

## Groundwater age: principles and application of environmental tracers

Alejandro Basaldúa<sup>1,2\*</sup> , Emiliano Alcaraz<sup>1,2</sup> , Daniel Martínez<sup>1,2</sup> 

**Abstract** This work reviews the concept of groundwater age and its estimation through environmental tracers, with the objective of providing a didactic guide for hydrogeologists and professionals interested in approaching this field. The theoretical foundations of groundwater age studies are presented, including key terminology and the practical relevance of this tool as a complementary approach to understanding aquifer dynamics, recharge, vulnerability, and renewability. Groundwater age can be estimated from the concentration of environmental tracers, substances present in trace amounts whose measurement allows calculating the time elapsed since infiltration. This method provides information independent of traditional hydraulic approaches and is especially useful for calibrating numerical flow models in heterogeneous systems. The basic principles of application, the available types of tracers, the range of ages they cover and the main sources of error and uncertainty are described to clarify common misconceptions in their use. Furthermore, the text explains how age distributions within a single water sample affect measured tracer concentrations and the interpretation of ages, a key aspect for understanding the true dynamics of the system. It is concluded that the combined use of multiple tracers improves the precision and reliability of age estimations.

**Keywords** Groundwater age, dating, environmental tracers, age distributions, aquifer dynamics.

### La edad del agua subterránea: principios y aplicación de trazadores ambientales

**Resumen** Este trabajo revisa el concepto de edad del agua subterránea y su estimación mediante trazadores ambientales, con el objetivo de ofrecer una guía didáctica para hidrogeólogos y profesionales que deseen iniciarse en esta temática. Se presentan los fundamentos teóricos del estudio de edades, las principales terminologías y su relevancia práctica como herramienta complementaria para comprender la dinámica, la recarga, la vulnerabilidad y la renovabilidad de los acuíferos. La edad del agua puede estimarse a partir de la concentración de trazadores ambientales, sustancias presentes en niveles traza cuya medición permite calcular el tiempo transcurrido desde la infiltración. Este método aporta información independiente de los enfoques hidráulicos tradicionales y es especialmente útil para calibrar modelos numéricos de flujo en sistemas heterogéneos. Se describen los principios básicos de aplicación, los tipos de trazadores disponibles, los rangos de edad que cubren y las principales fuentes de error e incertidumbre, con el fin de aclarar conceptos erróneos comunes en su uso. Además, se explica cómo las distribuciones de edad dentro de una misma muestra afectan las concentraciones medidas y la interpretación de las edades, un aspecto clave para comprender la dinámica real del sistema. Se concluye que el uso combinado de varios trazadores mejora la precisión y confiabilidad de las estimaciones.

**Palabras clave** Edad del agua, datación, trazadores ambientales, distribuciones de edades, dinámica de acuíferos.

## INTRODUCCIÓN

El tiempo es un parámetro clave para evaluar la renovabilidad del agua subterránea y ha demostrado ser esencial para mejorar la comprensión de los sistemas acuíferos (Bethke y Johnson, 2008; Döll y Fiedler, 2008; Gleeson et al. 2010). Entre otros aspectos, permite estimar tasas de recarga, identificar el origen y la velocidad del flujo, calibrar modelos numéricos de flujo y transporte reactivo, y determinar tiempos de descontaminación y la sostenibilidad de las extracciones. Si bien la edad del agua no constituye un indicador directo de la sustentabilidad en el uso del recurso —ya que esta depende de factores como el volumen de reservas, la demanda y la calidad del agua—, su análisis puede contribuir de manera indirecta a un uso más sostenible del agua subterránea, a una gestión más eficiente del recurso y a la protección de los ecosistemas que dependen de él (Bethke y Johnson, 2008; Kralik, 2015; Ferguson et al. 2020). En particular, los acuíferos con una alta proporción de agua joven (de pocas décadas) son más vulnerables a contaminantes antropogénicos, como pesticidas y nitratos, y a los cambios en el uso del suelo y el clima debido a su conexión más directa con lo que sucede en superficie (Newman et al. 2010). Los trabajos de Corcho Alvarado et al. (2007), Visser et al. (2013), Suckow et al. (2018), Deslandes et al. (2019), Jurgens et al. (2022), Gourdol et al. (2023) y Campbell et al. (2024) son solo algunos ejemplos que demuestran cómo la aplicación de

<sup>1</sup> Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC), Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

\* Contacto: [basaldua.adb@gmail.com](mailto:basaldua.adb@gmail.com)

trazadores para determinar la edad del agua ha contribuido de manera significativa a la gestión del agua subterránea en diferentes regiones del mundo. Estos estudios permitieron evaluar el impacto de las prácticas de bombeo, las actividades mineras e industriales y el uso del suelo sobre la calidad y dinámica del agua subterránea, así como predecir tendencias futuras y facilitar decisiones informadas sobre la gestión del recurso y de los pozos destinados al abastecimiento de agua potable, incluyendo la implementación de medidas de protección en las zonas de captación.

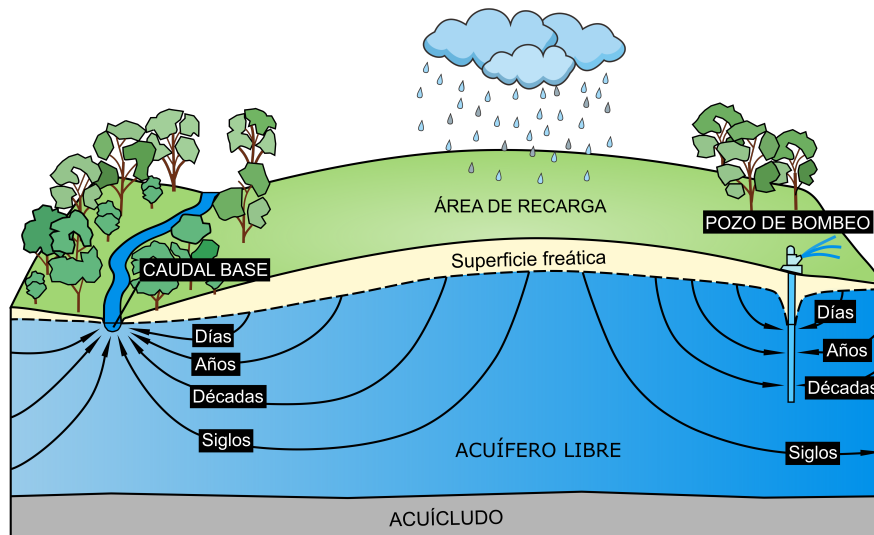
Además, la edad del agua permite establecer un vínculo entre dos enfoques de la hidrología (Bethke y Johnson, 2008). La hidrología física, por un lado, emplea la ley de Darcy, considerando la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico, para calcular la velocidad del flujo subterráneo. A partir de este parámetro, es posible derivar el tiempo de tránsito del agua en el acuífero para una distancia determinada. Los métodos de datación basados en trazadores calculan la edad del agua subterránea mediante el análisis de isótopos radiactivos o radiogénicos y otros trazadores ambientales, sin requerir información sobre las condiciones físicas del flujo. Por lo tanto, los dos enfoques son en gran medida independientes en sus suposiciones y requisitos de datos, pero idealmente deberían ofrecer resultados consistentes sobre la edad del agua dentro de un régimen de flujo. Adicionalmente, si a partir de las distancias recorridas y la distribución de edades obtenidas con trazadores se determina la velocidad de flujo, se puede aplicar la ley de Darcy para obtener una medida regional de conductividad hidráulica para escalas del sistema muy difíciles de alcanzar con ensayos de laboratorio o perforaciones (Bethke y Johnson, 2008).

El objetivo de este artículo es proporcionar una introducción clara y didáctica al concepto de edad del agua subterránea y a su estimación mediante trazadores ambientales, enfocándose en su aplicación práctica. Se busca aclarar los principios básicos, los tipos de trazadores disponibles, sus rangos de aplicación y las limitaciones asociadas, con especial atención a los errores comunes en su interpretación. Además, pretende destacar la utilidad de los trazadores como herramienta complementaria a los métodos hidráulicos tradicionales, especialmente en acuíferos heterogéneos, y fomentar una mejor interpretación de los resultados en estudios de dinámica y gestión de aguas subterráneas. Finalmente, se hace un repaso de algunas aplicaciones de la metodología en Argentina.

La definición más simple de “edad del agua” es la del tiempo que una parcela de agua pasa en la zona saturada, desde su ingreso en la superficie freática hasta un punto determinado cualquiera del acuífero (Bethke y Johnson, 2008; Newman et al. 2010; Torgersen et al. 2013; Cook, 2020), en otras palabras, es la diferencia de tiempo entre el último contacto de esa partícula de agua con el aire de los poros del suelo y su llegada a un punto específico cualquiera del acuífero. En la práctica, ese punto corresponderá al sitio donde se toma la muestra, como un pozo o una descarga natural como un manantial (Figura 1). Otros autores incluyen además el tránsito en la zona no saturada (ZNS), definiendo el “inicio” de la edad desde la infiltración en el subsuelo (Kazemi et al. 2006; Jurgens et al. 2012).

