

Muestra	Sitio	T [°C]	Cond.el. [μmohs/cm]	¹⁴ C		³ H [TU]
				A [dpm/g]	% mod	
506	Manantial El Avileño	32.3	7390	4.78	38.21	0.76
501	Manantial termal Baño San Ignacio	36.8	6280	1.70	13.59	0.95
503	Manantial frío, Pantano San Ignacio	<25	1480	15.64	125.0	3.89
508	Pozo artesiano Los Pocitos	32.9	5950	2.90	23.18	0.46

Tabla 11: Datos de ¹⁴C y de ³H de aguas subterráneas de la región de Linares N.L., México. Fecha de muestreo: 5/95. Laboratorio: IMTA, Jiutepec, Morelos, México— Véase carta figura 105. La muestra 503 está tomada de un agua joven de un sistema de flujo somero (125 %mod), mientras que las otras muestras se originan de aguas viejas de sistemas de flujo profundos. Ya que 501 y 506 muy probablemente se originan de la misma zona de recarga, se puede aplicar la fórmula para el cálculo de la edad relativa entre ellas:

$$\Delta T = -8270 \ln \frac{A^{14}_{k+1}}{A^{14}_k}$$

en donde: ΔT la edad relativa entre k (506 del ejemplo) y k+1 (501 del ejemplo)
 A¹⁴ las actividades de ¹⁴C respectivas.

Utilizando las actividades A₅₀₆ y A₅₀₁, se obtiene:

$$\Delta T = 8518a.$$

En base a esta edad relativa que se refiere a la diferencia de tiempos de flujo del área de recarga hasta los sitios de las muestras 506 y 501 respectivamente, se pueden estimar las edades absolutas de estas aguas a un orden de tamaño de 15000 hasta 25000 años, tomando en cuenta la distancias entre 501 y 506, así como las distancias entre ellos y la supuesta área de recarga. Las concentraciones de ³H confirman los resultados de ¹⁴C: solamente el manantial frío 503 contiene un valor elevado de ³H ("tritio de la bomba"), comprobando que se trata de agua recientemente recargada.

La temperatura del agua subterránea

Hidrogeotermia

Generalidades

La temperatura del agua subterránea tiene importancia directa para el uso humano. Tiene también importancia indirecta por el hecho de que la mineralización de las aguas subterráneas generalmente se aumenta con su temperatura.

Las temperaturas de las aguas subterráneas están influidas por:

- la temperatura del aire en la superficie de la tierra, lo que quiere decir por hechos estacionales o por la energía del sol
- la cantidad de calor transmitido procedente o por la energía geotérmica.

El flujo de calor transmitido es casi constante, en tanto que la temperatura del aire está sujeta a grandes variaciones espaciales y temporales.

La cantidad de calor aportada a la superficie de la tierra por el flujo de calor transmitido depende en gran medida de la intensidad del flujo de calor solar, entre otros factores que influyen en él.

Las aguas subterráneas se clasifican por sus temperaturas en:

- aguas frías que son las aguas de los acuíferos de flujo somero, con temperaturas que varían entre 10°C y 20°C (dependiendo de la zona climática).
- aguas cálidas que son las aguas de los acuíferos de flujo profundo y de zonas de actividad volcánica reciente, con temperaturas elevadas hasta > 100°C. Son casi exclusivamente afectadas por el factor geotérmico.

La distribución de tipo de acuíferos agua fría-agua termal tiene una relevancia geográfica, ya que depende de la zona climática. En las zonas climáticas templadas las temperaturas del agua subterránea de 10-20°C se ven influenciadas por el clima. En México, por ejemplo, el agua termal es influenciada geotérmicamente como agua subterránea de zona profunda (zona de 200-300 m de profundidad).

La temperatura del agua subterránea

El agua subterránea es un recurso natural que constituye una reserva de agua dulce de gran importancia para el mundo. En todo el mundo el agua subterránea que se utiliza para riego, industria y consumo humano es considerable. En algunos países, como Francia y Alemania, se utilizan para la producción de energía geotérmica en las zonas de actividad volcánica reciente. En algunos países, como Francia y Alemania, el calor de las aguas subterráneas se utiliza para la calefacción de viviendas e industrias. La técnica de la bomba térmica permite el uso hasta de aguas frías para la calefacción.

