

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HYDROLOGY

The Electronic Journal of the International Association for Environmental Hydrology

On the World Wide Web at <http://www.hydroweb.com>

VOLUME 17

2009

MAPAS DE LOS ISÓTOPOS ESTABLES DE OXÍGENO E HIDRÓGENO PARA AGUA SUBTERRÁNEA METEÓRICO EN COSTA RICA, EXCLUYENDO LAS AGUAS GEOTERMALES

Erik B. Melchiorre¹ | ¹Water Resources Institute and Department of Geology
Becky C. Talyn² | California State University, San Bernardino, CA, USA
Katherine Pregger³ | ²Water Resources Institute and College of Natural Sciences,
California State University, San Bernardino, CA, USA
³Consultant, Lajas, Puerto Rico, USA

Presentamos un conjunto de mapas mostrando la distribución de valores de isótopos de oxígeno e hidrógeno con relación al estándar de VSMOW para la nación de Costa Rica. Estos mapas utilizan datos de este estudio (nuevos puntos de datos; 21 pozos, 16 ríos, 14 manantiales) y datos de trabajadores anteriores (51 puntos de datos para ríos, Lanchriet y Patterson, 2002; 13 puntos de datos para manantiales, Darling et al., 1989). “Kriging” esférico generado por computadora con una variable de 12 puntos fue usado para producir contornos de isótopo interpolados para cada mapa. Un efecto de la altitud de 1.5 a 3 por mil fue observado localmente, con una disminución sobrepuesta en $\delta^{18}\text{O}$ con la latitud decreciente para posiciones de elevación baja. Se requiere trabajo adicional a lo largo de la frontera con Nicaragua en el norte de la Península Nicoya y en el sur de la Cordillera de Talamanca para producir un mapa más completo. Colaboradores potenciales que desean proporcionar muestras o datos de estas áreas debieran ponerse en contacto con los autores. Estos mapas serán actualizados, añadiendo datos nuevos y fijados en el Internet (<http://csusb.edu/>).

INTRODUCCIÓN

Los datos de isótopos estables para el agua subterránea son importantes para entender el flujo del agua subterránea, la interacción del agua con la superficie, el recargo del agua subterránea y del agua de los manantiales, y para la interpretación de información paleo clima. Los datos de los isótopos de oxígeno e hidrógeno para el agua subterránea en América Central y estudios que examinan la distribución de isótopos estable en la zona tropical son escasos (e.g., Payne y Yurtsever, 1974; Darling et al., 1989; Salati et al., 1979; Gonfiantini et al., 1976; Longinelli y Edmond, 1983; Gat y Matsui, 1991; Njitchoua et al., 1999; Lachniet y Patterson, 2002; Lachniet y Patterson, 2006; Poveda et al., 2006). Los estudios en Costa Rica se han concentrado predominantemente sobre el agua como recurso (e.g., Sanabria, 2001), aguas superficiales (Lachniet y Patterson, 2002; Lachniet et al., 2007), o aguas de acuíferos volcánicos que han sido modificados hidrotermalmente (Darling et al., 1989; Pringue et al., 1990; Pringue, 1991; Genereux y Pringue, 1997; Birkle y Bundschuh, 2007). Esta carencia de datos para la distribución de isótopos estables de las aguas subterránea en Costa Rica ha restringido su uso tanto en estudios de paleo clima como en estudios de agua subterránea.

Precipitación

Datos limitados de isótopos estable de la precipitación en Costa Rica están disponibles (e.g., IAEA/WMO, 1998; Lachniet y Patterson, 2002). Las desventajas de estos estudios incluyen una predilección espacial hacia el noroeste de Costa Rica, una restricción de período de tiempo limitado dominada por el período de 1990-3, y datos acompañantes que tienen poca información de la cantidad de precipitación y de la temperatura. Sin embargo, los datos demuestran que los valores de isótopos de precipitación resultan en una ecuación de marca del nivel del agua ($\delta D = 7.8 \times \delta^{18}O + 7.9$; Lachniet y Patterson, 2002) que es semejante a la marca del nivel del agua meteórica global ($\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$; Craig, 1961) y que la precipitación varía con la temporada (Lachniet y Patterson, 2002). La correlación de estos datos con elevación para la Cuesta Caribe y para las alturas centrales de Costa Rica indica una disminución en el valor $\delta^{18}O$ de un -1.9‰ por kilómetro de elevación (Lachniet y Patterson, 2002), que es comparable a los valores descritos en otras publicaciones para otras partes de la zona tropical y Norteamérica (e.g., Payne y Yurtsever, 1974; Rozanski et al., 1993; Rose et al., 1996; Melchiorre et al., 1999).

Los aguas de la superficie

Datos de isótopo estable para el agua de la superficie de Costa Rica están disponibles en Darling et al. (1989) y en Lachniet y Patterson (2002). Los nueve análisis isótopo al agua del río presentados por Darling et al. (1989) proporcionan solamente posiciones de prueba generalizadas y son de áreas donde la actividad hidrotermal asociada con volcanes pueden modificar considerablemente a las aguas. Doce (12) de las 63 muestras de ríos y lagos relatadas por Lachniet y Patterson (2002) son de lagos o pantanos donde la modificación, debido a la evaporación, podría haber alterado los valores de isótopos. A pesar de estos defectos y la cobertura limitada en algunas partes de Costa Rica, Lachniet y Patterson (2002) presentan mapas de $\delta^{18}O$ y δD para agua superficial que son confiables y detallados.

Acuíferos volcánicos y aguas geotérmicas

Existe evidencia que el agua subterránea en partes del valle central de Costa Rica recibe una cantidad significativa de recarga desde una fuente que ha sido alterada por la actividad hidrotérmica. Eso basado en una desviación positiva de $\delta^{18}O$ del nivel del agua meteórica local y una desviación local de $\delta^{18}O$ local versus elevación (Darling et al., 1989). Además, estudios geoquímicos

sugieren que una porción del agua subterránea de la cuesta caribe de Costa Rica contiene cantidades significativas de agua que ha sido modificada geotermalmente (Pringle et al., 1990; Pringle, 1991; Genereux y Pringle, 1997). En este estudio, los valores de isótopos de estas aguas modificadas son interpretados como no representante del agua subterránea meteórica.

