

Geoquímica de las lluvias, de las aguas de escurrimiento y de infiltración de los suelos

Grünberger O. y Janeau J.-L.

Aportes de elementos por las aguas de lluvias

Las aguas de lluvia contienen una cierta cantidad de elementos mayores disueltos que es preciso considerar en un balance geoquímico global. Los elementos provienen, ya sea de una lixiviación húmeda realizada dentro de la nube, fenómeno conocido como *rain out*, de una lixiviación húmeda bajo la nube o *wash out* o, simplemente del contacto con los depósitos sólidos en el pluviómetro (Junge, 1963). Según parece, en el caso de la lluvia de la Reserva, la parte más importante de la mineralización se debe a ese contacto con los depósitos sólidos (polvos). Éstos dominan sobre la contribución de los aportes aéreos marinos (Meybeck, 1984), debido al carácter continental del sitio.

Tabla 19
Resultados estadísticos sobre la calidad de las lluvias durante 1991
(promedio, mínimo y máximo). Los promedios no contemplan la altura de lluvia

Parámetros medidos sobre el agua de lluvia de las 10 estaciones (136 muestras)		Media	Mínimo	Máximo	Medias de las lluvias con menos carga química (13 muestras)
pH		4.55	2.83	7.16	5.10
Conductividad	(S cm ⁻¹)	160.58	9.46	701.39	25.41
HCO ₃ ⁻	(meq l ⁻¹)	0.90	sd*	4.36	0.51
Cl	(meq l ⁻¹)	1.28	0.30	8.00	0.68
SO ₄ ²⁻	(meq l ⁻¹)	0.32	0.05	0.69	0.16
Ca ²⁺	(meq l ⁻¹)	0.94	0.08	4.72	0.63
Mg ²⁺	(meq l ⁻¹)	0.16	sd*	1.24	0.06
Na	(meq l ⁻¹)	0.44	sd*	4.35	0.09
K	(meq l ⁻¹)	0.06	sd*	0.99	0.03
SiO ₂	(mg l ⁻¹)	3.01	sd*	31.53	1.62
Altura de agua colectada	(mm)	15.2	1.1	105.9	40.0
Temperatura del agua	(°C)	38.8	16.5	61.0	36.4

sd* = Por debajo del umbral de detección.

Las características promedio indican un agua fuertemente mineralizada para ser un agua de lluvia (Tabla 19). Los iones son, por orden de importancia: moles de iones cloruro, bicarbonato, calcio, sodio, sulfato, magnesio y potasio. El pH es ligeramente ácido, lo que es normal para un agua de lluvia. Si se compara este perfil con el 10% de las lluvias menos mineralizadas, observamos que el perfil químico es prácticamente el mismo, la predominancia de iones calcio y cloruro es aún más pronunciada y, en promedio, el pH un poco menos ácido. La altura promedio de lluvia recolectada es

superior, en un factor 2.6, lo que permite suponer que la contaminación química para los depósitos en el pluviómetro es sensible a la altura de agua recolectada. Esta hipótesis se ve reforzada por el aspecto del grupo de puntos, cuyas coordenadas son las alturas de agua y la conductividad eléctrica. De igual manera, la composición química del agua cambia, ya que el contenido de cloruros es más importante que el de carbonatos para estos tipos de agua de lluvia particulares, sin embargo el ión Ca^{2+} sigue siendo el más importante.

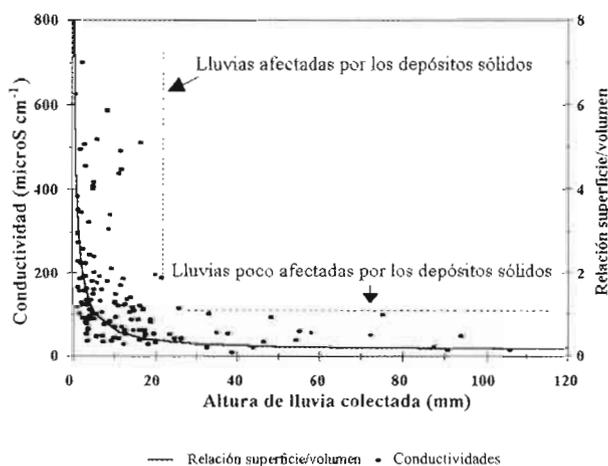


Figura 36. Relación entre la lámina de agua recolectada (mm), la conductividad eléctrica (S cm^{-1}) de las aguas de lluvia y la relación superficie mojada / volumen de agua (cm^2, cm^3) para el tipo de pluviómetro utilizado en las diez estaciones. Resultados de diez estaciones de recolección en 1991. La recolección se hace por evento pluvial.

