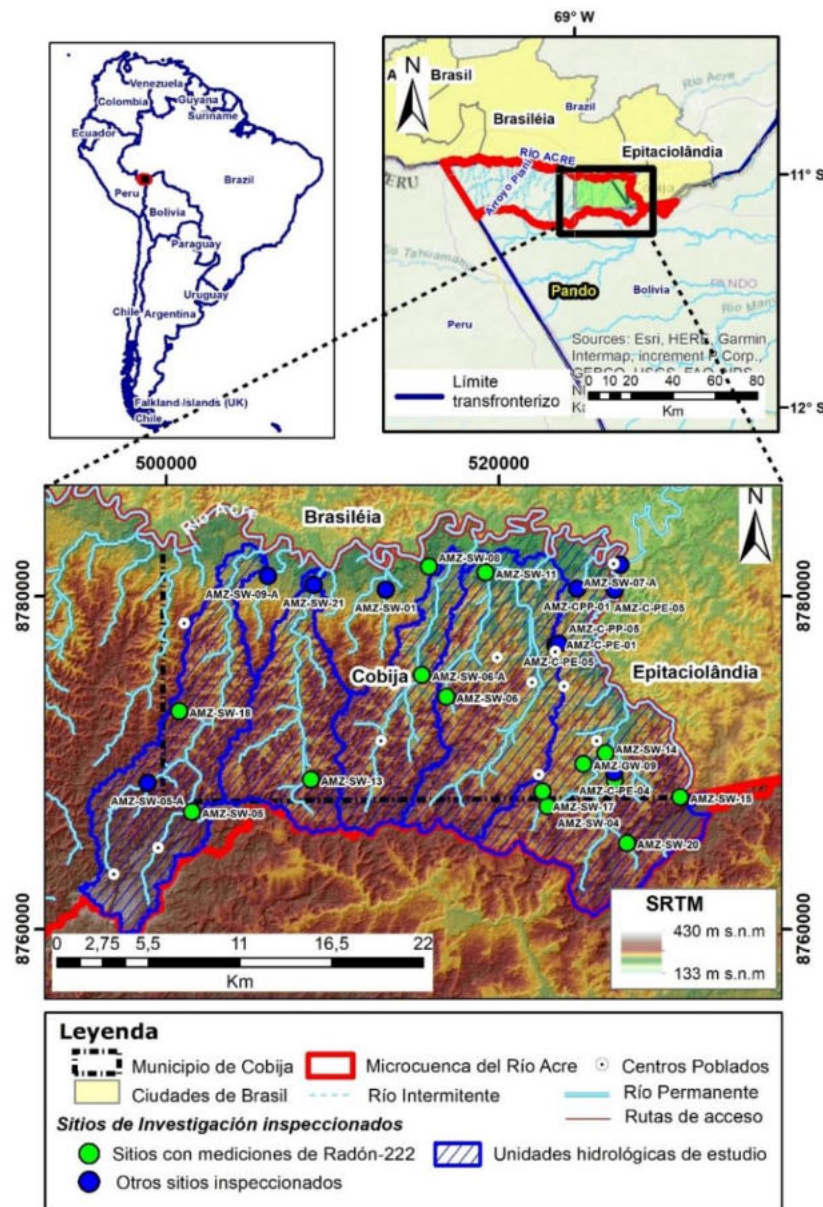


Figura 3.3 Mapa mostrando los sitios de investigación ubicados en la zona transfronteriza piloto de la Región Hidrográfica del Amazonas, localizada dentro del Municipio de Cobija. Los símbolos verdes y azules indican los sitios de investigación (fuentes de aguas superficiales o subterráneas) inspeccionados por la ABEN del 25 al 27 de mayo de 2022. En base a un análisis técnico-científico se definieron sitios de investigación estratégicos (símbolos verdes) en los cuales se realizaron las tareas de: i) validación y mapeo integrado, ii) mediciones in-situ, iii) recolección de muestras, y iv) mediciones de Radón-222. Los colores hipsométricos representan la elevación en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m) del terreno (DEM: SRTM 1-Arc-Second Global N.A.S.A, 2000).

Ahora
EL PUEBLO

www.ahoraelpueblo.bo

TIEMPO: 25/07/2022

11

Sociedad

• Williams Ramírez Urquiza

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) inició el primer proyecto nacional de investigación científica sobre la disponibilidad y la sostenibilidad de los reservorios de agua dulce transfronteriza en las tres cuencas hidrográficas del país: Amazónica, Altiplánica y de La Plata.

Gabriela Flores Avilés, científica boliviana de la ABEN, recorrió la cuenca del Amazonas localizada en el municipio de Cobija del departamento de Pando para examinar el agua.

“La ABEN cuenta con tecnología nuclear de punta, con el propósito de desarrollar este tipo de investigaciones, en este sentido el trabajo consiste en la recolección de muestras de aguas superficiales y subterráneas para que se puedan medir las concentraciones de actividad de Radón 222”, explicó la PhD. en Ciencias de la Tierra, Universo y Medio Ambiente, de la Universidad de Grenoble Alpes, Francia.