Siguiendo esta idea, las moléculas de agua viajarían desde el área de recarga del acuífero hacia el área de descarga como un paquete aislado siguiendo una línea de flujo, con mínima turbulencia y sin ninguna interferencia e intercambio con las moléculas que hay a su alrededor. Esta definición es directa y fácil de interpretar, ya que es análoga al concepto de edad de una persona, solo que en vez de un individuo humano la entidad aquí tratada es una porción de agua. Es la misma noción de edad del agua que se implica en el modelo flujo-pistón y es lo que la mayoría de los no especialistas tienen en mente al trabajar con este concepto (Suckow, 2014). Sin embargo, esta definición tiene dos grandes problemas:

1. El tritio ( $^3\text{H}$  o T) es el único trazador capaz de “datar” una molécula de agua, dado que forma parte de la misma (molécula HTO). Todos los otros trazadores de edad son sustancias disueltas que, en su trayecto hacia el lugar de muestreo, se ven afectadas en menor o mayor grado por diversos procesos fisicoquímicos y/o biológicos distintos a los que experimenta la parcela de agua de interés. Por lo tanto, no pueden proporcionar una edad que sea completamente equivalente a la del agua.
2. La edad de un volumen cualquiera de agua subterránea no corresponde a un único valor, sino a

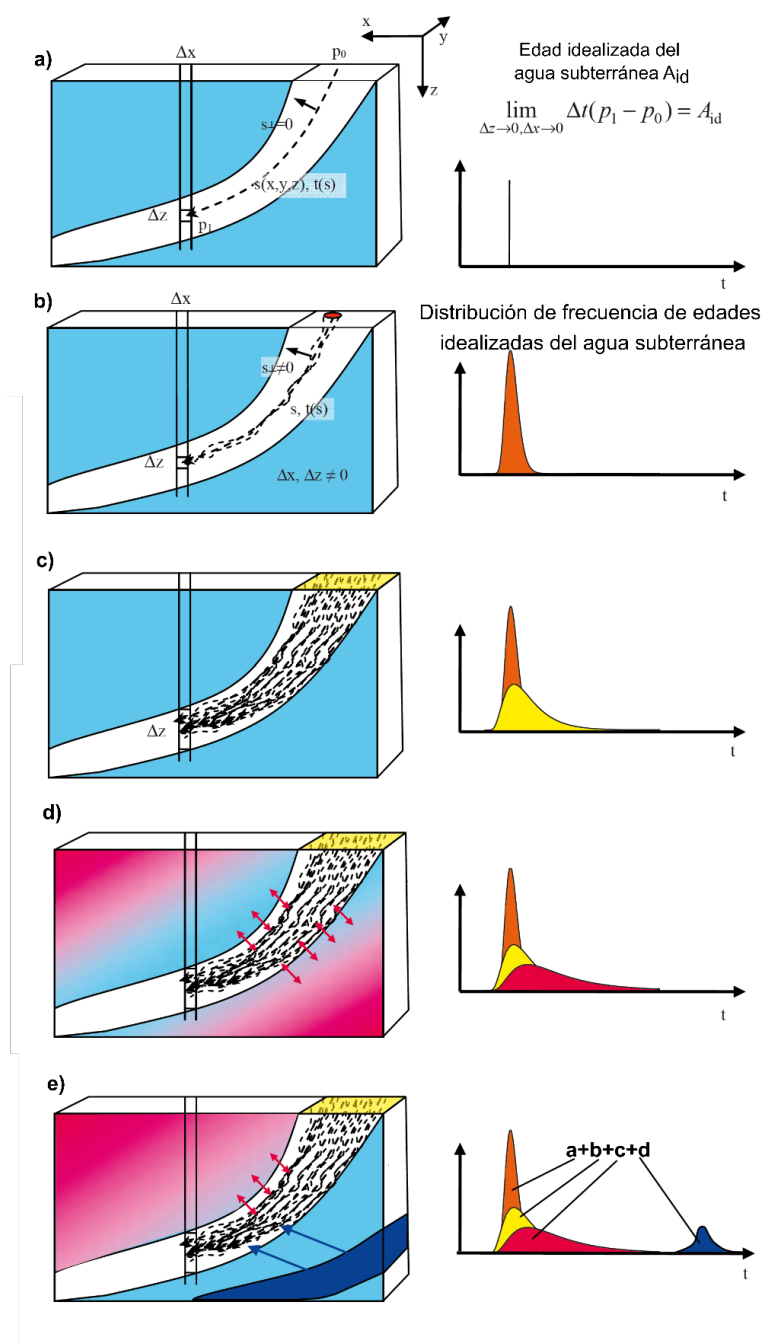


**Figura 1.** Esquema de líneas de flujo del agua subterránea en un acuífero libre mostrando su variabilidad en tiempos de tránsito desde los puntos de recarga.

una distribución de muchas edades diferentes (Clark y Fritz, 1997; Suckow et al. 2018). Esto se debe a que en una típica muestra de agua subterránea hay trillones de moléculas que han seguido caminos distintos hasta el punto donde fueron capturadas y que han transitado en el sistema por diversos periodos de tiempo (Torgersen et al. 2013). Como explica Suckow (2014), debido a la dispersión hidrodinámica, la difusión molecular y la convergencia de líneas de flujo, cuando una molécula de agua llega al punto de muestreo tras años, décadas o milenios de circulación subterránea, sus moléculas vecinas originales (las que ingresaron junto a ella durante la infiltración) probablemente se encuentren a kilómetros de distancia. Por esta razón, una muestra de agua subterránea no puede representarse adecuadamente mediante un único valor escalar de edad (Figura 2a), sino que debe caracterizarse por una distribución de frecuencias de edades y su edad media asociada. Esta distribución puede describirse mediante una función estadística que indica con qué frecuencia ocurre cada edad dentro del conjunto (Maloszewski y Zuber, 1982).

La dispersión y la difusión a lo largo de una línea de flujo provocan que las distribuciones de edades se ensanchen. Solo en situaciones excepcionales, como en sistemas fuertemente dominados por la advección y donde las muestras se obtienen en pozos con filtros cortos (que capturan pocas líneas de flujo), las distribuciones de edades pueden aproximarse a una forma simétrica similar a la distribución normal (Figura 2b). Zuber (1986) ilustra cómo cuando la dispersión es un proceso importante, la distribución de edades tiende a ser asimétrica, con una cola hacia edades mayores, y el máximo en su derivada temporal puede no corresponder a la edad media (Figura 2c). Además, distintas distribuciones de edades pueden tener la misma edad promedio. Por eso, aunque resulte tentador caracterizar la “edad” de una muestra usando medidas centrales como la media, la moda o la mediana, esta simplificación puede ser engañosa. Es fundamental identificar qué tipo de distribución estadística describe mejor el conjunto de datos.

En acuíferos libres, el agua tiende a ser más antigua a mayor profundidad, lo que genera un “gradiente de edad” (Fontes, 1983; Clark y Fritz, 1997; Solomon et al. 2006). Este aspecto es clave al momento de tomar muestras, ya que los filtros de pozo (a menos que estén diseñados específicamente con longitudes sumamente cortas) suelen interceptar múltiples líneas de flujo de distintas profundidades, provenientes de diferentes zonas de recarga y con tiempos de tránsito variados. Esto amplía la distribución de edades más allá de lo esperable por la dispersión y difusión natural solamente (Figura 2c). No obstante, el grado en que un pozo captura efectivamente todas las líneas de flujo depende de múltiples factores, como el diseño de las áreas filtrantes de la perforación, la ubicación de la bomba, la tasa de extracción y las heterogeneidades propias del acuífero (International Atomic Energy Agency, 2006).



**Figura 2.** Visualización de los distintos procesos y niveles de complejidad asociados a la datación de una muestra de agua subterránea extraída de un pozo con un filtro de longitud  $\Delta z$ . Figura modificada de Torgersen et al. (2013). a) Caso idealizado, donde al no haber procesos de mezclas y dispersión, y un filtro pequeño, la muestra de agua subterránea corresponde a una edad única (modelo flujo-pistón). b) Incluso en sistemas unidimensionales simples y con pozos de filtros cortos, la muestra corresponde a un conjunto de moléculas que han seguido múltiples trayectorias de transporte, desviando cualquier valor idealizado de edad hacia una distribución de edades diversas. c) En sistemas más realistas, la dispersión transversal genera mezclas que amplían la distribución de edades del agua subterránea, aumentando la desviación estándar y generando una cola hacia edades más antiguas. d) El agua proveniente de acuitardos puede mezclarse con la del acuífero, y como suele tener una edad considerablemente mayor, esta interacción genera una cola larga y asimétrica hacia las edades más antiguas en la distribución de edades. e) La convergencia de flujos provenientes de diferentes capas acuíferas puede generar mezclas con distribuciones de edades bimodales.

Además de la mezcla causada por la dispersión y el gradiente de edad, el agua que proviene de acuitardos (con edades significativamente mayores) puede incorporarse al flujo del acuífero (Figura 2d). A su vez, la propia estructura estratificada del acuífero puede facilitar la convergencia

de flujos de distintas procedencias. Este tipo de mezcla produce distribuciones de edad bimodales, donde coexisten en una misma muestra componentes de flujo con historias hidrogeológicas diferentes (Figura 2e). Estas complejidades han llevado a que, en los últimos años, algunos especialistas cuestionen el uso del término “edad” en hidrogeología (p. ej., Suckow (2014)), ya que suele asociarse intuitivamente a la edad de un individuo, lo cual puede inducir a interpretaciones erróneas. Por eso, términos como “tiempo de tránsito”, “tiempo de viaje” o “tiempo de residencia” han ganado terreno en la literatura reciente.

Finalmente, a modo de corolario, se puede decir que para lograr una interpretación más realista de la edad del agua subterránea es fundamental:

- Comprender que una muestra de agua subterránea no puede representarse adecuadamente con un único valor de “edad”, sino mediante una distribución de frecuencias de edades con una edad media asociada.
- Reconocer que la forma de la distribución de edades puede aportar información tan o más relevante que el valor medio.
- Considerar que la interpretación de esa distribución requiere conocer los procesos que gobiernan el flujo hacia el punto de muestreo.
- Recordar que ni la edad del agua ni su distribución pueden medirse de forma directa. Su estimación depende de trazadores (edad del trazador) o de modelos basados en la física del transporte de masa (edad hidráulica) y que, por ende, su estimación siempre estará asociada a incertidumbres.