Generalidades

La temperatura del agua subterránea tiene importancia directa para el uso humano. Tiene además importancia indirecta por el hecho de que la mineralización de las aguas subterráneas generalmente se aumenta con su temperatura.

Las temperaturas de las aguas subterráneas están influidas por

- la temperatura del aire en la superficie de la tierra, lo que quiere decir: por factores climáticos o por la *energía del sol*
- la corriente de calor terrestre ascendente o por la *energía geotérmica*.

El flujo de calor terrestre es casi constante, mientras que la temperatura del aire está sujeta a grandes variaciones espaciales y temporales.

La cantidad de calor aportada a la superficie de la tierra por el flujo de calor terrestre es muy pequeña en comparación al ingreso de calor solar: entre ambos vale una relación 1:1000.

Las aguas subterráneas se diferencian por sus temperaturas en

- *aguas frías* que son las aguas de los sistemas de flujo someros, con temperaturas parecidas a las del aire de la región (desde pocos centígrados en las zonas climáticas frías hasta aproximadamente 30°C en las zonas calientes). Son casi exclusivamente afectadas por el factor climático
- *aguas termales* que son las aguas de los sistemas de flujo profundos y de zonas de actividad volcánica reciente, con temperaturas elevadas hasta >100°C. Son casi exclusivamente afectadas por el factor geotérmico.

La delimitación entre los conceptos agua fría-agua termal tiene una relatividad geográfica, ya que aquella depende de la zona climática: En las zonas climáticas templadas las temperaturas del agua subterránea de 15-20°C ya son temperaturas claramente elevadas. En Alemania, por ejemplo, el agua termal es definida oficialmente como agua subterránea de una temperatura arriba de 20°C. Por otra parte en las zonas

climáticas calientes, se utilizan aguas subterráneas de temperaturas hasta 35°C como "agua fría" para el abastecimiento público de agua potable.

En todo el mundo el agua termal que normalmente a la vez es agua de alta mineralización, se utiliza en los balnearios. Las *aguas termales de alta temperatura* se utilizan para la producción de energía, especialmente en las zonas de actividad volcánica reciente. En algunos países, por ejemplo en Hungría, Francia y Alemania, el calor de las *aguas termales de baja temperatura* se utiliza para la calefacción de invernaderos y de habitaciones. La técnica de la bomba térmica permite el uso hasta de aguas frías para la calefacción.

Conceptos geotérmicos básicos

En la corteza terrestre el calor se propaga en dos maneras diferentes:

- por *conducción* térmica que es el flujo de calor por las rocas de *conductividad térmica* diferente, causado por diferencias de la temperatura
- por *convección*.

La convección térmica es un transporte de calor por medios móviles, los cuales son

- magma, lava
- agua subterránea
- gases.

El flujo de calor terrestre ascendente es principalmente un proceso de conducción térmica en la roca, causada por la diferencia de temperatura entre las partes inferiores de la corteza y la superficie de la tierra.

El agua subterránea toma la temperatura del acuífero, lo que quiere decir: la temperatura de la roca. En la superficie de la tierra la *temperatura media de la roca* T_0 corresponde no exactamente a la *temperatura media anual del aire* \bar{T} , ya que presenta una elevación pequeña, causada por la corriente de calor geotérmica. Por experiencia vale

$$T_0 = \bar{T} + 1 \text{ [}^\circ\text{C]},$$

en donde

T_0 : Temperatura media en la superficie de la tierra

\bar{T} : Temperatura media anual del aire.

El factor climático

Intercambio de calor en la superficie de la tierra

El agua subterránea de los acuíferos someros está sujeta a varios procesos de *intercambio de calor* en la superficie de la tierra, los cuales pueden ser positivos y negativos:

- irradiación de calor solar (+)
- ingreso de calor por precipitación e infiltración (+)
- intercambio de calor con el aire (+, -)
- pérdida de calor por radiación nocturna (-)
- pérdida de calor por evaporación (-)
- calor de condensación por formación de rocío (+)
- corriente ascendente de calor terrestre (+)

Efecto de altura

La tabla 9 muestra algunas temperaturas de aguas subterráneas en la Región de Linares N.L., México (Sierra Madre Oriental). En el diagrama de correlación (figura 116) las temperaturas de las aguas frías son tabuladas en contra de las alturas respectivas de los manantiales. Existe una relación lineal, de la cual se calcula la disminución de la temperatura del agua subterránea con la altura, en éste caso de $-0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$. Esta disminución corresponde a la disminución de la temperatura media anual del aire con la altura.