La primera tarea consistió en realizar inspecciones orientadas a la validación y el mapeo de sitios estratégicos de investigación de fuentes de aguas superficiales y subterráneas, mediante la aplicación de la hidrología isotópica, lo cual permitirá contar con información científica inicial sobre los mecanismos de interacción entre los acuíferos compartidos por Bolivia y Brasil, en el río Acre.

Según Flores, el mapeo sirvió para la identificación preliminar de 14 sitios de investigación que están ubicados en el municipio de Cobija y las ciudades de Brasileia y Ipiraciandia, situados en el Acre, en la República Federativa de Brasil, con la meta de definir una red de monitoreo y el posterior diseño de misiones científicas que se efectuarán tomando como parámetro un año hidrológico.

“Es importante generar información científica para comprender estos mecanismos (de interacción) que forman parte de la integridad ecológica de la región mediante la cual los reservorios de agua dulce subterráneos podrían mantener los ecosistemas acuáticos durante



Gabriela Flores Avilés, científica de la ABEN, en un río de la cuenca del Amazonas.

© FOTOS: ABEN

A TRAVÉS DE LA ESTATAL ABEN

Bolivia usará tecnología nuclear para investigar reservas de agua

La iniciativa es inédita en el país porque implicará el estudio de la concentración de radiotrazadores para examinar el líquido transfronterizo.

épocas de estiaje o sea en los periodos de baja caudal de los ríos”, mencionó.

De acuerdo con Flores, el proyecto científico que se prepara consistirá en la medición de un trazador que está presente de forma natural en los suelos, las rocas y el agua, denominado Radón 222, en las reservas acuíferas subterráneas, para luego estudiarlo con equipos de última generación del Laboratorio de Hidrología Isotópica del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) ubicado en El Alto.

El tratamiento e interpretación de los datos científicos obtenidos mediante modelos matemáticos permitirán identificar y cuantificar si las reservas hídricas superficiales y subterráneas en la Cuenca del Amazonas, en el sector del municipio de Cobija, están conectadas y si descargan sus aguas entre ellas.

“Es importante contar con información científica para conocer y comprender cómo

En el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) se examinarán las muestras.



“La ABEN cuenta con tecnología nuclear de punta, con el propósito de desarrollar este tipo de investigaciones”.

Gabriela Flores
Ingeniera Civil

están funcionando nuestros reservorios de agua dulce subterráneos, cuál es el origen de las aguas, cuál es su edad y la rapidez con la que se recarga el reservorio, cuáles son las zonas vulnerables a la contaminación, entre otros aspectos que pueden determinarse mediante la aplicación de la hidrología isotópica. La información permitirá contribuir a la gestión de aguas transfronterizas y al establecimiento

de acuerdos operativos entre los diferentes países que comparten recursos hídricos, de manera particular “acuíferos transfronterizos”, subrayó.

La ejecución del proyecto científico está prevista entre 2023 y 2024, y demandará una inversión importante que aún no fue señalada, por lo que se coordina la gestión de recursos económicos a través de la Dirección de Límites, Fronteras y Aguas Internacionales Transfronterizas de la Cancillería.

Figura 3.4 La ABEN cuenta con tecnología nuclear de punta. Noticia publicada en el Periódico del Esta Plurinacional de Bolivia, disponible en [https://www.ahoraelpueblo.bo/bolivia-usara-tecnologia-nuclear-para-investigar-reservas-de-agua/\(25/07/2022\)](https://www.ahoraelpueblo.bo/bolivia-usara-tecnologia-nuclear-para-investigar-reservas-de-agua/(25/07/2022)).

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Gracias a la implementación del Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN:

- Desarrolló un modelo del funcionamiento hidrogeológico de un importante reservorio de agua dulce transfronteriza compartida entre el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile y Argentina: Sistema Acuífero de la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada del Estado Plurinacional de Bolivia), basado en evidencia científica de isótopos estables de: Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deuterio ($\delta^2\text{H}$), Carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) y de isótopos inestables de: Tritio (^3H), Radiocarbono (^{14}C) y Radón-222 (^{222}Rn).
- Construyó una línea de base de datos científicos temporales y espaciales SIG, de: i) isótopos estables e inestables generados al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021, y de ii) datos científicos hidrológicos, hidrogeológicos, geofísicos, e hidrogeoquímicos, para el desarrollo de futuras investigaciones sobre recursos hídricos y/o para el apoyo de acciones a nivel local, nacional y regional.
- Verificó que los sitios de monitoreo con registros de isótopos estables de Deuterio y Oxígeno-18, y de Tritio radiactivo, de la Plataforma- Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP por sus siglas en inglés - próximas a la zona de estudio, actualmente se encuentran inactivas. Por lo que, resulta de gran importancia la implementación de colectores de precipitación para el monitoreo temporal de isótopos estables e inestables en precipitación, en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez.
- Gestionó con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Misión Virtual de una Experta, en el Manejo y Uso del Equipo de Radón RAD 7 - DURRIDGE y organizó el "Curso de Capacitación sobre la Medición de Radón-222 en Agua mediante el Detector Electrónico RAD 7, en el que participaron Ministerios, Institutos del Estado, y Universidades, del ámbito de los recursos hídricos.