El análisis de la Figura 36 permite distinguir tres grupos de agua de lluvia:

- las lluvias cuya calidad química se ve poco afectada por los depósitos sólidos que presentan alturas de agua de lluvia superiores a 20 mm;
- las lluvias afectadas por los depósitos sólidos, cuya conductividad es superior a 200 S cm^{-1} y la altura inferior a 20 mm;
- las lluvias inferiores a 20 mm y de conductividades inferiores a 200 S cm^{-1} constituyen un grupo mixto.

El aspecto de la secuencia de puntos puede explicarse mediante la comparación con la relación entre la superficie mojada y el volumen (cm^2, cm^3), en función de la

altura (mm) de lluvia en el pluviómetro. La evolución de esta relación, propia del pluviómetro utilizado, describe una curva que evoca la secuencia de puntos de la figura.

Al considerar que las lluvias, con excepción de las más fuertes, tienen cualidades químicas impuestas por los depósitos sólidos en el pluviómetro de 1380 cm², es entonces posible calcular los aportes de elementos solubles mediante los depósitos sólidos por unidad de superficie.

Para cada elemento *i* y cada pluviómetro medido, se calcula la siguiente suma relacionada con el año 1991:

$$D_i = \sum_{j=\text{inicio}}^{j=\text{fin}} C_{ij} \cdot P_j$$

donde:

D es la cantidad del elemento soluble *i* depositado, (meq m²a⁻¹),

j el día de la colecta,

C es la concentración (meq l⁻¹),

P es la altura de lluvia medida después de la colecta (mm o l m⁻²)

Esta ecuación toma en cuenta la superficie del pluviómetro, lo que permite que sean trazados los diagramas de aportes de elementos por las lluvias (Figura 37, 38 y 39).

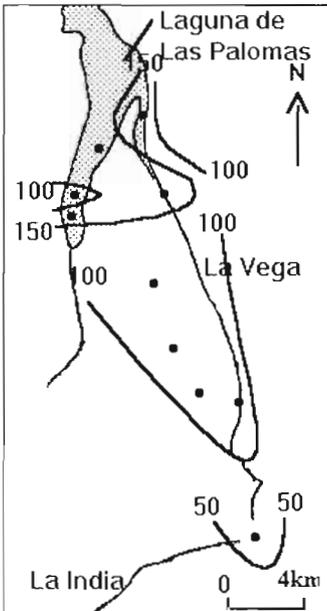


Figura 37. Diagrama de los aportes para 1991 en iones Ca²⁺ por los depósitos sólidos y las lluvias (meq m²a⁻¹).

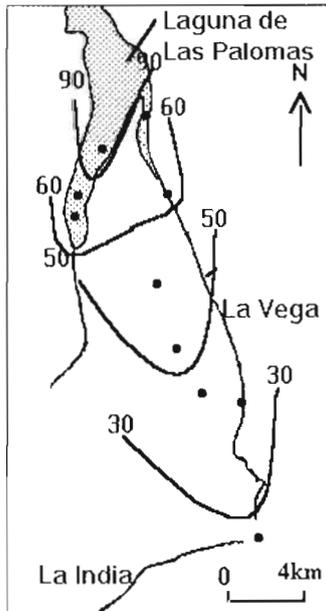


Figura 38. Diagrama de los aportes para 1991 en iones SO₄²⁻ por los depósitos sólidos y las lluvias (meq m²a⁻¹).

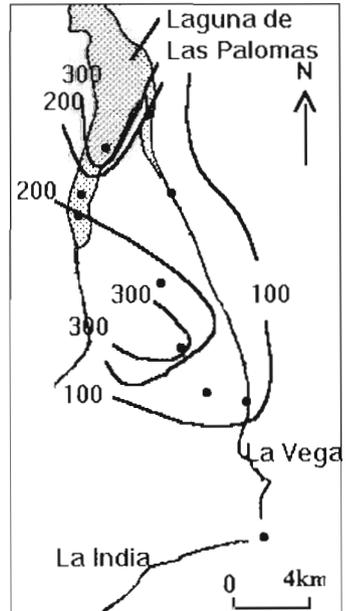


Figura 39. Diagrama de aportes de Cl⁻ para 1991 por los depósitos sólidos y las lluvias (meq m²a⁻¹).