Manantiales fríos	Temp. [°C]	Altura [msnm]
Ojo de Agua La Escondida (1)	24.0 (6/91)	290
Ojo de Agua Las Crucitas (2)	22.5 (5/91)	500
Ojo de Agua Abajo, Cañón Potosí (3)	20.8 (12/93)	750
Ojo de Agua Guadalupe, Cañón Potosí (4)	20.3 (12/93)	850
Los Chiqueros, Cañón Santa Rosa (5)	19.0 (4/91)	850
El Puerto, Cañón Santa Rosa (6)	18.0 (4/91)	1160
Ojo de Agua Abajo, Iturbide (7)	20.5 (6/91)	1200
Manantial Puente de Dios (8)	20.6 (9/94)	1600
Manantial Dieciocho de Marzo (9)	13.9 (9/94)	2170
Temperatura media anual del aire,		
Linares (60 años)	22.3	350
Temp media anual del aire, Iturbide	17.5	1200
Manantiales termales		
Baño San Ignacio (Campo Curricán)	37.0	245
Laguna El Avileño	30	255
Los Pocitos (Pozo artesiano)	31	242
Baño Azufrado de la Cruz, Cañón Potosí	26.4	1250

Tabla 9: Temperaturas de aguas subterráneas en la Región de Linares N.L., México, con las temperaturas medias anuales del aire de dos estaciones. Para las manantiales fríos véase la evaluación en el diagrama figura 116.— Tomando en cuenta su altura de 1250m, también el Baño Azufrado de la Cruz tiene una temperatura claramente elevada.

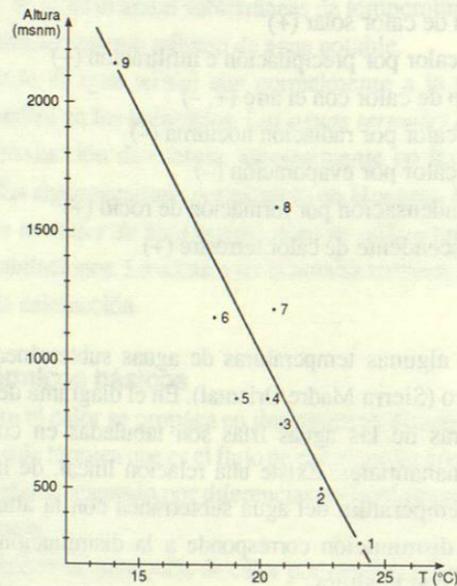


Figura 116: Relación de las temperaturas de los manantiales con la altura en la región de Linares N.L., México (Sierra Madre Oriental). Los valores son tomados de la tabla 9. El manantial 7 (Ojo de Agua Abajo, Iturbide) sale demasiado caliente, ya que probablemente se trata de agua subterránea de un sistema profundo. El manantial 8 (Puente de Dios) también sale demasiado caliente, tal vez debido a la reacción exotérmica por el cambio de anhidrita en yeso. El agua de los manantiales demasiado fríos (6,5) se origina en cuencas bastante más altas.

Variaciones estacionales de temperatura en la zona superficial

La zona superficial de la tierra muestra temperaturas variables hasta una profundidad de aproximadamente 15–20 m. Estas variaciones son causadas por las variaciones estacionales de la temperatura del aire, véase figura 117.

Las variaciones de la temperatura de las aguas subterráneas en los acuíferos someros, corresponden a las variaciones estacionales de la temperatura en la zona superficial de la tierra, sin embargo, con amplitudes más o menos amortiguadas. La amortiguación depende entre otras de la profundidad del sistema de flujo.

Enfriamiento por evaporación

En regiones con temperatura y evaporación alta se pueden observar aguas subterráneas someras de temperaturas extremadamente bajas (por ejemplo Djibouti, Africa del Este: aproximadamente 19°C = aproximadamente 13 °C debajo de la temperatura media anual del aire). Este efecto ocurre donde el nivel freático tiene profundidad pequeña y conexión capilar con la superficie, de tal manera que grandes cantidades de agua subterránea se evaporan directamente. Por el frío de evaporación la temperatura de la agua se descende.