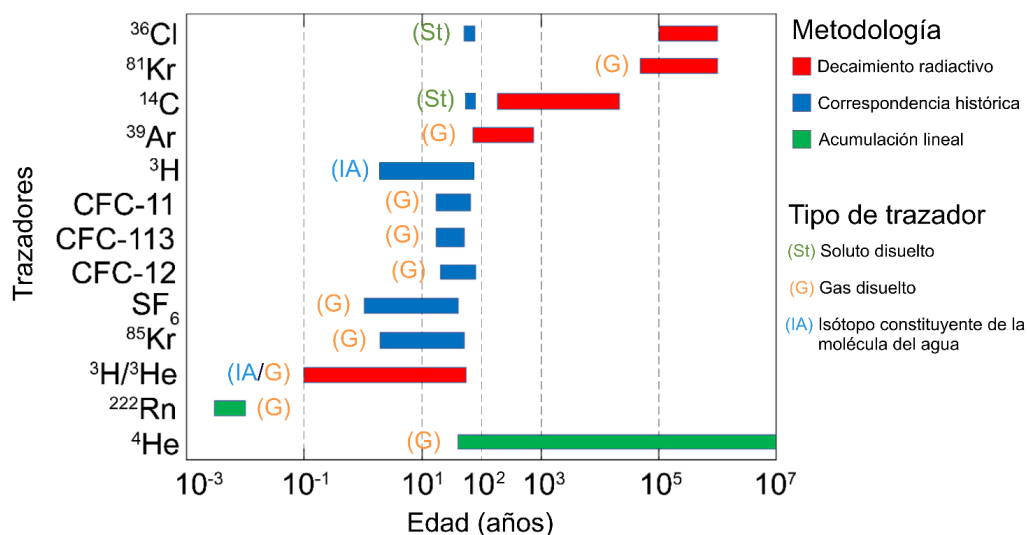
### **Clasificación temporal del agua subterránea: criterios, términos y limitaciones**

Aunque los términos “agua joven” y “agua vieja” son comúnmente empleados en la literatura hidrogeológica, no existe un consenso establecido sobre la edad precisa que define cada categoría. Diversos estudios han propuesto límites que sitúan las aguas jóvenes en diferentes intervalos temporales, variando en un rango desde los 1000 años (Newman et al. 2010; Torgersen et al. 2013), los 100 años (Gleeson et al. 2016), y entre 50 o 60 años (Cook y Solomon, 1997; Kazemi et al. 2006; Plummer y Busenberg, 2006; Corcho Alvarado et al. 2007). En cualquier caso, es imperativo señalar que la clasificación de las aguas subterráneas por rangos de edad está condicionada principalmente por las escalas temporales que pueden resolverse con los métodos de datación disponibles.

Plummer y Busenberg (2006) definen el agua joven como aquella fracción de una muestra de agua que presenta actividades de  $^{14}\text{C}$  mayores a 100 pMC (porcentaje de carbono moderno) y concentraciones detectables de  $^3\text{H}$ , clorofluorocarbonos (CFCs) y otras sustancias mayormente antropogénicas como el  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $\text{SF}_6$ , pesticidas y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Estas sustancias experimentaron un notable aumento en sus concentraciones atmosféricas durante la segunda mitad del siglo XX, especialmente el  $^3\text{H}$  debido a las pruebas termonucleares que provocaron un máximo en su contenido en las precipitaciones a finales de la década de 1950 y principios de la década de 1960. Por este motivo, muchos especialistas adoptan un umbral de aproximadamente 50 o 60 años para definir el agua joven, en referencia a este “pico de bomba”.

No obstante, es crucial tener en cuenta que, con el paso del tiempo, los efectos del decaimiento radiactivo, la dispersión y la mezcla atenúan la señal de dicho máximo histórico. Actualmente han transcurrido cerca de 60 años desde el pico de bomba en el hemisferio sur (1965), y aunque su expresión se ha reducido, aún es detectable alrededor de 2 UT (unidades de tritio) en Argentina (Basaldúa et al. 2022). Por lo tanto, delimitar el agua joven como aquella infiltrada hace unos 60 años sigue siendo un criterio aceptado. Otros términos que se pueden hallar en la bibliografía para describir a aguas jóvenes posteriores a la primera mitad del siglo XX son los de “agua de post-bomba” (Corcho Alvarado et al. 2007), “agua moderna” (Clark y Fritz, 1997; Gleeson et al. 2016) e incluso “agua del Antropoceno” (Jurgens et al. 2022; Zalasiewicz et al. 2017).

El uso de este rango temporal es conveniente por varias razones. El agua subterránea joven suele encontrarse a profundidades de entre 0 y 50 metros en sedimentos no consolidados. Estos sistemas



**Figura 3.** Trazadores ambientales de edades del agua subterránea más comúnmente utilizados y sus rangos temporales de aplicación. Los rangos de aplicación dependen de la historia de la entrada del trazador en la atmósfera, su tiempo de semidesintegración y/o los límites de detección analíticas asociados. Imagen modificada de Cook (2020).

someros son una fuente habitual de agua potable y aportan un caudal significativo al flujo base de ríos y lagos (Jankovec et al. 2017). Los tiempos de tránsito cortos y baja profundidad implican una mayor vulnerabilidad a la influencia antrópica, incluyendo contaminación superficial, prácticas agropecuarias inadecuadas y los efectos del cambio climático, lo que restringe su valor como recurso para consumo humano o industrial (Bethke y Johnson, 2008; Kralik, 2015; Gleeson et al. 2016).

Siguiendo la clasificación de Kazemi et al. (2006), las “aguas viejas” son aquellas libres de trazadores de aguas jóvenes y que se encuentran dentro del rango de datación del  $^{14}\text{C}$ , es decir, hasta aproximadamente 45 mil años (Plummer y Glynn, 2013). Sin embargo, en aguas de más de aproximadamente 30 mil años las concentraciones de radiocarbono son tan bajas que la contaminación atmosférica durante la toma y el análisis de muestras introduce contenidos mínimos que hacen que, aún aguas libres de  $^{14}\text{C}$ , puedan resultar en edades cercanas al límite de aplicación del método (Aggarwal et al. 2013; Han y Wassenaar, 2020). Por ello, muchos autores (p. ej., Suckow et al. (2020), Matsumoto et al. (2020) y Martínez et al. (2022)) limitan la posibilidad de datación con  $^{14}\text{C}$  para aguas subterráneas hasta los 30 mil años. Estas aguas presentan concentraciones de  $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $\text{SF}_6$  y CFCs por debajo del límite de detección, actividades de  $^{14}\text{C}$  en el carbono inorgánico disuelto inferiores a 100 pMC y/o exceso de He disuelto respecto al equilibrio aire/agua producto de la (lenta) generación subterránea de este gas (Plummer y Busenberg, 2006). Las aguas subterráneas viejas están ampliamente distribuidas en todo el mundo y son especialmente importantes en zonas áridas y semiáridas, donde representan un recurso esencial.

La datación de aguas viejas requiere menor resolución que la de aguas jóvenes. Por ejemplo, no implica una gran diferencia para la gestión hídrica si un análisis por  $^{14}\text{C}$  estima una edad de 10 o 12 mil años. En cambio, para el agua joven se necesita precisión en escalas decenales, anuales o incluso menores, para evaluar procesos o cambios que ocurren rápidamente (Newman et al. 2010). Idealmente, como se explicará más adelante, el reconocimiento de mezclas de agua joven y vieja debe basarse en un enfoque multi-trazador dado que los distintos métodos cubren rangos de edad complementarios (Figura 3).

Las “aguas muy viejas” son aquellas que llevan varias decenas de miles a millones de años en el sistema subterráneo y pueden ser datadas con técnicas que cubran el rango de entre 50 o 100 mil años a poco más de 10 millones de años (Kazemi et al. 2006). Estas aguas no contienen  $^{14}\text{C}$  por lo que se requiere análisis de isótopos con periodos de semidesintegración aún más largos, como  $^{81}\text{Kr}$  y  $^{36}\text{Cl}$ , o isótopos radiogénicos con tasas de acumulación prolongadas, como  $^{40}\text{Ar}$  y  $^4\text{He}$ .

Otros términos que se pueden hallar en la literatura y que se solapan con los anteriores son los de “agua fósil” o “paleoaguas” y “agua muerta”. Agua subterránea “fósil” o “paleoaguas” son términos que se utilizan como sinónimos para describir el agua subterránea que se recargó a través de la precipitación hace más de 12 mil años, antes del Holoceno (Jasechko et al. 2017; De Jong et al. 2020). Por otro lado, el término “agua muerta” se refiere a cuerpos de agua subterránea estancada, ubicados en capas aisladas de acuíferos regionales profundos, sin conexión hidráulica efectiva con el agua subterránea circundante y, por lo tanto, desvinculados del ciclo hidrológico moderno (Mazor y Nativ, 1992).

Por último, es habitual encontrar en la bibliografía referencias a un año de infiltración aproximado que separa distintas categorías temporales del agua subterránea. Por ejemplo, Plummer y Busenberg (2006) proponen el límite entre aguas jóvenes y viejas en la década de 1940, con el fin de diferenciar aquellas que contienen trazas detectables de  $^3\text{H}$  y CFCs de las que no las presentan. Sin embargo, este criterio no es absoluto, ya que el paso del tiempo modifica su aplicabilidad. Cuando Plummer y Busenberg (2006) publicaron su trabajo, la diferencia temporal entre la década de 1940 y los años 2000 era de unos 60 años, mientras que actualmente supera los 80 años. Este corrimiento temporal implica que el  $^3\text{H}$  infiltrado en la década de 1950 puede haber decaído hasta niveles indetectables, lo que dificulta la clasificación del agua como joven o vieja. Este efecto es especialmente relevante en el hemisferio sur, donde las concentraciones máximas de  $^3\text{H}$  fueron entre uno y dos órdenes de magnitud menores que en el hemisferio norte (International Atomic Energy Agency, 1992).

## DATACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA CON TRAZADORES AMBIENTALES

El análisis de tasas de flujo y tiempos de tránsito en sistemas subterráneos heterogéneos presenta dificultades cuando se recurre a métodos hidráulicos tradicionales, debido a la alta variabilidad espacial de parámetros como la permeabilidad y la porosidad. Como alternativa o complemento, las técnicas basadas en “trazadores ambientales” permiten obtener información clave sobre el sistema de forma relativamente sencilla y económica (Newman et al. 2010; Suckow, 2014). Un trazador es una sustancia presente en concentraciones traza, sin afectar el sistema, cuyo comportamiento permite obtener información sobre el sistema o alguna de sus partes (Figura 3). Para cumplir esta función, el trazador debe poseer al menos una característica distintiva respecto al material que se estudia (es decir, el agua del acuífero). La aplicación de trazadores ha demostrado su utilidad durante las últimas décadas, con beneficios que superan con creces cualquier complicación inherente al método (Newman et al. 2010; Suckow, 2014). La descripción general, la aplicabilidad y el significado de los trazadores disponibles para la datación de aguas subterráneas han sido ampliamente abordados por diversos autores (p. ej., Clark y Fritz (1997), Cook y Solomon (1997), Cook y Herczeg (2000), Lu et al. (2014) y Cartwright et al. (2017)).