Objetivos de este estudio

Examinamos los valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD de manantiales, pozos y ríos crecientes para producir mapas que demuestran la distribución espacial observada para los valores de isótopos estables para el agua subterránea de Costa Rica. Además, examinamos el valor $\delta^{18}\text{O}$ versus el declive de elevación en el área de Caribe Monteverde y en la Península Osa Pacífica. Los valores de isótopos de agua meteórico, del desagüe superficial, del recargue de poca profundidad de manantiales y aguas geotermales son más allá del alcance de este estudio y por lo tanto no son presentados aquí. El intento de estos mapas es asistir en estudios futuros de paleo clima, vulcanología, e hidrología en Costa Rica.

MÉTODOS

La toma de muestras para ríos fue concentrada a secciones creídas que representan crecimiento, ósea ríos aumentados de flujo base. Un cambio de temperatura abrupto y / o flujo surgente indicativo de un recarga localizada significativa de flujo base fueron usados como indicadores cualitativos para la identificación de tales secciones. Las muestras del agua para el análisis de los isótopos fueron recogidas en una botella de cristal de boro silicato con una tapa "polyseal". Las muestras de agua fueron preparadas para el análisis de isótopo usando el método común de equilibración de CO_2 para los isótopos de oxígeno (Epstein y Mayeda, 1953) y por equilibración de gas de hidrógeno para los isótopos de hidrógeno (e.g., Horita, 1998). Los valores de isótopos fueron medidos usando un equilibrador de muestras automatizado, en conjunto con un espectrómetro gaseoso de masa (Finnigan Delta Plus Advantage) en la Universidad del Estado de California, San Bernardino. Los resultados están relatados en la notación común de δ relativos a "Vienna Standard Mean Ocean Water" (VSNOW) (Coplen, 1995). La precisión de laboratorio es $\pm 0.08\%$ para valores de isótopos de oxígeno y $\pm 1.2\%$ para los de hidrógeno, basado en análisis duplicado de los estándares internos. Ocho de las aguas tenían valores de δD al igual que los de $\delta^{18}\text{O}$ que cayeron fuera del nivel del agua meteórico global y que tenían química fuera de lo común, como valores de TDS muy elevados. Se asumió que estas aguas eran modificadas (e.g. antropogénico, hidrotermal) y no se usaron en este estudio.

Los mapas de isótopos fueron generados usando los datos disponibles para el agua subterránea, el agua de manantiales, y el agua de ríos que tenían un componente significativo de flujo base de agua subterránea. El contorno interpolado de estos datos fue realizado usando "kriging" esférico con una variable de 12 puntos y usando ARC-INFO Geographic Information Software. Este método y sus condiciones están descritos en McBratney y Webster (1986). La variación se calculó usando el promedio de todas las parejas de puntos que cayeron dentro de cada intervalo de tamaño de célula. Este gráfico de variación fue entonces apareado automáticamente a los puntos de variación usando el método de aproximación de "least-squares" no lineal de Levenberg-Marquardt (Press et al., 1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recogimos y analizamos el agua de 21 pozos, 16 ríos crecientes y 14 manantiales a elevaciones desde 10 a 2,994 metros sobre el nivel del mar (Figura 1, Tabla 1). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas dieron un rango de -12.9 a -3.2‰, mientras el rango de valores de δD fue de -84 a -14‰.

Tabla 1. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD (VSMOW) para muestras de agua subterránea en Costa Rica.