Los diagramas anteriores revelan que los aportes de elementos son generalmente más importantes en las cercanías de la sebkra. Esta evolución muy clara para los iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} es más complicada para los iones Cl^- en donde aparece una zona de aportes importantes en el centro de la playa y altera la forma general de las curvas. El decrecimiento de los contenidos, conforme se aleja uno de las zonas salinas en superficie, tiende a revelar que la distribución por el viento es, ante todo, local. Sin embargo, resulta difícil saber si la sebkra da origen a los flujos de materias solubles que se depositan en el conjunto de la playa, o si cada parte contri-

buye a los aportes en función de su salinidad propia. Los depósitos están constituidos por una mezcla de materiales silíceos y carbonatados y de sales solubles probablemente similares a los elementos “locales” de los polvos saharianos (Coudé Gaussens, 1991).

Sin embargo, a diferencia del Sahara, ningún viento generalizado de arena se produce a pesar de la existencia de campos de dunas silíceas poco estabilizadas. Los aportes de elementos solubles por las lluvias y los depósitos sólidos son relativamente importantes en el lapso de un año y se observan para el año 1991 y siguientes los valores promedio (Tabla 20).

Tabla 20

Promedio de los aportes de elementos solubles por las lluvias y los depósitos sólidos en $\text{meq m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ excepto SiO_2 ($\text{mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	H^+	SiO_2
155.7	188.9	53.6	123.0	16.5	57.2	7.9	17.2	2.9

Estos valores no pueden considerarse como representativos de un flujo que aporta elementos, debido a que la parte generada por los depósitos sólidos es de origen local y proviene de la superficie del suelo cercano al pluviómetro, el cual captura de manera definitiva, los depósitos sólidos destinados a ser redistribuidos posteriormente. Los valores observados son por lo tanto los de un flujo de redistribución.

Química de las aguas de escurrimiento

Las aguas de escurrimiento fueron recolectadas durante la estación de lluvias de 1991, de manera simultánea con las aguas de precipitación. Los recolectores son botellas conectadas a un tubo fijado al nivel de la superficie del suelo. Las estaciones pueden ser agrupadas según varias unidades de

paisaje: Playa alta (estaciones 1, 2, 3, 4) (Ver mapa anexo), playa baja (estaciones 5, 6, 9), sebkra (estaciones 11, 8, 7). Si se analiza la Tabla 21:

- En playa alta las aguas están menos cargadas de compuestos disueltos. El orden de importancia de los aniones es: carbonatos, cloruros, sulfatos; y el orden de los cationes es: calcio, sodio, magnesio, potasio.
- En playa baja las aguas están más cargadas y presentan un cambio de etapas. El orden de los aniones se transforma en: cloruros, carbonatos, sulfatos; el orden de los cationes en: sodio, magnesio, calcio, potasio.
- En la sebkra la calidad de las aguas de escurrimiento es similar a la de las aguas recolectadas en la laguna, presentando

una carga disuelta que aumenta un factor 5.2, en relación con las aguas de la playa baja. El orden de importancia de los aniones es entonces: cloruros, sulfatos, carbonatos; y el de los cationes: sodio, calcio, magnesio, potasio.

El pH, los contenidos de iones carbonatos, de iones potasio y de sílice se mantienen sensiblemente constantes en las tres unidades de paisaje.

Los coeficientes de variación son, de manera generalizada, más importantes en playa baja que en playa alta y que en la sebkra. La playa baja constituye por lo tanto un lugar de transición entre las dos extremidades, en donde las aguas de escurrimiento son: ya sea poco mineralizada (tipo playa alta), o fuertemente cargadas (tipo sebkra).

Tabla 21

Valores promedio y coeficientes de variación de los análisis efectuados en las aguas de escurrimiento de tres unidades de paisaje

Ubicación de las estaciones (número de muestras)		Playa alta (10)		Playa baja (60)		Sebkra (34)		Agua de laguna (2)
Parámetros		Media	C.V.	Media	C.V.	Media	C.V.	Media
pH		7.9	0.1	8.1	0.1	8.1	0.1	7.9
Conductividad (S cm ⁻¹)		454.2	0.5	661.1	1.0	3386.3	1.7	4275.5
CO ₃ ⁻ (meq l ⁻¹)		0.4	0.8	0.5	0.7	0.5	0.6	0.5
HCO ₃ ²⁻ (meq l ⁻¹)		2.6	0.4	3.7	1.3	2.7	0.6	2.2
Cl ⁻ (meq l ⁻¹)		2.7	1.1	16.9	3.6	60.0	2.9	69.7
SO ₄ ²⁻ (meq l ⁻¹)		0.7	0.7	1.7	2.3	5.2	1.4	5.1
Ca ²⁺ (meq l ⁻¹)		2.9	0.6	3.1	0.8	7.6	1.2	12.2
Mg ²⁺ (meq l ⁻¹)		0.8	0.7	6.4	4.2	3.4	2.0	1.5
Na ⁻ (meq l ⁻¹)		2.2	1.4	12.4	4.6	56.9	3.1	63.4
K ⁺ (meq l ⁻¹)		0.3	0.6	0.4	0.5	0.4	0.8	0.5
SiO ₂ (mg l ⁻¹)		9.3	0.4	11.9	0.9	7.7	0.7	17.9
Temperatura (°C)		22.4	0.4	27.5	0.2	29.0	0.1	28.0