Para que un trazador de la edad del agua subterránea sea considerado como “ideal”, debe replicar exactamente el transporte y la mezcla del agua (es decir, de las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ ) con la que fluye. Para lograr esto, un trazador ideal: (i) no debería estar sujeto a reacciones químicas que afecten su concentración y (ii) debería experimentar una dispersión idéntica a la de las moléculas de agua. Estas condiciones deberían hacer que el trazador tenga una distribución de edades que coincida con la de las moléculas de agua (Torgersen et al. 2013). El término “trazador ambiental” hace referencia a los trazadores que son incorporados al sistema de aguas subterráneas por procesos naturales, como las precipitaciones o el intercambio gaseoso. Sin embargo, su producción e ingreso previo a la atmósfera puede ser tanto por fenómenos naturales como resultado de la actividad del ser humano (Maloszewski y Zuber, 2000).

El uso de trazadores ofrece ventajas sobre los métodos convencionales al brindar información sobre sistemas hidrológicos con un proceso de muestreo, análisis e interpretación de datos relativamente menos complejo (Leibundgut et al. 2009). Datos recolectados en unos pocos sitios cuidadosamente seleccionados pueden ser suficientes para desarrollar y verificar modelos conceptuales de flujo y transporte de aguas subterráneas (Corcho Alvarado et al. 2007; Osenbrück et al. 2006; Visser et al. 2013). Además, los trazadores son una de las herramientas más eficaces para comprender el comportamiento de sistemas de aguas subterráneas complejos y heterogéneos, con alta variabilidad

espacial en sus parámetros físicos. Esto se debe a que la edad estimada mediante trazadores en un punto del sistema integra los tiempos de tránsito del agua proveniente de todo el flujo aguas arriba, lo que condensa más información sobre el sistema que una propiedad física medida localmente, como la porosidad o la permeabilidad obtenida en una muestra puntual de sedimento o en un ensayo de bombeo (Solomon y Gilmore, 2024). Incluso en un nivel semicuantitativo, la presencia o ausencia de trazadores ambientales como el  $^3\text{H}$ , los CFCs y el  $\text{SF}_6$  puede ofrecer información crucial sobre la dinámica del flujo y los aspectos temporales del agua subterránea, permitiendo, por ejemplo, distinguir rápidamente entre agua subterránea vieja y joven (Newman et al. 2010).

El tiempo es un factor fundamental en la renovabilidad del agua subterránea y desempeña un papel crucial en la evaluación de su sostenibilidad. Por ello, la determinación de la edad del agua subterránea se ha convertido en uno de los métodos más utilizados para analizar la dinámica de recarga y la gestión del recurso. La información de tiempos de tránsito proporcionada por trazadores ambientales tiene una amplia gama de aplicaciones (International Atomic Energy Agency, 2006; Leibundgut et al. 2009; Newman et al. 2010; Suckow, 2014; Cook, 2020), entre las que se incluyen:

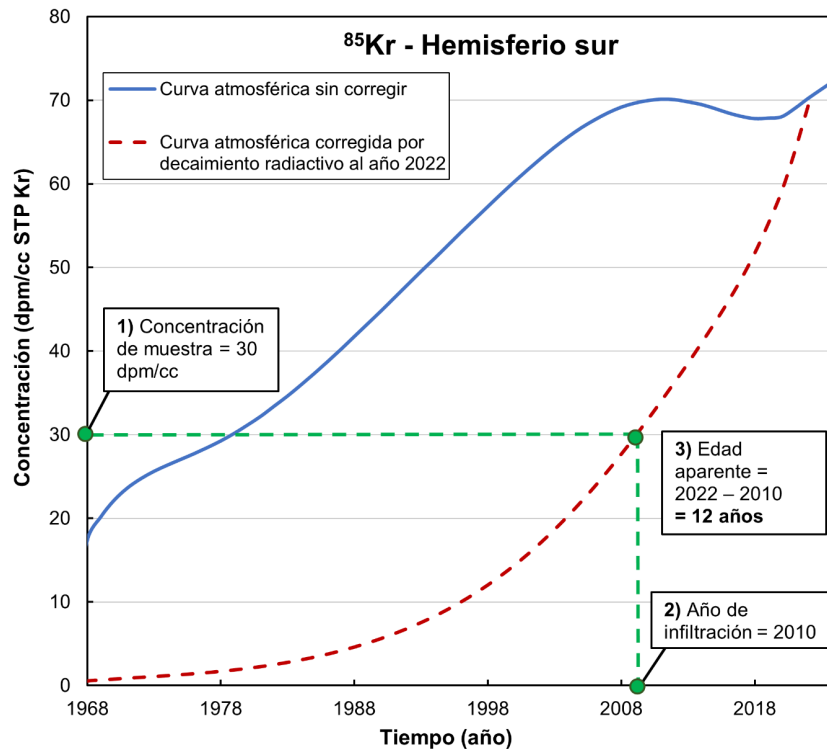
- Cuantificación de tasas de recarga.
- Evaluación de vulnerabilidad a la contaminación.
- Investigación de la mezcla de aguas subterráneas.
- Determinación de velocidades de flujo.
- Estudio de la interacción entre aguas subterráneas y superficiales.
- Calibración de modelos de aguas subterráneas.
- Determinación de la dispersión.
- Análisis de la evolución geoquímica.
- Reconstrucción de condiciones paleoclimáticas.
- Seguimiento de la historia y fuentes de contaminación.
- Investigación del flujo a través de fracturas.

Una de las principales aplicaciones de los trazadores de edad es calibrar modelos numéricos de flujo. Al proporcionar datos independientes de la información hidráulica convencional, los trazadores pueden imponer restricciones adicionales a los modelos numéricos, lo que ayuda a reducir las incertidumbres asociadas con los parámetros utilizados en la simulación, ofreciendo así una perspectiva más sólida y eficiente. Sin embargo, se debe decir que es generalmente preferible calibrar estos modelos directamente con las concentraciones de los trazadores en vez de las edades, ya que estas últimas no son mediciones sino derivaciones de las primeras con las incertidumbres, errores y soluciones no únicas que esto conlleva (Newman et al. 2010; Suckow, 2014).

### Principios de datación con trazadores

La técnica de determinación de tiempos de tránsito con trazadores se basa en la premisa de que la concentración del trazador en una muestra de agua subterránea retiene una señal distintiva del tiempo transcurrido desde que entró a la zona saturada. Esto es posible gracias a que el acuífero actúa como un sistema cerrado respecto a la atmósfera, conservando la concentración inicial del trazador o un indicio de la misma una vez que éste entra al sistema. La curva temporal que describe la concentración inicial del trazador en la zona de recarga del área de estudio (es decir, donde el tiempo de tránsito es igual a cero) se conoce como la “función de entrada” del trazador. Conocer esta función de entrada en el área de estudio es un requisito fundamental para aplicar la técnica.

Para que un trazador pueda ser utilizado para obtener edades del agua es fundamental que el mismo cumpla al menos una de las siguientes dos condiciones: (i) tener una función de entrada variable



**Figura 4.** Ejemplo de estimación de la edad aparente de una muestra de agua subterránea mediante la medición de su concentración de  $^{85}\text{Kr}$ . En este caso, se mide un valor de 30 dpm/cm<sup>3</sup> en una muestra tomada en 2022. A partir de ese dato, se identifica el año en el que la atmósfera tuvo esa concentración (utilizando la curva histórica de  $^{85}\text{Kr}$  corregida por decaimiento radiactivo hasta el año de muestreo). La diferencia entre el año de muestreo y el año de infiltración proporciona la edad aparente del agua (2022 – 2010 = 12 años).

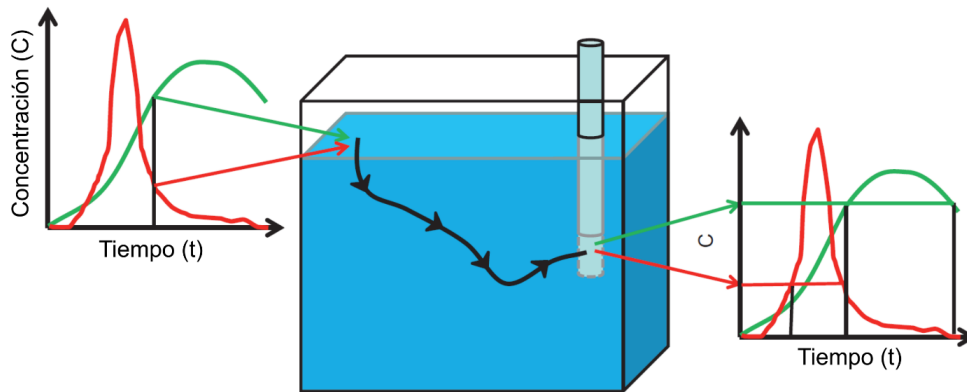
con el tiempo y/o (ii) que la disminución o aumento subsiguiente del trazador dentro del acuífero se produzca a una tasa conocida y predecible (p. ej., tiempo de semidesintegración de un trazador radiactivo). En otras palabras, una sustancia con un ingreso constante al sistema hidrogeológico y cuya concentración interna en el mismo no varíe con el tiempo no podrá ser utilizada como trazador de edad.

Siguiendo estos principios, se pueden distinguir de manera general tres modalidades en las que operan los trazadores de edad (Bethke y Johnson, 2008; Solomon y Gilmore, 2024) y que se explican a continuación. Las edades obtenidas de esta manera no implican una distribución ni una mezcla de edades dentro del volumen de agua analizado, y tampoco necesariamente representan la edad media de dicha mezcla. Por este motivo, es más apropiado utilizar los términos “edad aparente”, “edad flujo-pistón” o “edad del trazador” para las mismas.

#### *Métodos de correspondencia histórica (p. ej., CFCs, SF<sub>6</sub>, <sup>3</sup>H, <sup>85</sup>Kr)*

El principio de este método es simple: correlacionar la concentración medida del trazador con el o los momentos del pasado en los que la concentración en la recarga fue igual (Figura 4). Para que esto sea posible, es fundamental que la función de entrada del trazador haya variado con el tiempo. Además, en el caso de isótopos radiactivos como el <sup>3</sup>H y el <sup>85</sup>Kr, es necesario corregir las concentraciones iniciales por decaimiento radiactivo hasta la fecha de muestreo (curva roja discontinua en la Figura 4).

Este enfoque se basa en el uso de trazadores que eran escasos o inexistentes antes de la era industrial y que fueron liberados a la atmósfera en los últimos 60 años, siendo empleados principalmente para datar agua subterránea recargada recientemente. Cada trazador tiene una historia particular de introducción atmosférica: algunos se incorporaron en forma de pulsos, como el caso del “pico de bomba” del <sup>3</sup>H, mientras que otros muestran un aumento gradual y sostenido, como el <sup>85</sup>Kr y el SF<sub>6</sub> (Bethke y Johnson, 2008).