Muestra	Muestra	Muestra	Muestra			Elevación	$\delta^{18}\text{O}$	δD
#	Nombre	Tipo	Datar	Norte	Oeste	(meters)	(VSMOW)	(VSMOW)
1	Cano Palma Well	Pozo	22-Dec-01	10° 35.618'	83° 31.650'	10	-3.20	-14
2	Jaco Well	Pozo	29-Dec-01	09° 37.291'	84° 38.070'	12	-7.68	-49
3	Rio Puerto Viejo at La Selva	Río	25-Dec-01	10° 25.882'	84° 00.309'	15	-4.34	-22
4	Quepos Well	Pozo	2-Jan-02	09° 27.347'	84° 09.000'	18	-7.45	-45
5	Rio Blanco at Hyw 1	Río	28-Dec-01	10° 28.358'	85° 10.809'	20	-5.95	-35
6	Rio Suerte at Bannana Boat Stop	Río	22-Dec-01	10° 31.501'	83° 37.755'	21	-3.83	-17
7	Rio Peje at La Selva	Río	24-Dec-01	10° 25.926'	84° 01.556'	21	-5.24	-17
8	Campanario Station Springbox	Manantiale	31-Dec-01	08° 38.553'	83° 43.530'	22	-7.35	-45
9	Puerto Viejo Well	Pozo	3-Jan-02	09° 39.679'	82° 46.911'	22	-5.63	-34
10	Sierpe River at Sierpe	Río	2-Jan-02	08° 51.598'	83° 28.289'	24	-8.14	-51
11	Sierpe Town Well	Pozo	30-Dec-01	08° 51.601'	83° 28.299'	27	-8.01	-52
12	Rio Terrabe at Palmar Norte	Río	2-Jan-02	08° 57.506'	83° 27.501'	31	-8.25	-52
13	Rio Suerte at La Suerte Station	Río	27-Dec-01	10° 26.734'	83° 47.194'	32	-5.07	-27
14	Rio Tarcoles Well at Los Crocodrilos	Río	29-Dec-01	09° 48.100'	84° 36.406'	33	-7.49	-44
15	Loma Well	Pozo	29-Dec-01	09° 32.707'	84° 23.422'	34	-7.29	-44
16	Dominical Well at Dominical	Pozo	2-Jan-02	09° 15.414'	83° 51.762'	37	-7.28	-43
17	Cariari Well	Pozo	26-Dec-01	10° 23.011'	83° 46.899'	38	-4.19	-24
18	La Suerte Station well (12m deep)	Pozo	27-Dec-01	10° 26.312'	83° 47.165'	41	-4.02	-18
19	La Selva Well (30m deep)	Pozo	25-Dec-01	10° 25.880'	84° 00.170'	48	-3.59	-16
20	Siquirres Well	Pozo	26-Dec-01	10° 06.140'	83° 31.190'	91	-5.16	-27
21	Bratsi Well	Pozo	3-Jan-02	09° 33.899'	82° 53.662'	92	-6.22	-38
22	Rio Lari	Río	3-Jan-02	09° 31.725'	82° 58.214'	104	-6.97	-47
23	Rio Lagarto at Hyw 1 near Yomale	Río	15-Dec-01	10° 09.989'	84° 54.856'	118	-8.37	-51
24	Liberia Well	Pozo	28-Dec-01	10° 37.289'	85° 26.393'	147	-6.09	-37
25	Las Juntas Well	Pozo	15-Dec-01	10° 17.152'	84° 57.525'	150	-7.88	-50
26	Rio Aguijas Spring	Manantiale	1-Jan-02	08° 39.013'	83° 40.331'	182	-8.07	-50
27	Ganado Spring	Manantiale	2-Jan-02	08° 43.162'	83° 35.813'	301	-8.20	-52
28	Santa Rosa Park Well	Pozo	29-Dec-01	10° 50.370'	85° 37.092'	312	-7.19	-42
29	Potrero Grande Well	Pozo	2-Jan-02	09° 01.000'	83° 11.000'	320	-9.75	-61
30	Rio San Juan at Angeles	Río	16-Dec-01	10° 16.217'	84° 54.031'	342	-8.51	-54
31	Rio Sucio at Hyw 32 bridge	Río	22-Dec-01	10° 08.840'	83° 56.777'	360	-5.88	-34
32	Guancimal River at Bridge	Río	20-Dec-01	10° 12.983'	84° 51.048'	480	-7.22	-41
33	Madre Maria Spring, near las Juntas	Manantiale	16-Dec-01	10° 15.989'	84° 52.421'	490	-8.73	-55
34	Cerro Brujo Spring	Manantiale	1-Jan-02	08° 39.641'	83° 36.628'	498	-8.53	-53
35	Spring above Dos Brazos	Manantiale	1-Jan-02	08° 32.091'	83° 29.348'	610	-8.58	-55
36	Well at Tinamase	Pozo	30-Dec-01	09° 17.317'	83° 47.473'	616	-8.56	-54
37	San Isidro General, Well	Pozo	2-Jan-02	09° 02.010'	83° 20.090'	803	-9.62	-61
38	Rio Penas Blancas at "the Germans"	Río	18-Dec-01	10° 17.893'	84° 44.419'	891	-5.97	-36
39	Palmares Well	Pozo	15-Dec-01	10° 03.420'	84° 26.050'	992	-9.65	-62
40	Grecia Spring at Atenas	Manantiale	15-Dec-01	10° 04.006'	84° 19.000'	1002	-9.77	-65
41	San Vito Well	Pozo	2-Jan-02	08° 50.000'	82° 58.000'	1050	-9.32	-60
42	Monteverde #1	Manantiale	18-Dec-01	10° 17.859'	84° 45.813'	1140	-6.66	-44
43	Monteverde #2	Manantiale	18-Dec-01	10° 17.924'	84° 45.998'	1160	-6.87	-45
44	Monteverde #3	Manantiale	18-Dec-01	10° 17.899'	84° 46.251'	1220	-7.13	-44
45	Big Creek, Monteverde	Río	20-Dec-01	10° 18.586'	84° 48.711'	1403	-7.02	-45
46	Cheese Factory Creek, Monteverde	Río	20-Dec-01	10° 18.279'	84° 48.538'	1404	-7.05	-43
47	Tunnel Spring, Hyw 32 at Zurque Peak	Manantiale	28-Dec-01	10° 04.018'	84° 00.322'	1523	-7.90	-50
48	AyA Spring, Monteverde	Manantiale	20-Dec-01	10° 17.997'	84° 48.339'	1546	-7.95	-54
49	Monteverde #4	Manantiale	18-Dec-01	10° 18.166'	84° 47.002'	1580	-8.51	-59
50	Villa Mills Well	Pozo	2-Jan-02	09° 20.785'	83° 20.129'	2909	-12.52	-83
51	AyA Spring at Hyw 2 marker 96	Manantiale	2-Jan-02	09° 33.627'	83° 42.481'	2994	-12.92	-84



Figura 1. Localización de las muestras de agua usados en este estudio.



Figura 1 (continuado). Localización de las muestras de agua usados en este estudio.

Este estudio también utiliza datos de isótopos para 51 ríos presentado en Lachniet y Patterson (2002). El grado de flujo base en los puntos de prueba para estos ríos no podía ser determinado para muchas de las localizaciones. Sin embargo la consistencia general de estos datos para el agua superficial con nuestros datos para el agua subterránea (enseñado en Figura 4) sugiere una interacción significativa del agua superficial con el agua subterránea a través de Costa Rica. Esto coincide con nuestra observación que la mayor parte de los ríos, con la excepción de unos de ellos en áreas semiáridos del noroeste, tienen un flujo base significativo. La concordancia espacial y temporal entre nuestros datos y los de Lachniet y Patterson (2002) también sugiere que estas muestras representan aguas meteóricas y no aguas modificadas considerablemente por la actividad hidrotermal. Por estos motivos usamos los datos de Lachniet y Patterson (2002) en nuestra generación de los mapas de valores de isótopos de Costa Rica.

También usamos datos de Darling et al. (1989) de 13 manantiales. Omitimos los datos de otros manantiales donde los autores de este estudio sugieren que contienen aguas modificadas geotermalmente o que diferenciasen considerablemente de la línea del agua meteórico global. No se utilizó los datos de posos de Darling et al. (1989) por que no se identificaron las posiciones específicas.

Distribución de valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD

Los datos isótopo de oxígeno e hidrógeno de este estudio de 115 posiciones únicas del agua subterránea y del agua superficial alimentado por flujo base y los datos de otros (Darling et al., 1989; Lachniet y Patterson, 2002) fueron compilados y perfilados para mostrar la distribución a través de Costa Rica (Figuras 2 y 3). Los valores de isótopo del agua subterránea exponen una variación espacial con respecto a la elevación, similar al efecto observado en aguas localizadas alrededor del mundo (e.g., California, Melchiorre et al., 1999; Panamá, Lachniet y Patterson, 2006). Además, áreas de baja elevación en la costa exponen una correlación con la latitud con valores inferiores generalmente al sur y valores más altos al norte. Como esperaba, el nivel de agua meteórico para agua subterránea en Costa Rica ($\delta\text{D} = 7.7 \delta^{18}\text{O} + 11.1$; Figura 4) es muy semejante al nivel de agua meteórico global ($\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961).