C.V.: Coeficiente de variación

La comparación de las características químicas de las aguas de escurrimiento de la sebkra y de las aguas de la laguna podría sugerir que son fruto de un escurrimiento local. Sin embargo, el contenido mucho más importante de sílice parece más bien revelar que se trata de una mezcla parcial con el acuífero salino y/o una cierta concentración por evaporación.

El conjunto de los análisis de las aguas superficiales fue sometido al programa WateqF (Plummer *et al.*, 1988; Plummer *et al.*, 1976) con el fin de calcular las actividades y los índices de saturación con respecto a los minerales más importantes. El programa tiene como principio el empleo de la concentración iónica de la salmuera analizada, el pH y la temperatura en el

momento de la medición; la actividad iónica de la salmuera (basada en la ley de masas y su constante de reacción); y el correspondiente índice de saturación. El programa permite conocer los grados de saturación de la solución, para la mayoría de los minerales que se pueden formar (disolver o precipitar) con las especies iónicas presentes (Harvie *et al.*, 1984). La selección de los minerales que están presentes en la salmuera, es basada en el previo conocimiento de su existencia en el medio, por ejemplo, para la playa es muy conocida la presencia de sales como los carbonatos y los sulfatos (calcita y yeso, respectivamente). De manera sistemática, los índices de saturación a considerar deben ser los de los minerales presentes en la zona de estudio.

Tabla 22

Valores promedio de los resultados del tratamiento WateqF de los análisis realizados en las aguas de escurrimiento de tres unidades de paisaje

Ubicación de las estaciones	Playa alta	Playa baja	Sebkra	Agua de laguna	
Resultados de los cálculos de equilibrio					
Act. H ₂ O	0.999	0.999	0.997	0.997	
Fuerza iónica	0.008	0.027	0.076	0.085	
Log(pCO ₂)	-2.790	-2.950	-3.000	-2.95	
Índices de saturación para:					
Calcita	0.290	0.440	0.510	0.55	***
Aragonita	0.140	0.250	0.370	0.41	***
Dolomita	-0.110	0.300	0.290	0.32	***
Gel de silicio	-0.840	-0.830	-0.990	-0.61	**
Yeso	-2.380	-2.490	-1.790	-1.15	**
Anhidrita	-2.600	-2.520	-1.980	-1.39	
Nahcolita	-5.100	-4.820	-4.360	-3.59	*
Halita	-7.520	-6.700	-5.730	-4.15	*
Mirabilita	-8.690	-7.980	-6.690	-4.55	
Tenardhita	-9.640	-8.860	-7.440	-5.55	
Natron	-9.700	-8.770	-8.050	-6.53	
Trona	-15.890	-14.280	-13.150	-11.32	

*** solución sobresaturada con elementos que forman el mineral en cuestión, ** solución próxima a la saturación,

* mineral que sólo puede ser precipitado cuando hay una fuerte concentración por evaporación.

Los resultados de la Tabla 22 revelan que para las aguas de escurrimiento la actividad del agua sigue muy cercana a 1. La presión parcial en CO₂ disminuye de la playa alta hasta la sebkra, a la vez que sigue siendo superior a la presión parcial en CO₂ de la atmósfera (10^{-3.5}). Las aguas de escurrimiento están, por lo tanto, parcialmente en equilibrio con CO₂ biológico. La evolución de los valores promedio de la playa alta a la sebkra puede explicarse por el decrecimiento de la importancia de la cobertura vegetal en función de la topografía. Además, en la sebkra, el CO₂ tan sólo puede ser de origen microbiológico debido a que la vegetación es inexistente.

Las aguas de escurrimiento indican una sobresaturación constante con respecto a la calcita debido a la presencia importante de este mineral en todos los suelos, que son efervescentes al contacto con el ácido.

Las soluciones están por alcanzar la saturación de su contenido de gel de sílice, lo que resulta sorprendente debido al origen

volcánico de los aluviones, sin excluir la intervención de diatomeas y fitolitos.