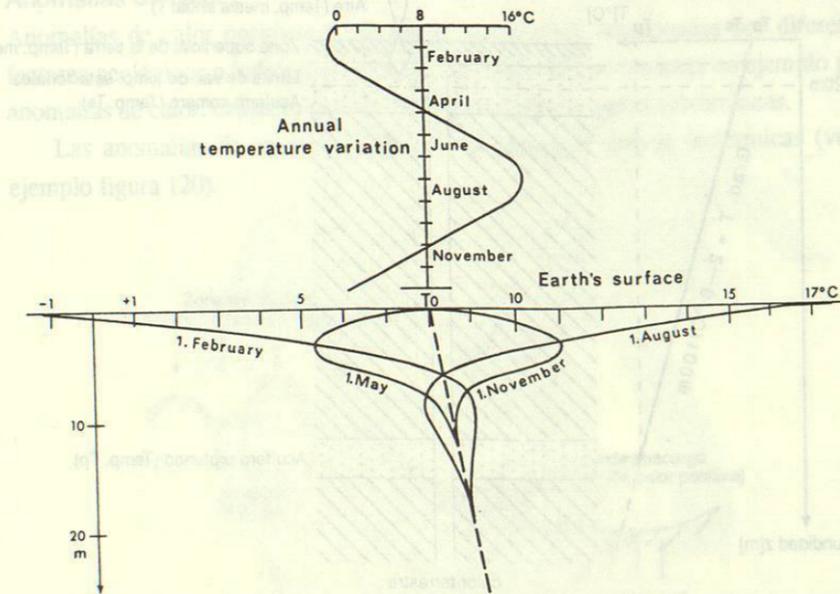


Figura 117: Onda de temperatura en la zona superficial de la tierra, causada por la onda de temperatura del aire (Europa Central). Bajo de una profundidad de 15–20 m la temperatura se muestra constante e influenciada exclusivamente por el flujo de calor geotérmico.— Tomado de WOHLBERG (1979).

El factor geotérmico

El gradiente geotérmico de temperatura

La temperatura del agua subterránea termal depende de la profundidad del acuífero y del *gradiente geotérmico de temperatura*.

El gradiente geotérmico de temperatura (grad T) es el aumento de la temperatura terrestre con la profundidad:

$$gradT = \frac{\Delta T}{\Delta z} [^{\circ}C/100m]$$

Véase figura 118. En zonas geotermales “normales”, se encuentra un gradiente casi lineal hasta una profundidad de más o menos 500 m, de aproximadamente 3°C/100m. El gradiente muestra variaciones en un rango de aproximadamente 2–6 °C/100m, causadas por anomalías de calor de origen no volcánico, positivas y negativas.