Una anomalía significativa ocurre en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del mapa, cerca de Canas en la parte norte central de Costa Rica. Existe en esta área remota un aumento inexplicable en valores $\delta^{18}\text{O}$. Es muy probable que estas valores de $\delta^{18}\text{O}$ diferentes son artefactos de la frecuencia baja de toma de muestra y que los valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ están relacionados con un área semejante en la zona costal. Solamente la toma de muestras adicionales en esta área rugosa y lejano resolverá este asunto. No se observa ningún efecto semejante para los valores de δD debido a la resolución del intervalo de contorno seleccionado.

Factores que controlan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y de δD

- Efectos de elevación sobre valores de $\delta^{18}\text{O}$

El examen de la relación entre valores de $\delta^{18}\text{O}$ y elevación en los sitios de prueba correspondiente demuestra una correlación de $R=0.63$. El escrutinio de esta relación revela que las desviaciones entre $\delta^{18}\text{O}$ y elevación resultan de dos mecanismos. Primero; efectos de elevación local que producen distintas correlaciones locales entre $\delta^{18}\text{O}$ y elevación. O sea, correlaciones con distintos valores de pendiente e intercepto (Y). Segundo; un efecto dependiente a la latitud para áreas costales de baja elevación.

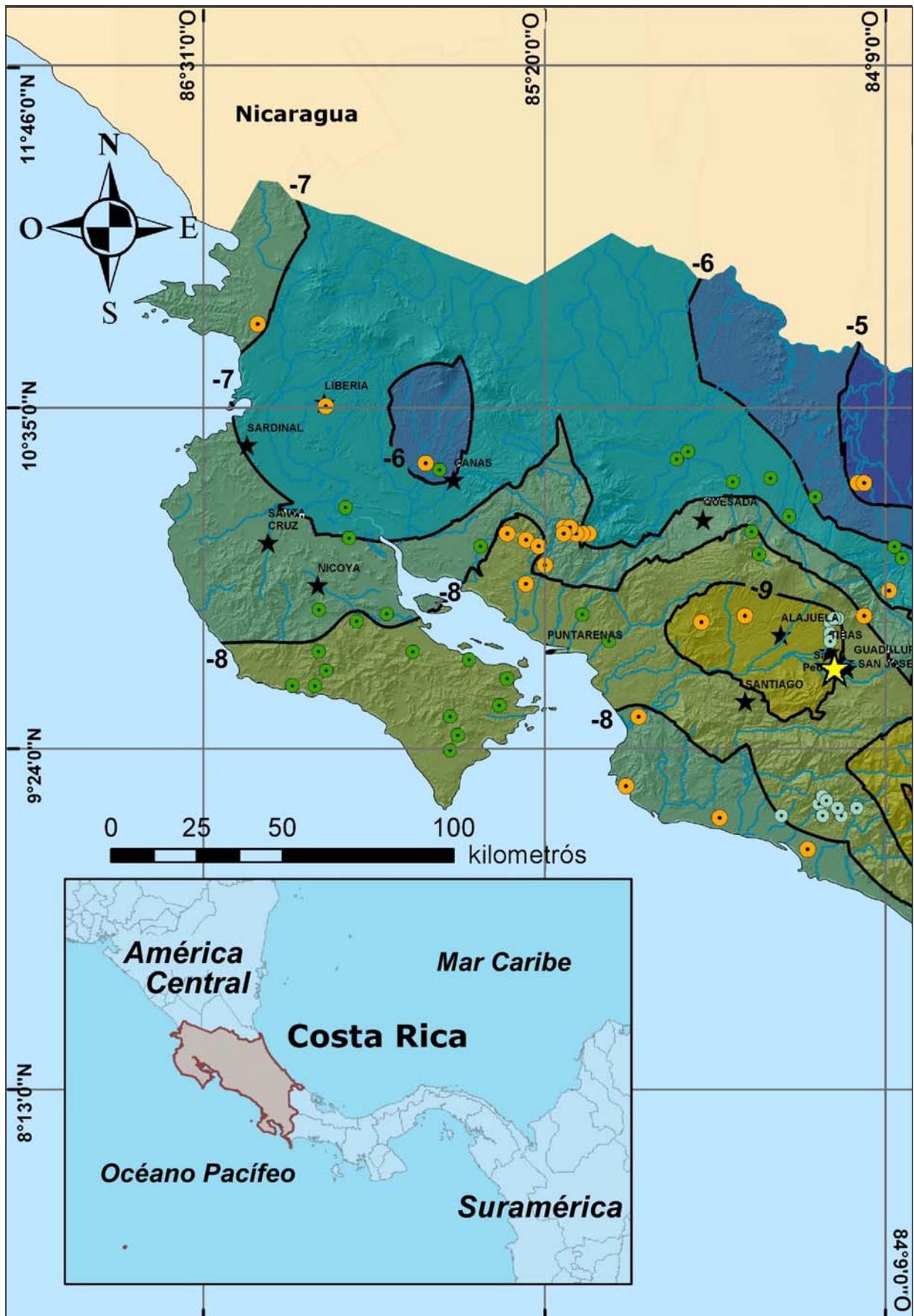


Figura 2. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) para agua subterránea en Costa Rica.