Los índices de saturación, con respecto al yeso, aumentan al acercarse a la sebkra, lo que resulta normal tomando en cuenta el aumento de la presencia de este mineral en la superficie del suelo. Sin embargo, la saturación teórica no es alcanzada, probablemente debido a la cinética de la disolución durante el escurrimiento (Capítulo 3.2). Con el fin de estudiar la influencia de la distancia a la laguna sobre la salinidad de las aguas de escurrimiento, a una escala más fina, es necesario distinguir las estaciones que no reciben un escurrimiento local (4, 9, 8 y 11) de las que están situadas en un eje de drenaje importante (La Vega) y que captan aguas procedentes de la cuenca vertiente general (1, 2, 6 y 7).

El reporte de los valores promedio, mínimos y máximos, de las conductividades observadas en cada estación, en función de la distancia a la sebkra, permite observar un comportamiento distinto de cada estación.

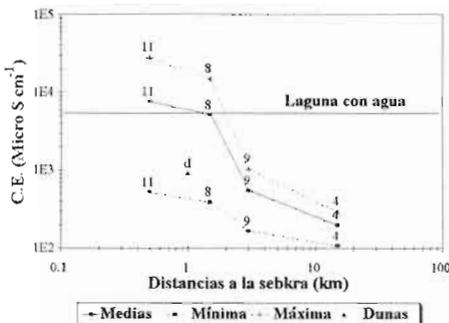


Figura 40. Evolución de las conductividades (C.E. $\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas de escurrimiento en las estaciones de flujo local, en función de la distancia a la laguna.

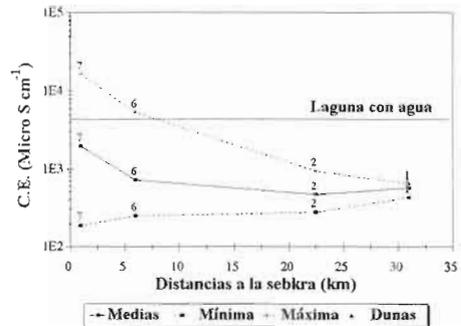


Figura 41. Evolución de las conductividades (C.E. $\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas de escurrimiento en las estaciones de flujo jerarquizado (río La Vega), en función de la distancia a la laguna.

- Para las estaciones de flujo laminar (Figura 40), las conductividades mínimas y máximas decrecen en función de la distancia a la sebkra. Las desviaciones son más importantes en la medida en que la Laguna está más cerca. Los valores de concentración observados en las dunas de yeso son similares a los valores mínimos de las estaciones en las cercanías de la sebkra.
- Para las estaciones ubicadas en el lecho de La Vega (Figura 41), los valores mínimos aumentan en función de la distancia a la laguna. Esto indica que aportes de agua poco mineralizados se producen lateralmente. En cambio, los valores máximos son decrecientes, lo que indica que cuando el flujo es local su salinidad aumenta en función de la distancia a la sebkra. A nivel de la estación 7, ubicada en la desembocadura a la Laguna, en una situación de flujo general de La Vega, llega a la laguna un agua escasamente mineralizada (menos de $200 \mu\text{S cm}^{-1}$). La calidad del agua de la laguna es por lo tanto producto de la salinización de esta agua poco mineralizada.

En conclusión, la calidad de las aguas de escurrimiento es resultado de:

- un equilibrio con el CO_2 biogénico, así como con la calcita (y/o la dolomita) siempre presente en la superficie del suelo;
- del sílice y probablemente una parte difícil por estimar de hidrólisis, que provoca que las soluciones estén prácticamente saturadas con respecto de la sílice amorfa;
- la mineralización al contacto con yeso y halita, lo que genera la mayor parte de la

mineralización de las aguas, cuya conductividad excede $800 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Química de aguas de infiltración del suelo

El agua en el suelo fue captada por tubos de PVC instalados en cada estación, a diferentes profundidades. El agua recolectada por estos tubos es el agua gravitaria, ya que de ser posible no se ejerce presión de extracción alguna. El agua es recolectada después de cada lluvia y, en caso de ser posible, se vacía el tubo.

- Se trata de agua de infiltración, cuando el horizonte particular se satura o cuando se infiltra por gravedad en las fisuras del suelo.
- Por el contrario, cuando existe un acuífero poco profundo, si el nivel piezométrico alcanza el instrumento de muestreo, se trata del agua del acuífero.