**Figura 5.** Las curvas verde y roja representan las funciones de entrada de dos trazadores distintos. Debido a que la concentración medida en el pozo para un trazador permite deducir dos momentos en el tiempo, se necesitará de la combinación de ambos trazadores para derivar un valor único en el eje del tiempo (línea negra central que coincide con las concentraciones roja y verde en el eje del tiempo). Imagen modificada de Suckow (2014).

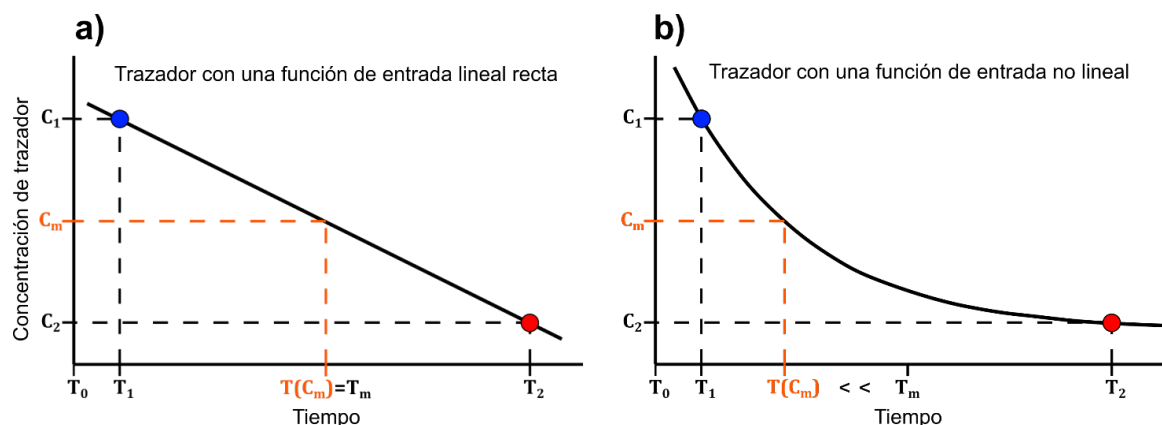
Cuando la función de entrada de un trazador presenta un máximo o forma de “campana”, asignar una edad única a una muestra puede resultar complejo. Una misma concentración medida para un único trazador puede corresponder a dos momentos distintos: uno en la fase ascendente y otro en la descendente de la curva (o incluso más, si la función de entrada tiene múltiples picos), como se ilustra en la [Figura 5](#).

En ausencia de mezclas o distribuciones amplias de edades en una misma muestra (situación más compleja que se abordará más adelante), esta ambigüedad puede resolverse midiendo dos o más trazadores en la misma muestra. Por ejemplo, una muestra de agua subterránea recolectada en 2020 en la región de Cuyo con una concentración de 3.5 unidades de tritio (UT) podría corresponder a agua infiltrada en 1970 o en 2007 (función de entrada tomada de Basaldúa et al. (2022)). Sin embargo, si para la misma muestra se determina la concentración de CFC-12 y se obtiene un valor cercano a 538 pptv (función de entrada tomada de Dutton et al. (2024)), se puede deducir que la recarga ocurrió en 2007. En este caso, la muestra tendría una edad aparente de 13 años, descartando las demás posibilidades.

*Métodos basados en el decaimiento radiactivo asintótico (p. ej.,  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ )*

Este método se basa en el uso de radioisótopos con una concentración inicial la cual decae con el tiempo a una tasa conocida una vez que ingresan al acuífero. Esta tasa de desintegración radiactiva es completamente independiente de cualquier parámetro ambiental y solo depende del tiempo de semidesintegración del átomo (Clark y Fritz, 1997). Se pueden emplear tanto las concentraciones finales del par padre-hija (p. ej.,  $^3\text{H}/^3\text{He}$ ) como únicamente la del isótopo padre en la muestra. Sin embargo, en este último caso, es necesario que la concentración inicial del isótopo en el sistema sea constante con el tiempo y conocida (p. ej.,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{14}\text{C}$  y  $^{39}\text{Ar}$ ). Por ejemplo, el  $^3\text{H}$ , especialmente durante el siglo XX, no entraría en esta categoría, dado que su concentración atmosférica puede variar varias órdenes de magnitud dependiendo del año y la ubicación geográfica (Solomon y Gilmore, 2024). Este método proporciona un valor numérico de tiempo sin hacer suposiciones sobre la mezcla de diferentes edades. La edad de una muestra está dada por la [ecuación 1](#) para un sistema cerrado. Para calcularla solo se necesita conocer la concentración inicial del radioisótopo en la recarga ( $C_0$ ), su concentración medida en la muestra en un momento  $t$  ( $C(t)$ ) y su constante de desintegración radiactiva ( $\lambda$ ), que es proporcional a la inversa de la vida media (unidades de tiempo $^{-1}$ ):

$$A = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{C_0}{C(t)} \right] \quad (1)$$



**Figura 6.** Efecto de la geometría de la función de entrada del trazador en la edad aparente obtenida para una misma mezcla idealizada de 50% agua joven (recargada en un tiempo  $T_1$ , punto azul) y 50% de agua más vieja (recargada en un tiempo  $T_2$ , punto rojo). a) Una geometría lineal dará una edad aparente igual a la edad media de la mezcla. b) Una geometría cóncava dará una edad aparente menor que la edad media de la muestra. Imagen basada en Cook (2020).

Cuando se utiliza el par  $^3\text{H}/^3\text{He}$ , la concentración inicial del radioisótopo padre en la muestra puede ser reemplazada por la suma de las concentraciones medidas del par padre-hija ( $^3\text{H}(t) + ^3\text{He}_{\text{trit}}(t)$ ), donde  $^3\text{He}_{\text{trit}}(t)$  es la concentración de  $^3\text{He}$  de origen tritogénico en la muestra). Siendo  $\lambda$  para el  $^3\text{H}$  igual a  $0.05626 \text{ años}^{-1}$ , la ecuación 1 se puede reescribir como

$$A = 17.77 \text{ (años)} \ln \left[ 1 + \frac{^3\text{He}_{\text{trit}}(t)}{^3\text{H}(t)} \right] \quad (2)$$

Debido a que la concentración de un radioisótopo disminuye de forma exponencial con el tiempo, las edades calculadas en muestras que contienen mezclas de aguas de distintas edades suelen ser menores que la edad promedio real del conjunto. Esto ocurre porque el método tiende a dar mayor peso a las fracciones más jóvenes de la mezcla, donde la concentración del trazador es relativamente más alta (Bethke y Johnson, 2008). Ver Figura 6 para más información sobre este efecto.

#### Métodos basados en acumulación lineal (p. ej., $^4\text{He}$ y $^{40}\text{Ar}$ )

Esta técnica utiliza isótopos estables que se generan de forma natural en el subsuelo y se acumulan en el agua subterránea a una tasa conocida y prácticamente lineal. Por lo general, estos trazadores son productos del decaimiento radiactivo de elementos presentes en los sedimentos, con tiempos de semidesintegración largos, lo que los hace adecuados para datar aguas subterráneas viejas o muy viejas. Debido a la lentitud de la desintegración, tanto la abundancia de los radioisótopos en el sistema como la tasa de producción de los isótopos hijos pueden considerarse constantes. Esto hace que la acumulación de estos trazadores con el tiempo sea esencialmente lineal (Bethke y Johnson, 2008), lo cual representa una ventaja frente a otros métodos, ya que las edades flujo-pistón obtenidas con estos trazadores coincidirán con la verdadera edad promedio del agua, independientemente de la distribución de tiempos de tránsito en la muestra (ver Figura 6 para más información sobre este efecto). El ejemplo más representativo de este tipo de trazadores es el  $^4\text{He}$ , generado por desintegración alfa a partir de uranio y torio en los sedimentos y que, al ser un gas noble, se transporta sin obstáculos junto con el flujo de agua subterránea (Kipfer et al. 2002).

#### Aplicaciones de trazadores ambientales en Argentina

En Argentina se han realizado hasta la fecha (2025) un total de 17 estudios en los que se aplicaron técnicas de datación de aguas subterráneas mediante trazadores ambientales, distribuidos en diversas regiones del país y sintetizados por Martínez et al. (2024). A continuación, se presentan algunos casos representativos que ilustran las aplicaciones prácticas de la datación del agua subterránea.

Figini et al. (1983) sentaron un precedente importante en la aplicación de  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$  como herramientas complementarias para estudiar la intrusión de una cuña de agua salina de origen marino que afectó el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Mar del Plata durante ese período. Esta metodología permitió identificar mezclas de aguas de distintos orígenes. De manera similar, Panarello et al. (1995) utilizaron los mismos radioisótopos para investigar los procesos de recarga, mezcla y salinización en los acuíferos Pampeano y Puelches en las proximidades de la ciudad de La Plata.

Más recientemente, Cabrera et al. (2017) aplicaron la datación del agua subterránea para sustentar un modelo hidrogeológico conceptual de un sistema de acuíferos confinados en la llanura pampeana de Córdoba con potencial hidrotermal. El  $^3\text{H}$  permitió identificar aguas recargadas antes de la década de 1950 (más de 60 años de antigüedad), mientras que el  $^{14}\text{C}$  proporcionó edades más precisas para estas aguas viejas, indicando recargas ocurridas durante períodos fríos del Holoceno y la última glaciación. Los resultados demostraron que estas aguas no están vinculadas al ciclo hidrológico actual y que su recarga tuvo lugar hace miles de años, información clave para comprender la dinámica del sistema y planificar su aprovechamiento sostenible.

Entre los trabajos realizados en el sureste de la llanura pampeana, pueden mencionarse los de Miglioranza et al. (2015), que relacionaron las edades del agua con la presencia de contaminantes agrícolas (compuestos organoclorados y nitrógeno) en el acuífero Pampeano; Alcaraz et al. (2024), quienes aplicaron  $^3\text{H}$  asociado tanto al agua preevento y evento de precipitación para estimar la proporción del caudal base del río Quequén Grande; y Martínez et al. (2016), que hasta el momento constituye el único estudio en aplicar un conjunto combinado de trazadores ( $^3\text{H}/^3\text{He}$  y CFCs) para modelar la distribución de edades en el acuífero Pampeano. Este enfoque permitió estimar las proporciones de aguas jóvenes y viejas en pozos de distintas profundidades, revelando una fracción de aguas viejas mayor a la esperada para un acuífero libre y somero, lo que aportó información valiosa sobre el movimiento del agua y la influencia de capas de baja permeabilidad en el sistema.