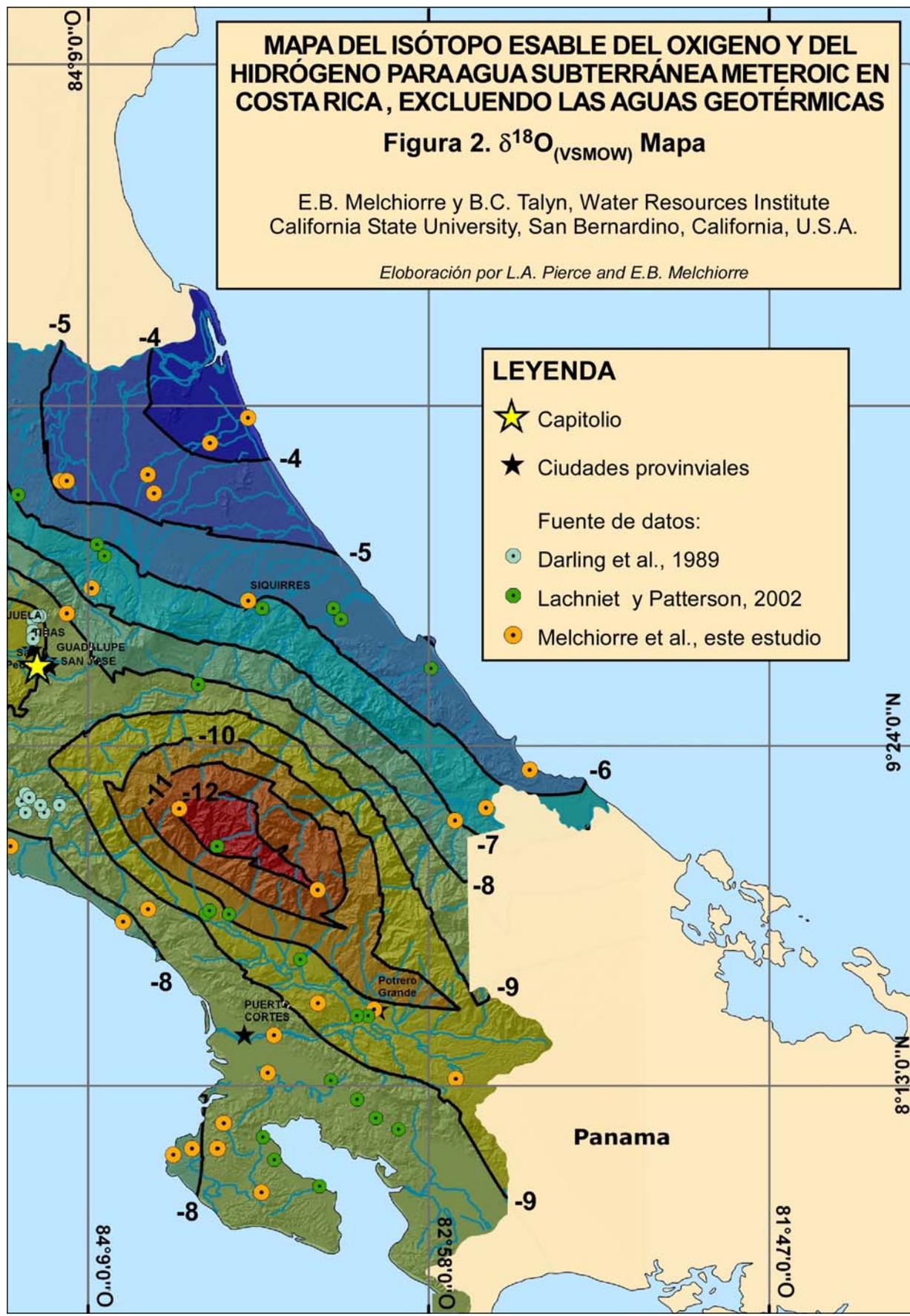


Figura 2 (continuado). Valores de $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VSMOW})}$ para agua subterránea en Costa Rica.



Figura 3. Valores de δD (VSMOW) para agua subterránea en Costa Rica.

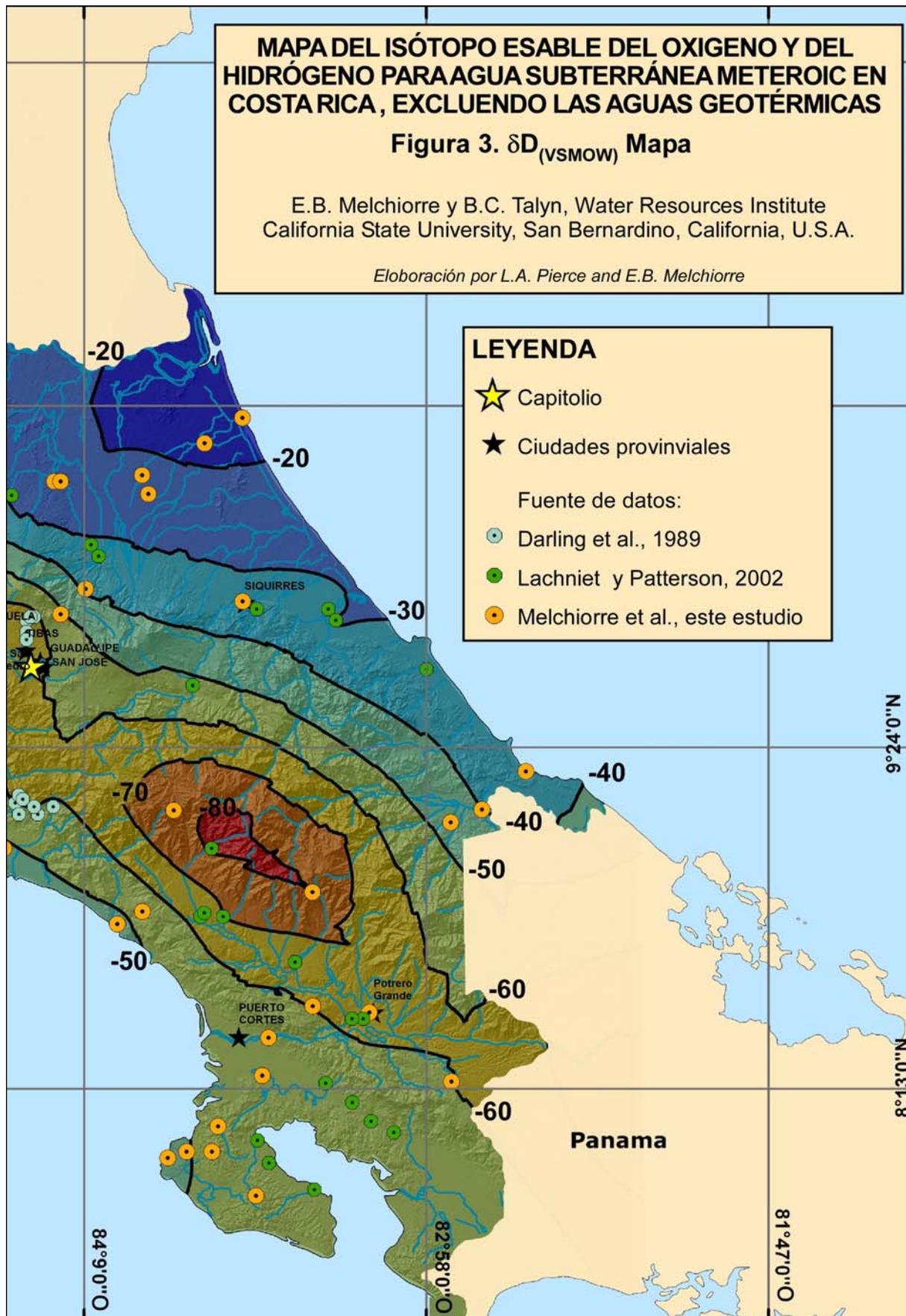


Figura 3 (continuado). Valores de $\delta D_{(VSMOW)}$ para agua subterránea en Costa Rica.