Por otra parte, resulta a menudo difícil distinguir entre los dos tipos de agua que pueden mezclarse. Ciertas estaciones nunca presentan un nivel acuífero inferior al metro. Son las estaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 10, todas ubicadas en la playa alta, con excepción de la 5. De hecho, en estas estaciones es relativamente raro recolectar agua mediante este sistema a profundidades superiores a 30 cm. Las estaciones 7, 8, 9 y 11 son estaciones cercanas a la sebkra y, debido a ello, se presenta con cierta frecuencia un nivel acuífero salino a una profundidad inferior al metro.

Características medias

Los resultados promedio de los análisis (Tabla 23) indican que la calidad de las aguas que circulan en el suelo depende en gran medida de la proximidad con la sebkra, es decir, la presencia o no de un acuífero salino a profundidad.

- Las aguas de infiltración, aun cuando el suelo no está sometido a la influencia de un acuífero próximo a la superficie, están mucho más cargadas que las aguas de superficie de playa alta. Su calidad es similar a la de las aguas de escurrimiento de la sebkra, lo que demuestra un cierto nivel de disolución debido al contacto con horizontes superficiales. La fase es clorurado-sódica; los iones son por orden de importancia para los aniones: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y para los cationes Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ . El pH sigue siendo del mismo orden que las aguas de superficie. Sin embargo, la cantidad de carbonatos es sensiblemente superior. De manera general, los coeficientes de variación son más importantes, lo que revela una mayor dispersión de los valores que en las aguas de escurrimiento.
- Las aguas de infiltración, cuando un acuífero salino está próximo a la superficie, adquieren su calidad por lixiviación de

los productos de la concentración de las aguas del acuífero en los horizontes superficiales. Las aguas están, en promedio, diez veces más cargadas. La carga disuelta aumenta principalmente por la halita, aun cuando se observe un incremento de los contenidos de iones Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , SO_4^{2-} ; la cantidad de carbonatos es ligeramente inferior; los coeficientes de variación son, en general, ligeramente inferiores.

- Las aguas del acuífero superficial salino representan el máximo de salinidad registrada de manera natural (con excepción del agua de las cuencas de las salinas). Se trata de un agua sumamente salina de tipo clorurado sódica. Un factor 52.8 separa las concentraciones de cloruros de las de sulfatos. Los contenidos de carbonatos son inferiores al igual que el pH. Los coeficientes de variación de todos los parámetros son mucho más bajos, lo que indica una buena homogeneidad en el seno del acuífero.

Tabla 23

Valores promedio y coeficientes de variación de los análisis efectuados en las aguas de infiltración y de acuífero. Tres situaciones: suelos sin manto freático, horizontes superficiales de suelos con manto freático salino, aguas de manto freático salino

Situación Profundidades (cm)	Sin acuífero de 0 a 100		Con acuífero próximo a la superficie de 0 a 40 de 40 a 100			
	51		85		94	
Resultados sobre:	Media	C.V.	Media	C.V.	Media	C.V.
PH	8.00	0.1	8.05	0.1	7.61	0.0
Conductividad (S cm ⁻¹)	7808.90	2.7	55804.10	1.2	142575.80	0.5
CO ₃ ⁻ (meq l ⁻¹)	0.31	1.8	0.62	1.1	0.24	1.4
HCO ₃ ⁻ (meq l ⁻¹)	4.28	0.9	4.05	0.6	2.58	0.5
Cl ⁻ (meq l ⁻¹)	78.62	2.1	916.11	1.5	2450.58	0.7
SO ₄ ²⁻ (meq l ⁻¹)	8.42	1.7	37.30	1.8	92.68	0.9
Ca ²⁺ (meq l ⁻¹)	17.78	0.7	23.53	0.8	36.90	0.4
Mg ²⁺ (meq l ⁻¹)	2.45	1.5	15.62	1.2	35.53	0.4
Na ⁺ (meq l ⁻¹)	72.73	2.4	895.60	1.5	2419.43	0.7
K ⁺ (meq l ⁻¹)	0.29	1.9	1.02	1.5	3.31	0.7
SiO ₂ (mg l ⁻¹)	15.04	0.4	16.08	1.3	15.06	0.5
Suma de iones (meq l ⁻¹)	181.87	1.9	1893.84	1.5	5041.25	0.7
Temperatura (°C)	27.79	0.1	26.48	0.1	26.12	0.1

C.V. es el coeficiente de variación.