## Limitaciones y problemas en el uso de trazadores

### *Diferencias entre la edad del trazador y la edad del agua*

Al trabajar con trazadores de edad, es fundamental entender que la “edad del agua” es una propiedad intrínseca de cada molécula de agua. En cambio, los trazadores, excepto los isótopos del agua ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ), son sustancias que se transportan junto con el flujo subterráneo como solutos y cuya concentración puede verse afectada por procesos como la interacción agua-roca, el intercambio con la fase gaseosa y diversas reacciones biogeoquímicas (Bethke y Johnson, 2008; Suckow, 2014). Aunque en la mayoría de los casos las diferencias generadas son pequeñas, es importante recordar que la edad obtenida con trazadores representa, estrictamente, la edad del trazador, y no necesariamente la edad real del agua. En otras palabras, ambas edades coincidirán solo si el trazador se comporta exactamente como las moléculas de agua.

Una excepción a esta regla es el  $^3\text{H}$ , ya que al formar parte de la misma molécula de agua es el trazador que mejor representa la edad real de la misma. Sin embargo, incluso este radioisótopo puede, en ciertos casos poco frecuentes, presentar retardo en su transporte (Mook, 2000; Zuo et al. 2011) o generarse de forma natural en el subsuelo por reacciones nucleares en las rocas (Andrews y Kay, 1982; Florkowski, 1991).

A continuación, se presenta una síntesis de los principales procesos y fenómenos que pueden afectar la estimación de la edad del agua mediante trazadores, generando discrepancias respecto a la edad real. Por ello, es fundamental tenerlos en cuenta al aplicar este método.

- Degradación del trazador dentro del sistema (p. ej., degradación microbiana de CFC-11 bajo condiciones anaeróbicas).
- Pérdida de trazadores gaseosos por desgasificación antes o durante el muestreo (p. ej., generación de burbujas por descompresión al bombear agua desde grandes profundidades).
- Fuentes subterráneas del trazador (p. ej., producción terrigénica de  $^{39}\text{Ar}$  y  $^3\text{H}$ ).

- Concentraciones de trazadores gaseosos superiores al equilibrio con la atmósfera debido a la disolución natural de burbujas de aire atrapadas por debajo del nivel freático, fenómeno conocido como “exceso de aire”.
- Fuentes de contaminación atmosférica cercanas (p. ej., planta nuclear que libera  $^3\text{H}$  a la atmósfera).
- Retardo del trazador con respecto a las moléculas de agua, o transporte neto en una dirección diferente debido a gradientes de concentración o procesos de difusión (p. ej., sorción de CFC-113 en materia orgánica).
- Diferencias en los tiempos de tránsito entre diferentes trazadores y las moléculas de agua en la zona no saturada (p. ej., los trazadores gaseosos se mueven más rápido por difusión hacia la freática que las moléculas de agua). Este fenómeno se abordará con mayor detalle en el siguiente subcapítulo, ya que es una de las principales causas de las diferencias de edades obtenidas entre trazadores gaseosos y el  $^3\text{H}$ .

### *Efectos del tránsito en la zona no saturada*

Diferencias entre los tiempos de tránsito de los trazadores y los del agua pueden surgir en sistemas con extensos espesores de su zona no saturada (ZNS). Dado que las funciones de entrada de los trazadores corresponden a concentraciones atmosféricas o en precipitación medidas en la superficie, todos los trazadores reflejarán, en mayor o menor medida, el tiempo de tránsito a través de la ZNS (Corcho Alvarado et al. 2007).

Trazadores gaseosos, como los CFCs o el  $\text{SF}_6$ , pueden desplazarse de forma relativamente rápida hacia el nivel freático, ya que su transporte está principalmente controlado por difusión en los poros del suelo no saturado (Cook y Solomon, 1995). Si la ZNS es de gran espesor, habrá un desfase temporal entre los cambios en la concentración atmosférica y los cambios en la concentración de gas del suelo. Esto no es un problema para trazadores como el  $^{39}\text{Ar}$  y el  $^{81}\text{Kr}$  porque la concentración de estos isótopos está en estado estacionario en la atmósfera, y sus vidas medias radiactivas son largas en relación con el tiempo de intercambio entre la ZNS y la atmósfera. Sin embargo, puede ser un problema para trazadores como el  $^{85}\text{Kr}$ , los CFCs o el  $\text{SF}_6$ , que han estado aumentando rápidamente en la atmósfera durante las últimas décadas. Cook y Solomon (1995) han calculado que el desfase temporal del  $^{85}\text{Kr}$  causado por el transporte a través de la ZNS es de menos de 1 año a 10 m y de unos 7 años a 40 m de profundidad en la ZNS.

En el caso del  $^3\text{H}$ , este se transporta por advección a través de la ZNS como parte de las moléculas del agua, más lentamente que los gases, y mientras lo hace se desintegra radiactivamente generando helio tritiogénico gaseoso ( $^3\text{He}_{\text{trit}}$ ). El  $^3\text{He}_{\text{trit}}$  producido en esta zona se perderá hacia la atmósfera y, por lo tanto, no formará parte de la muestra final (Jurgens et al. 2012). También la relación  $^3\text{H}/^3\text{He}_{\text{trit}}$  medida en una muestra de agua subterránea estará afectada por el paso en la ZNS cuando esa muestra corresponde a una mezcla de aguas de distintas edades, pero en este caso de forma no tan directa. No es el paso en sí mismo por la ZNS lo que modifica esta relación, sino el cambio que genera en las proporciones iniciales de  $^3\text{H}$  en la precipitación, resultado de las variaciones históricas en su función de entrada. En otras palabras, si la concentración de  $^3\text{H}$  en la precipitación hubiese permanecido constante a lo largo del tiempo, la relación  $^3\text{H}/^3\text{He}_{\text{trit}}$  para una mezcla determinada de edades sería siempre la misma, independientemente del tiempo de tránsito por la ZNS.

Todo esto dará lugar a que, en sistemas con extensas zonas vadosas, generalmente en zonas áridas y semiáridas, haya variaciones en los tiempos de tránsito entre diferentes trazadores y que estos, a su vez, sean mayores que la edad “real” del agua, especialmente en el caso del  $^3\text{H}$ , si no se tiene en cuenta el tránsito a través de estas zonas como parte integral de la edad del agua.

### *Efectos de la mezcla de aguas con distintas edades y la importancia del uso de múltiples trazadores*

Es común que al aplicar distintos trazadores a una misma muestra de pozo o manantial se obtengan edades aparentes (flujo-pistón) significativamente diferentes. La causa principal de estas discrepancias

es muchas veces la mezcla de aguas de diferentes edades dentro de la muestra (Newman et al. 2010; McCallum et al. 2013; Suckow et al. 2018). Es decir, la muestra estará representada por una determinada distribución de edades y no por una edad única (modelo flujo-pistón).

Por un lado, estas diferencias en las edades aparentes se deben al hecho de que cada trazador tiene un rango de tiempo determinado para el cual su aplicación es apropiada (Figura 3), lo que significa que cada trazador “ve” solo una parte de la distribución total de edades de la muestra. Por ejemplo, gases de origen antropogénico como los CFCs no son adecuados para datar agua de más de 70 años ya que su contenido atmosférico fue despreciable antes de la segunda mitad del siglo XX (Busenberg y Plummer, 1992). En el caso de trazadores radiactivos, aquellos con un tiempo de semidesintegración prolongado (p. ej.,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ) son adecuados para datar aguas subterráneas viejas, mientras que los radioisótopos con semidesintegraciones cortas (p. ej.,  $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ) son utilizados para estudiar recarga moderna.

Un ejemplo clásico es la medición simultánea de  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$  en una misma muestra de agua. Puede ocurrir que se detecten concentraciones de  $^3\text{H}$  que reflejan edades de apenas unas décadas y, al mismo tiempo, contenidos de  $^{14}\text{C}$  muy por debajo de los niveles modernos (por ejemplo, 50 pMC), que corresponden a edades de miles de años. Esto se debe a que el  $^3\text{H}$  presente en la muestra proviene únicamente de la fracción joven de la mezcla (0 a ~60 años), mientras que la fracción más antigua (de ~60 a miles de años) ya no contiene  $^3\text{H}$  y gran parte de su  $^{14}\text{C}$  ha decaído radiactivamente.

Sin embargo, existe un nivel adicional de complejidad: incluso cuando se utilizan trazadores diferentes con rangos de datación que cubren toda la gama de edades presentes en una misma muestra y que exhiben un comportamiento similar tanto en la ZNS como en la saturada, es muy probable que proporcionen edades aparentes que difieren entre sí y de la edad media real de la mezcla. Este fenómeno se debe a que la falta de rectitud en las funciones de entrada de los trazadores hace que las edades aparentes dadas por los mismos no representen proporcionalmente a las fracciones de cada componente del agua en la mezcla (Cook, 2020). Es decir, si la concentración inicial del trazador hubiese variado de manera lineal en el tiempo, la edad flujo-pistón del trazador sí coincidiría con la edad promedio real del agua, independientemente de cómo sea la distribución de tiempos de tránsito en la muestra. En la Figura 6a se ilustra este caso ideal donde, en una muestra compuesta por dos partes de igual volumen de agua vieja y agua más reciente, la edad aparente obtenida a partir de la concentración medida del trazador en la mezcla  $T(C_m)$  será igual a la edad media real de la muestra  $T_M$ . Sin embargo, en la mayoría de los casos, la concentración del trazador no sigue una función de entrada lineal (Figura 6b). Bajo estas condiciones, la edad del trazador ya no representa con precisión la edad promedio del agua. Por ende, en ausencia de información independiente sobre la composición y proporciones de las mezclas, la edad aparente del trazador no puede interpretarse de manera inequívoca como una medida media de la distribución de edades del agua subterránea.