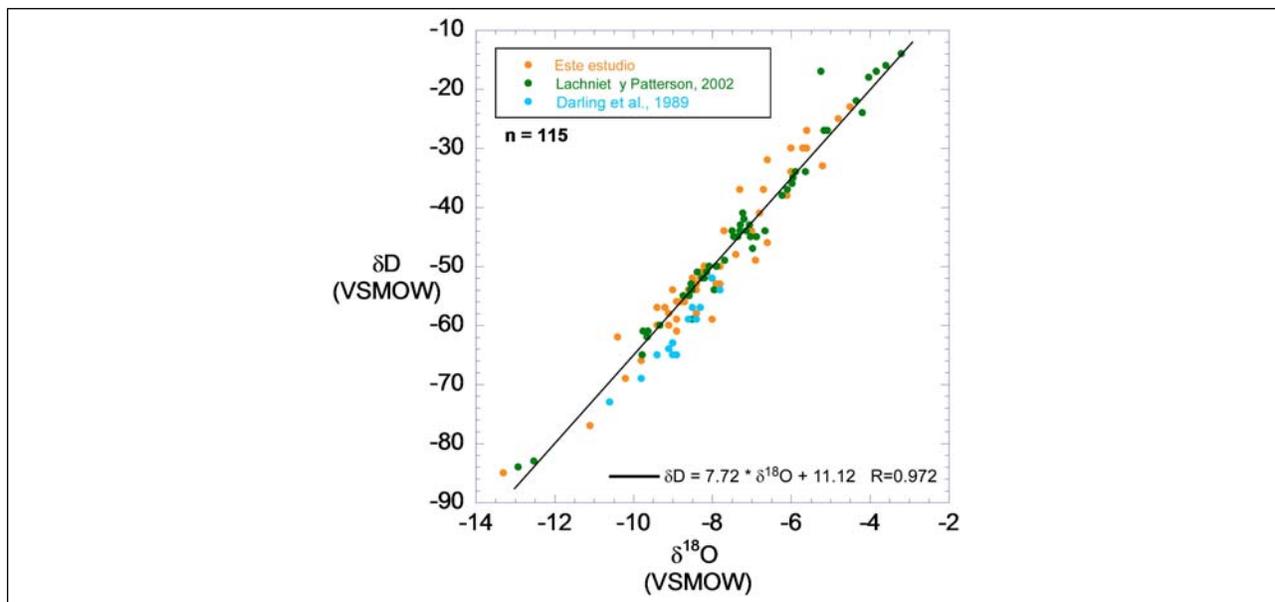


Figura 4. Grafico de $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) versus δD (VSMOW) para muestras usadas en este estudio.

La variación local en fraccionamiento ortográfico de isótopos no es inesperada. La costa Pacífica tiene una temporada lluviosa entre Mayo y Octubre en el norte y entre Abril y Diciembre en el sur. La precipitación es una consecuencia de convección termal y brisas del mar. La costa Caribe recibe precipitación durante todo el año debido a los vientos alisios que van hacia el noreste (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration, 2008; Proveda et al., 2006). Los datos de la Península Osa en la costa Pacífica definen una disminución en $\delta^{18}\text{O}$ de un 1.5‰ por cada 1000 metros de aumento en elevación (Figura 6a); En cambio los datos del Valle Monteverde / Río Penas Blancas en la costa Caribe define una disminución en de $\delta^{18}\text{O}$ de un 3‰ por cada 1000 metros de aumento en elevación. Se cree que esta diferencia entre las dos costas está controlada por diferencias en sus climas y diferencias en las temperaturas oceánicas, con una influencia local que proviene de un aumento de recarga de flujo base y la humedad específica (e.g. Gonfiantini et al., 2001; Blisniuk y Stern, 2005). Sobre estas variaciones se hace difícil describir con certeza una tendencia general del cambio de $\delta^{18}\text{O}$ con respecto a la elevación para la nación de Costa Rica.

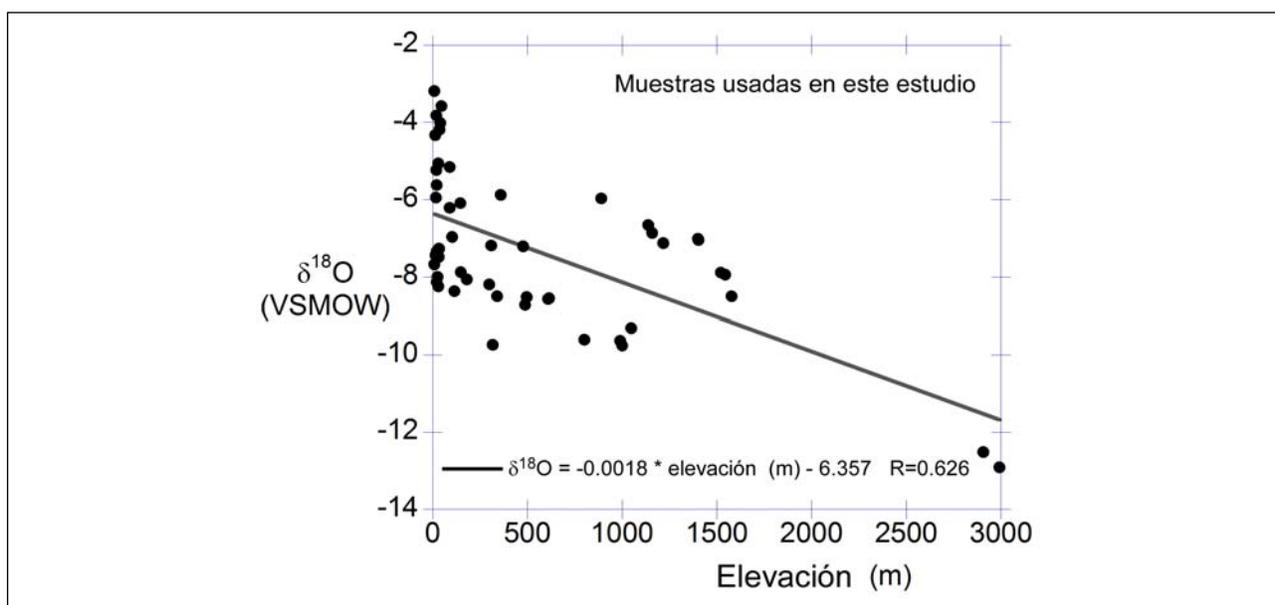


Figura 5. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) versus elevación para muestras usadas en este estudio.