Los resultados señalados en la Tabla 24 son resultado del tratamiento con el programa WateqF de los valores de la tabla precedente, dan lugar a las observaciones siguientes:

- En las aguas de infiltración del suelo, en playa alta, la presión de CO₂ es la más alta debido a la actividad biológica y se aproxima a los valores promedio observados por los autores para los suelos de las regiones semiáridas (Demolon, 1960; Glinka, 1963; Rightmire, 1978). En la sebkra, las aguas tienen presiones equilibrantes inferiores debido a la ausencia de plantas y a la apertura del acuífero en la atmósfera. Las soluciones resultan sobresaturadas con respecto a la calcita y a la

dolomita, en los casos presentados en las figuras; sin embargo, esta sobresaturación decrece en función de la salinidad.

- Las soluciones están cercanas a la saturación en relación con el yeso, desde los primeros horizontes del suelo. La saturación teórica parece establecerse realmente en las aguas del acuífero. El incremento de concentraciones observadas entre las aguas de infiltración de playa alta y el acuífero no debe ser motivo de optimismo; de hecho, se trata de un efecto de la fuerza iónica de solución en la capacidad de disolución del yeso.
- La proximidad de la saturación de halita se establece para el acuífero salino. Sin

embargo, una reducción de volumen del orden de un factor 2 es todavía necesaria para provocar la precipitación de NaCl.

- Los índices de saturación con respecto a la sílice amorfa son cercanos a cero y se incrementan en el acuífero, lo que parece

indicar que un efecto cinético da origen a las subsaturaciones observadas.

- Las concentraciones del acuífero indican que los sulfatos y los carbonatos de sodio tienen escasas probabilidades de encontrarse en el medio.

Tabla 24

Resultados del tratamiento WateqF en los valores promedio de los análisis realizados en las aguas de infiltración y del acuífero. Existen tres situaciones: suelos sin manto freático, horizontes superficiales de suelos con manto freático salino, aguas de manto freático salino

Ubicación de las colectas Profundidades (cm) medias	Sin acuífero	Acuífero próximo a la superficie	
	de 0 a 100	de 0 a 40	de 40 a 100
Actividad del agua	1.00	0.97	0.90
Log de la presión parcial en CO ₂	-2.67	-2.90	-2.90
Fuerza iónica	0.10	1.02	2.99
Índices de saturación			
I.S. calcita	1.18	0.99	0.52
I.S. dolomita	1.68	2.04	1.33
I.S. yeso	-0.87	-0.76	-0.25
I.S. halita	-4.06	-2.00	-0.97
I.S. mirabilita	-4.48	-2.23	-1.20
I.S. nahcolita	-3.23	-2.32	-2.17
I.S. natron	-6.11	-4.18	-4.20
I.S. sílice vidrio	-0.61	-0.42	-0.14
I.S. tenardita	-5.27	-2.94	-1.63
I.S. trona	-10.14	-7.31	-6.97

Evolución de las concentraciones en el tiempo

Debido al escaso número de muestras recolectadas para las estaciones de la playa, resulta difícil describir una evolución estacional de las calidades de las aguas. Por el contrario, en las estaciones de sebkra la proximidad del acuífero y la facilidad con la que el agua se infiltra (ver Capítulo 2),

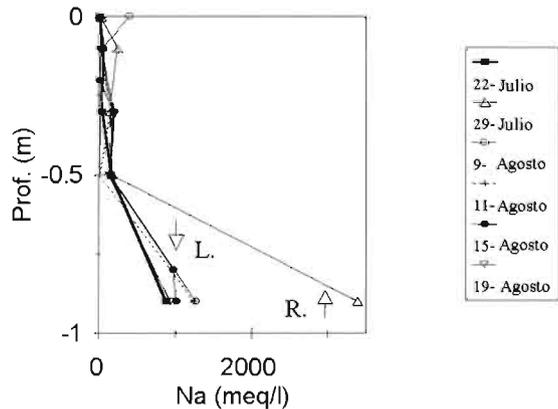
permitió la recolección de un gran número de muestras. Por ejemplo, para la estación 9 (Figura 42), la evolución de las concentraciones después de cada lluvia permite ilustrar un fenómeno de oscilación en los contenidos de las aguas del suelo.

En los datos del 22 de julio se puede observar que el perfil es de lixiviación, en tanto que el 29 del mismo mes, probable-

mente debido a un aumento de volumen del acuífero, los contenidos de iones Na^+ aumentan bruscamente en la parte baja del perfil. Del 9 al 19 de agosto los valores decrecen hasta que el perfil retome los valores iniciales, por dilución y/o descenso del nivel piezométrico. El ejemplo pone en evidencia un medio muy contrastado en contenidos. En la parte alta de un acuífero

muy salino se mantiene, en la franja 0-50 cm, un medio poco salino que propicia el desarrollo de una cobertura vegetal. El efecto de la estación de lluvias es paradójico debido a que contribuye a provocar el aumento de volumen del acuífero salino subyacente, pero produce asimismo un flujo de infiltración que limpia el perfil.