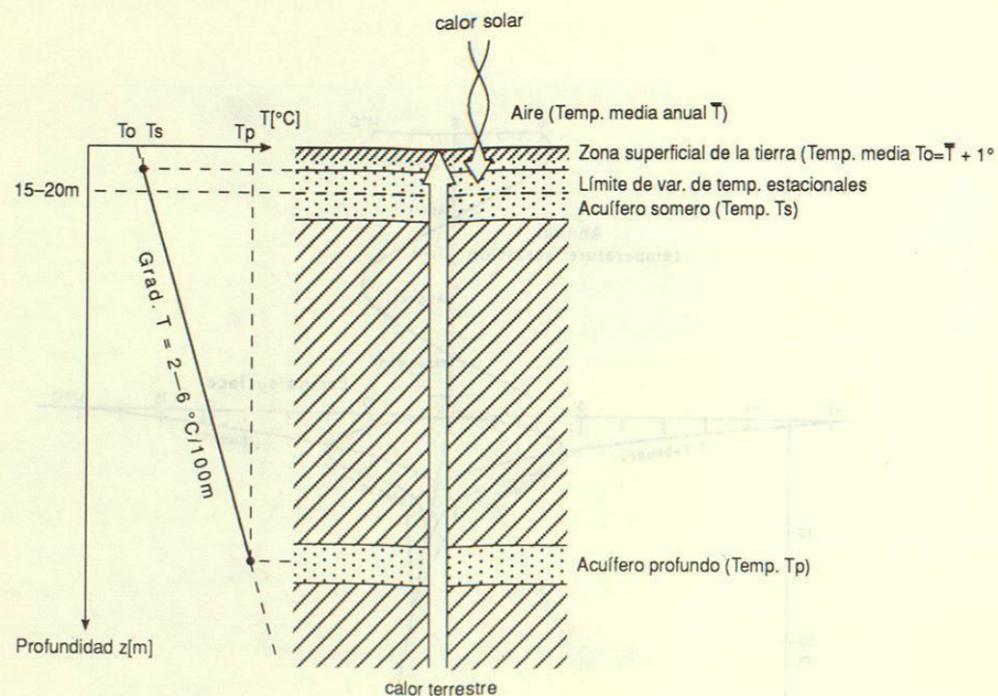


Figura 118: El dibujo esquemático muestra el flujo ascendente de calor terrestre constante que es causado por el gradiente de temperatura, así como la influencia del calor solar, que es variable y alcanza una profundidad de aproximadamente 15–20m. La temperatura T_p del acuífero profundo es afectada exclusivamente por el calor terrestre, mientras que la temperatura T_s del acuífero somero es afectada casi exclusivamente por los factores climáticos. La línea recta del diagrama esquemático a la izquierda representa el gradiente de temperatura. Intersecta la abscisa en el punto $T_0 = \bar{T} + 1$ [°C].

Ejemplo para la estimación de la profundidad de un sistema de flujo de agua subterránea por la temperatura del manantial termal.

En la zona de manantiales del Baño San Ignacio al Este de Linares N.L., México, brotan manantiales termales de una temperatura de $T = 37^\circ\text{C}$. La temperatura media anual del aire de Linares es de $\bar{T} = 22.3^\circ\text{C}$. El gradiente térmico en la planicie costera del Golfo de México se comporta normal, entonces $\text{grad } T =$ aproximadamente $3^\circ\text{C}/100\text{m}$. La estimación de la profundidad z del acuífero se realiza como sigue:

1. Cálculo de $T_0 = \bar{T} + 1 = 22.3 + 1 = 23.3^\circ\text{C}$
2. Vale: $\text{grad } T = \Delta T/z$, o: $z = \Delta T/\text{grad } T$,
en donde $\Delta T = T - T_0 = 37 - 23.3 = 13.7^\circ\text{C}$
3. Con $\text{grad } T = 3^\circ\text{C}/100\text{m}$: $z = 13.7/3 \times 100 \approx 450\text{m}$

Este valor hay que considerarlo como un valor mínimo, ya que se trata probablemente de un agua de mezcla que consiste en un componente de un acuífero profundo y uno somero.

Anomalías de calor

Anomalías de calor positivas o negativas, pueden ser ocasionadas por diferentes factores geológicos o hidrogeológicos. En la figura 119 se presenta un ejemplo para anomalías de calor, causadas por un sistema de flujo de aguas subterráneas.

Las anomalías de calor se presentan en cartas de curvas isotérmicas (véase ejemplo figura 120).

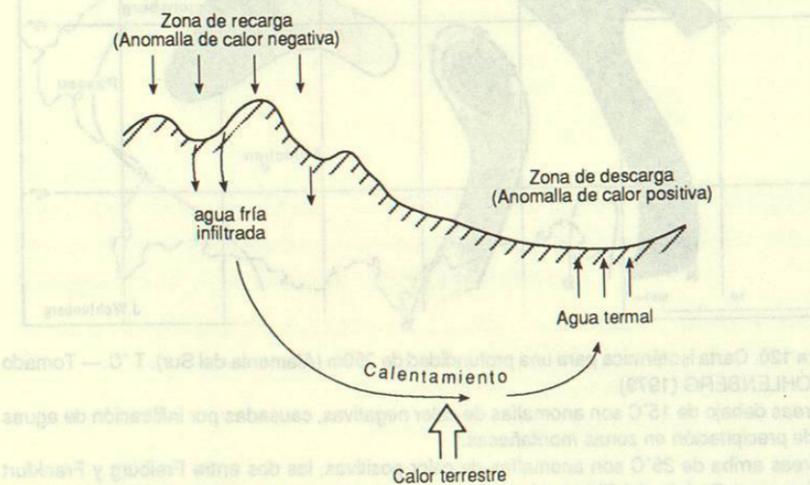


Figura 119: Sistema de flujo de agua subterránea causando anomalías de calor negativas y positivas, por convección de calor.