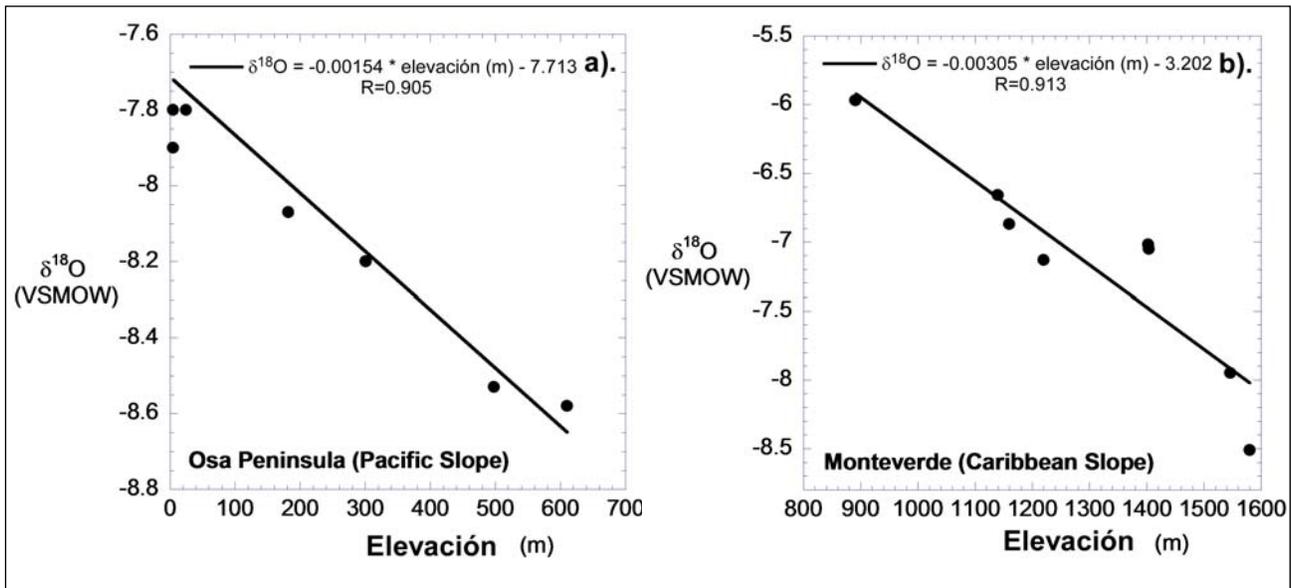


Figura 6. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) versus elevación para muestras de a) la Península Osa y de b) el área de Monteverde.

• Efectos de latitud sobre valores de $\delta^{18}\text{O}$

Muestras de agua subterránea en este estudio con elevaciones de <100 metros sobre el nivel del mar demuestran una correlación significativa ($r=0.7$) entre $\delta^{18}\text{O}$ y latitud con una disminución observada en $\delta^{18}\text{O}$ con latitud decreciente (Figura 7). La correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y latitud ($r=0.71$) también fue observada para muestras de aguas superficiales en la nación vecina de Panamá (Lachniet y Patterson, 2006), aunque este estudio compara muestras de todas las elevaciones. Una reexaminación de los datos de Panamá de Lachniet y Patterson (2006) demuestra que existe una correlación aún más fuerte ($r=0.79$) para todas las muestras procedentes de <100 metros sobre

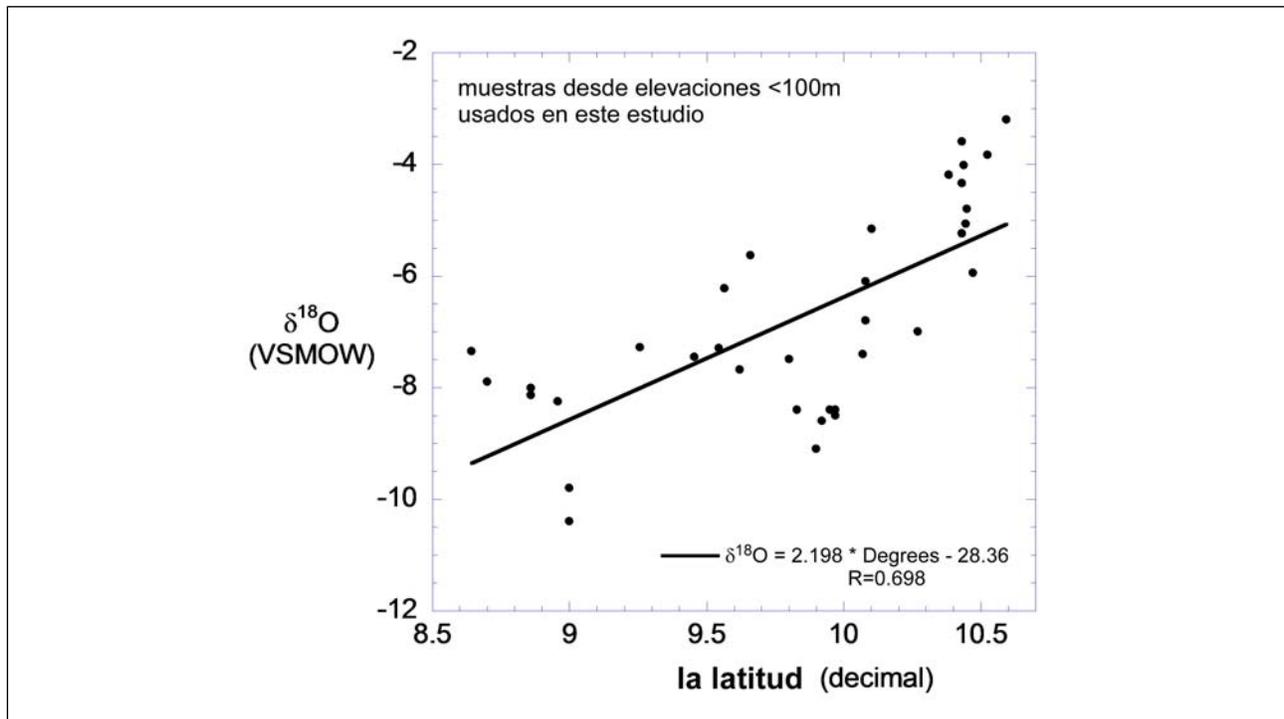


Figura 7. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) versus la latitud para muestras desde elevaciones <100m usados en este estudio.