- Gestionó con el OIEA, donaciones y/o envíos por un total de BOB 553.527,37 (Quinientos cincuenta y tres mil quinientos veinte siete con 37/100 bolivianos), con el propósito de mejorar la capacidad analítica del Laboratorio de Hidrología Isotópica de la ABEN mediante la dotación de tecnología nuclear de última generación y materiales de laboratorio, para el desarrollo de estudios analíticos, además del desarrollo de investigaciones, proyectos, estudios mediante aplicaciones de la hidrología isotópica.
- Realizó tareas preliminares para la instalación y puesta en marcha del Equipo Espectrómetro Láser (Sistema Analizador Isotópico de Agua en fase Líquida PICARRO L2130-i), con un Experto en Ingeniería Eléctrica y el Técnico Químico-Analista capacitado en el uso, ensamblaje, instalación, y manejo del Equipo Espectrómetro Láser.
- Diseñó, organizó, financió y ejecutó la Misión Científica de Campo 2021, en la Cuenca Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada), liderada por científicos de la ABEN con el apoyo de la Universidad Mayor de San Andrés y la Universidad Autónoma Tomás Frías de Potosí, donde se realizaron: i) mediciones in situ de pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad, ii) mediciones de radioisótopos de Radón-222, iii) mediciones hidrológicas e hidrogeológicas, y iv) la recolección de muestras para análisis de iones mayoritarios y metales, isótopos estables de Oxígeno-18 y Deuterio, y radioisótopos de Radiocarbono, en 25 puntos cartográficos (ríos, manantiales, vertientes, pozos de monitoreo y lagos) en la zona piloto Laguna Colorada.
- Realizó con éxito tareas preliminares de visitas de inspección de campo para la validación y mapeo integrado de sitios de investigación estratégicos de fuentes de aguas superficiales y subterráneas mediante la aplicación de la hidrología isotópica (Radón-222), en la zona transfronteriza piloto de la región hidrográfica del Amazonas (sector Municipio de Cobija), dando continuidad a la investigación científica en el Estado Plurinacional de Bolivia.
- Realizó las gestiones para la suscripción de un Convenio Marco de Cooperación Interinstitucional con el Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE), Institución que dispondrá de los datos e

información científica generada por la ABEN en la Cuenca Tierra de los López, con el propósito de establecer mecanismos de cooperación y la negociación en materia de la Gestión de Recursos Hídricos Transfronterizos, ante el Comité Intergubernamental Coordinador de la Cuenca Tierra de los López.

- Implementó con éxito la Fase I del Proyecto Científico 'Prospección y Mapeo de la Disponibilidad y Sostenibilidad de los Recursos Hídricos en zonas Transfronterizas Piloto, de las tres regiones Hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia, mediante la aplicación de la Hidrología isotópica, 2022-2025'.
- Benefició a la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) con la formación de recursos humanos y el fortalecimiento de la capacidad analítica de su laboratorio a través de la dotación de un espectrofotómetro de Absorción Atómica ANALYTIK JENA, lo cual también permitirá dar continuidad a la investigación científica dentro del sistema universitario público.

AGRADECIMIENTOS

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear agradece a todas las Instituciones que contribuyeron en la implementación del Proyecto Piloto en la CUENCA TRANSFRONTERIZA TIERRA DE LOS LÍPEZ: Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005 del Estado Plurinacional de Bolivia.

Estas Instituciones abarcaron Ministerios, Organismos Internacionales, Instituciones Académicas, entre otros, que se mencionan a continuación.

- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- Carrera de Ciencias Químicas (CCQ) - Facultad de Ciencias Puras y Naturales (FCPN) - Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz.
- Carrera de Ingeniería Civil - Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz.
- Carrera de Arquitectura - Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz.
- Carrera de Ciencias Químicas - Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), Potosí.
- Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE) - Dirección General de Límites, Fronteras y Aguas Internacionales Transfronterizas (DGLFAIT).



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

Calle 22 de Calacoto, Nro. 8232, entre Av. Montenegro y Adrián Patiño.
Edificio "Centro Empresarial Calacoto"
Telfs. 2127178 - 2127160 - Fax: (+591) 2 2129754
La Paz - Bolivia

www.aben.gob.bo



facebook.com/abeninforma



[@ABENinforma](https://twitter.com/ABENinforma)



[Aben.comunica](https://www.instagram.com/aben.comunica)