Figura 42. Ejemplo de evolución de los contenidos de iones Na^+ (meq.l^{-1}) de las aguas de infiltración y de acuífero, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 9. Principio de la estación de lluvias en 1991.



Conclusiones

- Las aguas de lluvia presentan, en su origen, concentraciones muy bajas y un perfil clorurado cálcico. Sin embargo, desde su contacto con el pluviómetro y debido al polvo depositado en éste, se mineralizan ligeramente.
- Las aguas de escurrimiento adquieren una mineralización que depende del sitio considerado. En ausencia de minerales solubles de superficie (playa alta), el agua obtiene un perfil carbonatado cálcico. En playa baja, en donde la salinidad en superficie es más elevada, el agua adquiere

una fase clorurada sódica y carbonatada cálcica. En la sebkra, el agua adopta una fase clorurada sódica y sulfatada cálcica al contacto con las costras salinas.

- En lo que se refiere a las aguas en el suelo la fase es clorurada sódica y sulfatada cálcica, desde los puntos menos salinos de la playa. El grado de concentración de la solución y su dominancia por el efecto del cloruro de sodio depende entonces de la proximidad con la sebkra, y de una eventual mezcla con el nivel del acuífero salino.

La mineralización es controlada por los factores siguientes:

- Presencia constante de CaCO_3 y de material sílico-volcánico;
- presencia o ausencia de CO_2 biogénico;
- presencia más o menos demostrada de yeso;
- presencia más o menos demostrada de NaCl .

Es posible considerar que el efecto de las capacidades de intercambios iónicos de

los minerales arcillosos del orden de 10-25 meq.100g⁻¹ (Delhoume, 1988) puede determinar, en parte, la calidad de las aguas menos cargadas de los suelos de playa alta. Sin embargo, estas aptitudes de intercambio no son capaces de explicar la calidad de las soluciones que circulan en el interior del suelo, en los demás casos.

Las
playas
del
desierto
chihuahuense
(parte mexicana)

Editores

Olivier Grünberger
Víctor Manuel Reyes-Gómez
Jean-Louis Janeau



Primera edición, 2004

D.R. © 2004

Instituto de Ecología, A.C.

Km 2.5 carretera antigua a Coatepec No. 351

Congregación El Haya, C.P. 91070

Xalapa, Ver., México

e Institut de Recherche pour le Développement

Calle Cicerón No. 609

Col. Los Morales, C.P. 11530

México, D.F., México

ISBN 970-709-048-0

Impreso en México - *Printed in Mexico*

Título: Las playas del desierto chihuahuense (parte mexicana). Influencia de las sales en ambiente árido y semiárido

Editores: Olivier Grünberger, Víctor Manuel Reyes-Gómez y Jean-Louis Janeau

Coordinación editorial: LDG. Liliana Sánchez Vallejos

Diseño: Iván Flores Hernández y Fernando Rodríguez Hipólito

Revisión de estilo: Aída Pozos Villanueva

Traducción de textos en francés: Annie Soubic de Carrillo

Ilustraciones y fotografías de interiores: Jean-Louis Janeau

Fotografía de la portada: fotografía compuesta, imagen superior tipo LANSAT-TM (1996), imagen inferior Jean-Louis Janeau.

Forma sugerida para citar este libro: Grünberger O., V. M. Reyes-Gómez y J.-L. Janeau (eds). *Las playas del desierto chihuahuense (parte mexicana). Influencia de las sales en ambiente árido y semiárido*. 2004. IRD-INECOL, Xalapa, Veracruz, México, pp. 360.

D.R. © Ninguna parte de esta publicación, incluyendo el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, traducida, almacenada o transmitida de forma alguna ni por ningún medio, ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo del editor. Párrafos pequeños o figuras aisladas pueden reproducirse, dentro de lo estipulado en la Ley Federal del Derecho de Autor y el Convenio de Berna, o previa autorización por escrito de la editorial.

Las
playas
del
desierto
chihuahuense

(parte mexicana)

Influencia de las sales en ambientes
árido y semiárido

Editores

Olivier Grünberger
Víctor Manuel Reyes-Gómez
Jean-Louis Janeau

Instituto de Ecología, A.C.

Xalapa, Veracruz, México

Institut de Recherche pour le Développement

Paris, Francia

2004