Ejemplos para la utilización de la temperatura de aguas subterráneas en la metodología hidrogeológica

En muchos casos exfiltraciones o aflujos de aguas subterráneas en un río o un pozo pueden ser comprobados y ubicados por mediciones de temperatura de agua.

Por la utilización de la fórmula de mezcla (págs. 129–131) dos componentes de agua subterránea con temperatura diferente en un pozo pueden ser cuantificados.

El sellado de tramos de pozos profundos puede ser checado por registros de temperatura de pozos.

Las contaminaciones del agua subterránea por aguas lixiviadas de basureros domésticos muestran temperaturas elevadas, causadas por reacciones exotérmicas en la materia orgánica.

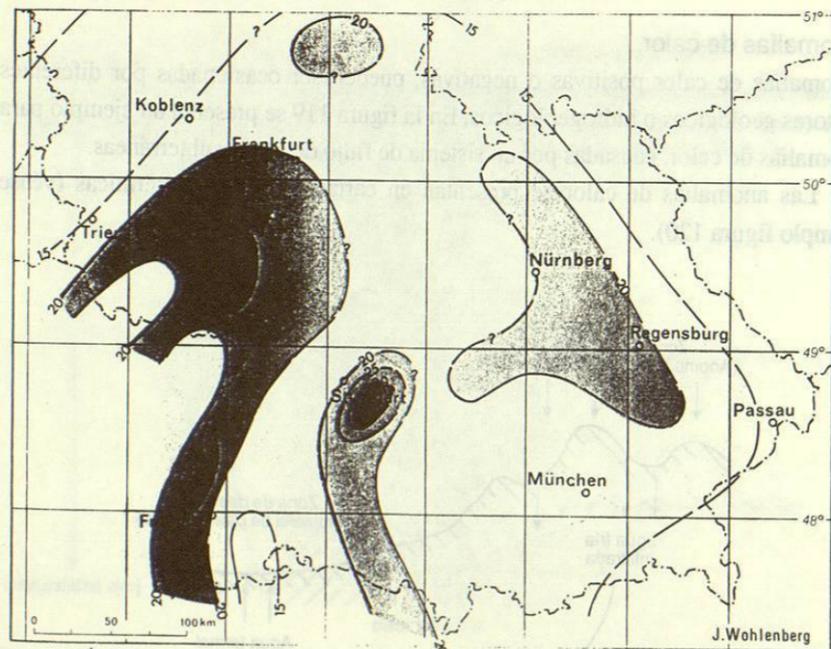


Figura 120: Carta isotérmica para una profundidad de 250m (Alemania del Sur). T °C.— Tomado de WOHLBERG (1979).

Las áreas debajo de 15°C son anomalías de calor negativas, causadas por infiltración de aguas frías de precipitación en zonas montañosas.

Las áreas arriba de 25°C son anomalías de calor positivas, las dos entre Freiburg y Frankfurt situadas en el Graben del Rhin y causadas por aguas termales ascendentes. La anomalía de Stuttgart es causada por capas de conductividad térmica baja o por bióxido de carbono ascendente, no, como se supuso anteriormente, por un foco volcánico remanente en esta región. Este foco se enfrió totalmente desde el Mioceno Superior.

Hidrogeología comparativa de Temas específicos

Generalidades

Con respecto a la cantidad de agua subterránea disponible en alto grado del clima frío y húmedo, por la tabla 10 se muestran los datos hidrogeológicos de tres regiones climáticas diferentes.

	Región 1	Región 2	Región 3
Precipitación (mm/a)	1000	1000	1000
Temperatura media anual de aire (°C)	20	10	10
Evaporación potencial (mm/a)	1000	1000	1000
Tasa de recarga en suelos de permeabilidad alta y capacidad de campo alta (mm/a)	100	100	100
Variedades temperadas de cultivos	Alta	Baja	Baja
Mineralización de aguas subterráneas (mg/l)	100	100	100
Uso de agua subterránea (mm/a)	100	100	100

Tabla 10: Datos hidrogeológicos de tres regiones climáticas diferentes.

La recarga

En las zonas de clima frío y húmedo, la recarga de agua subterránea es alta debido a la alta precipitación y a la baja evaporación potencial. En las zonas de clima cálido y seco, la recarga es baja debido a la baja precipitación y a la alta evaporación potencial.