Los trazadores con funciones de entrada cóncavas, como aquellos sujetos a decaimiento radioactivo, subestiman sistemáticamente la edad media del agua subterránea, y el grado de subestimación depende del nivel de mezcla y de la constante de decaimiento (Torgersen et al. 2013). En contraste, trazadores como  $\text{SF}_6$  y  $^4\text{He}$  presentan funciones de entrada más cercanas a una línea recta, reduciendo este efecto.

Además, este mismo efecto se puede observar en las edades aparentes obtenidas con un mismo trazador en muestras de la misma mezcla tomadas en diferentes momentos cuando hay cambios en la pendiente de la función de entrada. Por ejemplo, una mezcla ideal compuesta por un 50 % de agua de 10 años y un 50 % de agua de 40 años (edad media de 25 años) presentaría una concentración de CFC-12 de 325 pptv en 2010 y de 409 pptv en 2020 en el hemisferio sur, lo que se traduce en edades aparentes de aproximadamente 28 y 33 años, respectivamente, a pesar de que la mezcla de edades del agua no haya cambiado.

Todos estos inconvenientes pueden mitigarse mediante la aplicación conjunta de distintos trazadores en un mismo punto de muestreo, ya sea combinándolos en una sola campaña, realizando mediciones repetidas de un mismo trazador a lo largo del tiempo o integrando ambas estrategias (McCallum et al. 2013). Esto permite reducir incertidumbres, obtener conclusiones más robustas y aumenta la confianza

en los resultados del estudio (Newman et al. 2010). Las diferentes edades aparentes obtenidas con los distintos trazadores proporcionan un panorama más claro sobre la presencia de mezclas, la amplitud de las distribuciones de edades y una estimación más precisa de la edad media real del agua, especialmente si se emplean trazadores que cubran rangos de datación complementarios y se cuenta con un modelo conceptual adecuado del acuífero de antemano (Jurgens et al. 2012). Además, esta estrategia resulta útil porque no siempre se conoce de antemano si un trazador individual será efectivo en un sitio determinado (p. ej., en caso de contaminación inesperada con CFCs).

Sin embargo, para abordar de manera más efectiva el problema de las mezclas y las distribuciones de edades, no basta con aplicar un conjunto de trazadores; es necesario reemplazar el enfoque basado en edades aparentes por modelos matemáticos que representen de forma más precisa la distribución de edades de la muestra en función de las concentraciones medidas, como los modelos de parámetros agrupados (Maloszewski y Zuber, 1982).

## SUMARIO

La edad del agua subterránea se define como el tiempo de tránsito desde su recarga hasta el punto de muestreo en el acuífero. En la práctica, no corresponde a un valor único, sino a una distribución de edades producto de la dispersión, difusión, gradientes verticales y mezcla de flujos, tanto en el acuífero como durante la extracción, especialmente al usar filtros de gran longitud. Para una interpretación más realista, es fundamental representar la edad como una distribución con una media asociada, considerando que la forma de dicha distribución puede ser tan o más informativa que el valor medio.

No existe un consenso absoluto sobre los límites que definen “agua joven” y “agua vieja”, ya que dependen de los rangos temporales que permiten los métodos de datación; pero, en general, se considera agua joven aquella infiltrada en las últimas décadas ( $\approx 60$  años, post-pico de  $^3\text{H}$ ), con trazadores como  $^3\text{H}$ , CFCs,  $^{85}\text{Kr}$  o ciertos agroquímicos, mientras que el agua vieja carece de estos trazadores y se data mediante  $^{14}\text{C}$  u otros isótopos con periodos de semidesintegración más largos, alcanzando edades de decenas de miles a millones de años.

Los trazadores son sustancias presentes en concentraciones extremadamente bajas que permiten obtener información sobre el sistema sin alterarlo. La datación con trazadores se basa en que su concentración refleja el tiempo transcurrido desde su ingreso al acuífero, siendo clave conocer la “función de entrada” en la zona de recarga.

La edad estimada mediante trazadores refleja la edad del trazador y no necesariamente la del agua, salvo para el  $^3\text{H}$ , que forma parte de la molécula de agua. Por ello, las edades obtenidas representan la “edad aparente” o “edad del trazador”. Las posibles discrepancias con la edad real del agua pueden surgir por degradación del trazador, desgasificación, fuentes subterráneas, exceso de aire, contaminación atmosférica reciente, retardo respecto al agua y tránsito por la zona no saturada.

La mezcla de aguas de distintas edades en una misma muestra puede generar edades aparentes significativamente diferentes según el trazador utilizado, debido a sus rangos de datación y a la forma de su función de entrada. Incluso trazadores distintos que cubran toda la gama de edades presentes pueden producir edades aparentes divergentes respecto a la media real. Para superar estas limitaciones, se recomienda el uso de múltiples trazadores complementarios y modelos matemáticos que representen la distribución de edades, permitiendo estimaciones más precisas de la edad media del agua.

En Argentina se han realizado 17 estudios de datación de aguas subterráneas con trazadores, principalmente  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$ , usados como información complementaria y reportando edades aparentes sin analizar distribuciones de edades. Una implementación más amplia y sistemática de esta metodología representa un gran potencial para mejorar la comprensión y gestión de los acuíferos del país.

## REFERENCIAS

- Aggarwal, P. K., Araguas-Araguas, L., Choudhry, M., van Duren, M., y Froehlich, K. (2013). Lower groundwater  $^{14}\text{C}$  age by atmospheric  $\text{CO}_2$  uptake during sampling and analysis. *Groundwater*, 51(5), 605-615. <https://doi.org/10.1111/gwat.12110>
- Alcaraz, E., Basaldúa, A., Quiroz-Londoño, O. M., Dapeña, C., Ibarra, E., Copia, L., y Martínez, D. (2024). Using  $^3\text{H}$  as a tracer to study streamflow components in large plain catchments on temperate climate. *Hydrological Processes*, 38(8), e15264. <https://doi.org/10.1002/hyp.15264>
- Andrews, J. N., y Kay, R. L. F. (1982). Natural production of tritium in permeable rocks. *Nature*, 298(5872), 361-363. <https://doi.org/10.1038/298361a0>
- Basaldúa, A., Alcaraz, E., Quiroz-Londoño, M., Dapeña, C., Ibarra, E., Vélez-Agudelo, C., Copia, L., y Martínez, D. (2022). Reconstruction of the record of tritium in precipitation in the temperate zone of South America. *Hydrological Processes*, 36(9), e14691. <https://doi.org/10.1002/hyp.14691>
- Bethke, C. M., y Johnson, T. M. (2008). Groundwater age and groundwater age dating. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 121-152. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124210>
- Busenberg, E., y Plummer, L. N. (1992). Use of chlorofluorocarbons ( $\text{CCl}_3\text{F}$  and  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma. *Water Resources Research*, 28(9), 2257-2283. <https://doi.org/10.1029/92WR01263>
- Cabrera, A., Blarasin, M., y Maldonado, L. (2017). Groundwater age and hydrothermalism of confined aquifers in the Argentine Pampean plain. *Geothermal Energy*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0064-1>
- Campbell, A. G., Cartwright, I., Cendón, D. I., y Currell, M. J. (2024). Multiple isotope tracers reveal the sources of water sustaining ecologically and culturally significant springs, and their vulnerability to mining development. *Journal of Hydrology*, 624, 132078. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132078>
- Cartwright, I., Cendón, D., Currell, M., y Meredith, K. (2017). A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations. *Journal of Hydrology*, 555, 797-811. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.053>
- Clark, I., y Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers.
- Cook, P. G. (2020). *Introduction to Isotopes and Environmental Tracers as Indicators of Groundwater Flow*. The Groundwater Project. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-8-2>
- Cook, P. G., y Herczeg, A. L. (Eds.). (2000). *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6>
- Cook, P. G., y Solomon, D. K. (1995). Transport of atmospheric trace gases to the water table: Implications for groundwater dating with chlorofluorocarbons and krypton-85. *Water Resources Research*, 31(2), 263-270. <https://doi.org/10.1029/94WR02232>
- Cook, P. G., y Solomon, D. K. (1997). Recent advances in dating young groundwater: Chlorofluorocarbons,  $^3\text{H}/^3\text{He}$  and  $^{85}\text{Kr}$ . *Journal of Hydrology*, 191(1-4), 245-265. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03051-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03051-X)
- Corcho Alvarado, J. A., Purtschert, R., Barbecot, F., Chabault, C., Rueedi, J., Schneider, V., Aeschbach-Hertig, W., Kipfer, R., y Loosli, H. H. (2007). Constraining the age distribution of highly mixed groundwater using  $^{39}\text{Ar}$ : A multiple environmental tracer ( $^3\text{H}/^3\text{He}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ , and  $^{14}\text{C}$ ) study in the semiconfined Fontainebleau Sands Aquifer (France). *Water Resources Research*, 43(3), W03427. <https://doi.org/10.1029/2006WR005096>
- De Jong, M., Moran, J. E., y Visser, A. (2020). Identifying paleowater in California drinking water wells. *Quaternary International*, 547, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.04.008>
- Deslandes, A., Gerber, C., Lamontagne, S., Wilske, C., y Suckow, A. (2019). *Environmental tracers in the Beetaloo Basin: Aquifer and groundwater characterization*. GISERA. <http://hdl.handle.net/102.100.100/385078?index=1>
- Döll, P., y Fiedler, K. (2008). Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), 863-885. <https://doi.org/10.5194/hess-12-863-2008>
- Dutton, G. S., Hall, B. D., Montzka, S. A., Nance, J. D., Clingan, S. D., y Petersen, K. M. (2024). *Combined Atmospheric Chlorofluorocarbon-12 Dry Air Mole Fractions from the NOAA GML Halocarbons Sampling Network, 1977–2024, Version: 2024-03-07*. <https://doi.org/10.15138/PJ63-H440>
- Ferguson, G., Cuthbert, M. O., Befus, K., Gleeson, T., y McIntosh, J. C. (2020). Rethinking groundwater age. *Nature Geoscience*, 13(9), 592-594. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0629-7>
- Figini, A. J., Gomez, G. J., Huarte, R. A., y Carbonari, J. E. (1983). Los isótopos ambientales (Tritio-Carbono 14, Deuterio y oxígeno-18) en el estudio de la salinización de las aguas subterráneas de la ciudad de Mar del Plata—Provincia de Buenos Aires—Argentina. *Revista del Museo de La Plata*, 9(77), 103-120. <https://publicaciones.fcnyu.unlp.edu.ar/rmlp/article/view/2007>
- Florkowski, T. (1991). Natural production of radionuclides in geological formations. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 17(S), S513. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/17/S/052>

- Fontes, J. (1983). Dating of groundwater. En International Atomic Energy Agency (Ed.), *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology* (pp. 285-317). International Atomic Energy Agency.
- Gleeson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M. A., Taniguchi, M., Alley, W. M., Allen, D. M., y Zhou, Y. (2010). Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, 3(6), 378-379. <https://doi.org/10.1038/ngeo881>
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., y Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9(2), 161-167. <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>
- Gourdol, L., Stewart, M. K., Morgenstern, U., y Pfister, L. (2023). Short high-accuracy tritium data time series for assessing groundwater mean transit times in the vadose and saturated zones of the Luxembourg Sandstone aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 28(15), 3519-3547. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3519-2024>
- Han, L.-F., y Wassenaar, L. I. (2020). Principles and uncertainties of  $^{14}\text{C}$  age estimations for groundwater transport and resource evaluation. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 57(2), 111-141. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1857378>
- International Atomic Energy Agency. (1992). *Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation* (Technical Series Report No. 331). IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2006). *Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A Guidebook*. IAEA.
- Jankovec, J., Vitvar, T., Šanda, M., Matsumoto, T., y Han, L. F. (2017). Groundwater recharge and residence times evaluated by isotopes of hydrogen and oxygen, noble gases, and CFCs in a mountain catchment in the Jizera Mts., northern Czech Republic. *Geochemical Journal*, 51(5), 423-437. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0469>
- Jasechko, S., Perrone, D., Befus, K. M., Cardenas, M. B., Ferguson, G., Gleeson, T., Luijendijk, E., McDonnell, J. J., Taylor, R. G., Wada, Y., y Kirchner, J. W. (2017). Global aquifers dominated by fossil groundwaters but wells vulnerable to modern contamination. *Nature Geoscience*, 10(6), 425-429. <https://doi.org/10.1038/ngeo2943>
- Jurgens, B. C., Böhlke, J. K., y Eberts, S. M. (2012). *TracerLPM (Version 1): An Excel® workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data* (Techniques and Methods 4-F3). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm4F3>
- Jurgens, B. C., Faulkner, K., McMahon, P. B., Hunt, A. G., Casile, G., Young, M. B., y Belitz, K. (2022). Over a third of groundwater in USA public-supply aquifers is Anthropocene-age and susceptible to surface contamination. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 153. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00473-y>
- Kazemi, G. A., Lehr, J. H., y Perrochet, P. (2006). *Groundwater Age*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471929514>
- Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W., Peeters, F., y Stute, M. (2002). Noble gases in lakes and ground waters. En D. Porcelli, C. Ballentine y R. Wieler (Eds.), *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry* (pp. 615-700). Mineralogical Society of America. <https://doi.org/10.1515/9781501509056-016>
- Kralik, M. (2015). How to estimate mean residence times of groundwater. *Procedia Earth and Planetary Science*, 13, 301-306. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.070>
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., y Külls, C. (2009). *Tracers in Hydrology*. Wiley-Blackwell.
- Lu, Z.-T., Schlosser, P., Smethie, J. W., Sturchio, N. C., Fischer, T. P., Kennedy, B. M., Purtschert, R., Severinghaus, J. P., Severinghaus, D. K., y Tanhua, T. (2014). Tracer applications of noble gas radionuclides in the geosciences. *Earth-Science Reviews*, 138, 196-214. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.002>
- Maloszewski, P., y Zuber, A. (1982). Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. Models and their applicability. *Journal of Hydrology*, 57(3-4), 207-231. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90147-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90147-0)
- Maloszewski, P., y Zuber, A. (2000). *Manual on lumped parameter models used for the interpretation of environmental tracer data in groundwaters*. International Atomic Energy Agency.
- Martínez, D. E., Fourre, E., Quiroz Londoño, O. M., Jean-Baptiste, P., Galli, M. G., Dapoigny, A., y Grondona, S. I. (2016). Residence time distribution in a large unconfined-semiconfined aquifer in the Argentine Pampas using  $^3\text{H}/^3\text{He}$  and CFC tracers. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1107-1120. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1378-y>
- Martínez, D. E., Jiang, W., Matsumoto, T., Quiroz Londoño, O. M., Ritterbusch, F., Lexow, C., Yang, G. M., Bertolín, L., Mabry, J., Romeo, N., Zárate, M., y Lu, Z.-T. (2022). Kr-81 reveals one-million-year-old groundwater at the Atlantic coast of Argentina as a record of Mid-Pleistocene climate. *Journal of Hydrology*, 610, 127846. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127846>
- Martínez, D. E., Quiroz Londoño, O. M., Basaldúa, A. D., Glok-Galli, M., Solana, X., Alcaraz, E. F., y Bertolin, L. (2024). The groundwater age of the Argentine aquifers: A review and paleoclimate insight. *Groundwater for Sustainable Development*, 28, 101402. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101402>
- Matsumoto, T., Zouari, K., Trabelsi, R., Hillegonds, D., Jiang, W., Lu, Z.-T., Mueller, P., Zappala, J. C., Araguás Araguas, L. J., Romeo, N., y Agoun, A. (2020). Krypton-81 dating of the deep Continental Intercalaire aquifer with implications for chlorine-36 dating. *Earth and Planetary Science Letters*, 531, 116120. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116120>
- Mazor, E., y Nativ, R. (1992). Hydraulic calculation of groundwater flow velocity and age: Examination of the basic premises. *Journal of Hydrology*, 138(1-4), 211-222. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90165-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90165-R)

- McCallum, J. L., Cook, P. G., Simmons, C. T., y Werner, A. D. (2013). Bias of apparent tracer ages in heterogeneous environments. *Groundwater*, 51(4), 447-460. <https://doi.org/10.1111/gwat.12052>
- Miglioranza, K., Martínez, D. E., Fourné, E., Grondona, S., Jean-Baptiste, P., Quiroz Londoño, O. M., González, M., y Silva Barni, M. (2015). Groundwater residence time based on  $^3\text{H}/^3\text{He}$  determinations and agricultural pollutants in the Pampeano Aquifer (Argentina): Organochlorine compounds and nitrogen isotopes. En Organismo Internacional de Energía Atómica (Ed.), *International Symposium on Isotope Hydrology: Revisiting Foundations and Exploring Frontiers* (pp. 131-134). Organismo Internacional de Energía Atómica. <http://hdl.handle.net/11336/162215>
- Mook, W. G. (2000). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*. (Vol. 1). UNESCO.
- Newman, B. D., Osenbrück, K., Aeschbach-Hertig, W., Solomon, D. K., Cook, P. G., Rózański, K., y Kipfer, R. (2010). Dating of "young" groundwaters using environmental tracers: Advantages, applications, and research needs. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 46(3), 259-278. <https://doi.org/10.1080/10256016.2010.514339>
- Osenbrück, K., Fiedler, S., Knöller, K., Weise, S. M., Sültenfuß, J., Oster, H., y Strauch, G. (2006). Timescales and development of groundwater pollution by nitrate in drinking water wells of the Jahna-Aue, Saxonia, Germany. *Water Resources Research*, 42(12). <https://doi.org/10.1029/2006WR004977>
- Panarello, H. O., Dapena, C., y Auge, M. (1995). Mechanisms of salinization of groundwater in the La Plata area, Buenos Aires, Argentina: Interpretation by means of environmental isotopes. *International Atomic Energy Agency*, 27(6), 13-27.
- Plummer, L. N., y Busenberg, E. (2006). Chlorofluorocarbons in Aquatic Environments. En International Atomic Energy Agency (Ed.), *Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A Guidebook* (pp. 1-8). International Atomic Energy Agency.
- Plummer, L. N., y Glynn, P. D. (2013). Radiocarbon dating in groundwater systems. En International Atomic Energy Agency (Ed.), *Isotope methods for dating old groundwater* (pp. 33-89). International Atomic Energy Agency.
- Solomon, D. K., y Gilmore, T. E. (2024). *Age Dating Young Groundwater: How to Determine Groundwater Age from Environmental Tracer Data*. The Groundwater Project. <https://doi.org/10.21083/LIUJ2727>
- Solomon, D. K., Cook, P. G., y Plummer, L. N. (2006). Models of groundwater ages and residence times. En International Atomic Energy Agency (Ed.), *Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A Guidebook* (pp. 73-88). International Atomic Energy Agency.
- Suckow, A. (2014). The age of groundwater—Definitions, models and why we do not need this term. *Applied Geochemistry*, 50, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.016>
- Suckow, A., Raiber, M., Deslandes, A., y Gerber, C. (2018). *Constraining conceptual groundwater models for the Hutton and Precipice aquifers in the Surat Basin through tracer data: Final Report*. CSIRO.
- Suckow, A., Deslandes, A., Raiber, M., Taylor, A. R., Davies, P., Gerber, C., y Leaney, F. (2020). Reconciling contradictory environmental tracer ages in multi-tracer studies to characterize the aquifer and quantify deep groundwater flow: An example from the Hutton Sandstone, Great Artesian Basin, Australia. *Hydrogeology Journal*, 28(1), 75-87. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02042-8>
- Torgersen, T., Purtschert, R., Phillips, F. M., Plummer, L. N., Sanford, W., y Suckow, A. (2013). Defining groundwater age. En International Atomic Energy Agency (Ed.), *Isotope Methods for Dating Old Groundwater* (pp. 21-32). International Atomic Energy Agency.
- Visser, A., Broers, H. P., Purtschert, R., Sültenfuß, J., y de Jonge, M. (2013). Groundwater age distributions at a public drinking water supply well field derived from multiple age tracers ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $3\text{H}/^3\text{He}$ , and  $^{39}\text{Ar}$ ). *Water Resources Research*, 49(11), 7778-7796. <https://doi.org/10.1002/2013WR014012>
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Summerhayes, C. P., Wolfe, A. P., Barnosky, A. D., Cearreta, A., y Williams, M. (2017). The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim recommendations. *Anthropocene*, 19, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.09.001>
- Zuber, A. (1986). On the interpretation of tracer data in variable flow systems. *Journal of Hydrology*, 86(1-2), 45-57. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90005-3)
- Zuo, R., Teng, Y., Wang, J., Hu, Q., y Guo, M. (2011). Experimental validation of retardation of tritium migration in the Chinese loess media. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1-4), 497-506. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0494-x>