el nivel del mar. Además la disminución en $\delta^{18}\text{O}$ con la decrecimiento de latitud observada en nuestros datos de Costa Rica tiene un pendiente e intercepto semejante a los que se observa para Panamá.

Otra investigación anterior ha notado este tipo de efecto en la zona tropical húmeda (e.g., Vuille y Werner, 2005; Lachniet et al., 2007). Nuestra observación de la disminución en $\delta^{18}\text{O}$ con la decrecimiento de latitud es el inverso del efecto de latitud que es dependiente de la temperatura para los Estado Unidos (Kendall y Coplen, 2001). Se cree que este efecto de latitud resulta de una señal de los vientos alisios con un aumento en la destilación “Rayleigh” cuando las masas de aire cruzan el istmo (Lachniet et al., 2007) En Costa Rica el vector de los vientos alisios es muy correlacionado con latitud (Hoffmann et al., 1981), con las montañas altas de la Cordillera de Salamanca sobre imponiendo una firma de $\delta^{18}\text{O}$ baja al vapor y precipitación en el sur del país. Esta destilación ortográfica aumentada resulta en bajo movimiento de vapor de $\delta^{18}\text{O}$ hacia la costa Pacífica (Lachniet et al., 2007). El registro peleo clima de estalagmitas del istmo panameño también expone este efecto (Lachniet et al., 2007).

CONCLUSIONES

Los nuevos datos tanto como los datos históricos para el agua subterránea en Costa Rica han sido usados para generar mapas preliminares de valores $\delta^{18}\text{O}$ y de δD a través de esta nación. En el futuro, datos nuevos serán añadidos a este conjunto y los mapas serán puestos al día y fijado de nuevo en <http://wri.csusb.edu/>. Aunque las composiciones isotópicas sean, como era da esperar, inferiores en elevaciones más altas, la cuantificación de este efecto que varía regionalmente es solo posible en áreas localizadas específicamente en las costas. Para muestras que vienen de elevaciones bajas (<100 metros) se observa una disminución en valores de isótopos con latitud disminuyente.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren dar las gracias al gobierno de la nación de Costa Rica por el permiso de tomar y analizar las muestras que se usaron en este estudio. El personal de La Selva Biological Research Station facilitó los permisos oficiales de tomar muestras. La ayuda de GIS y cartografía fue proporcionada por Lisa Pierce del Instituto de Recursos de Agua de la Universidad del Estado de California (San Bernardino). Irma Hinojosa asistió con el análisis de las muestras. La financiación fue proporcionada por la Fundación de Ciencia Nacional (EAR-0243135) y por una beca “seed” de la Universidad de Denison. Agradecemos a los revisores Matthew Lachniet (Profesor Asistente, Universidad de Nevada; Las Vegas) y Bruce Taylor (Section Head, Recursos Naturales, Canadá) por sus comentarios significativos y sustanciales. Gracias, también a Mariella Smith por su ayuda en corregir el español

REFERENCIAS

- Blisniuk, P.M., and L.A. Stern. 2005. Stable isotope paleoaltimetry: A critical review. *American Journal of Science*, 305(10): 1033-1074.
- Birkle, P., and J. Bundschuh. 2007. Hydrogeochemical and isotope composition of geothermal fluids. In Bundschuh, J., and G.E. Alvarado (eds.) *Central America: geology, resources and hazards*. London: Taylor & Francis.
- Clark, K.L., N.M. Nadkarni, D. Schaefer, and H.L. Gholz. 1998. Cloud water and precipitation chemistry in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica. *Atmospheric Environment*, Vol. 32, pp. 1595-1603.

- Coplen, T.B. 1995. Discontinuance of SMOW and PDB. *Nature*, Vol. 375, pp. 285.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, Vol. 133, pp. 1702-1703.
- Darling, W.G., J.M. Parker, H.V. Rodriguez, and A.J. Lardner. 1989. Investigation of a volcanic aquifer system in Costa Rica using environmental isotopes. International Atomic Energy Agency Technical Document 502.
- Epstein, S., and T. Mayeda. 1953. Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 4, pp. 213-224.
- Gat, J.R., and E. Matsui. 1991. Atmospheric water balance in the Amazon Basin: an isotopic evapotranspiration model. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, pp. 13179-13188.
- Genereux, D., and C.M. Pringle. 1997. Chemical mixing model of streamflow generation at La Selva Biological Station, Costa Rica. *Journal of Hydrology*, Vol. 199, pp. 319-330.
- Gonfiantini, R., G. Gallo, B.R. Payne, C.B. Taylor. 1976. Environmental isotopes and hydrochemistry of groundwater in Gran Canaria: Interpretation of Environmental Isotopes and Hydrochemical Data in Groundwater. International Atomic Energy Agency Symposium, Vienna, Austria, 159 pp.
- Gonfiantini, R., M.A. Roche, J.C. Olivry, J.C. Fontes, and G.M. Zuppi. 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 181: 147-167.
- Hofmann, E.E., A.J. Busalacchi, and J.J. O'Brien. 1981. Wind generation of the Costa Rica Dome. *Science*, Vol. 214, pp. 552-554.
- Horita, J. 1988. Hydrogen isotope analysis of natural waters using an H_2 -water equilibration method; a special implication to brines. *Chemical Geology*, Vol. 72, pp. 89-94.
- IAEA/WMO. 1998. Global network for isotopes in precipitation. The GNIP Database, release 3, <http://www.iaea.org/programs/ri/gnip/gnipmain.htm>.
- Kendall, C., and T.B. Coplen. 2001. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 1363-1393.
- Lachniet, M.S., and W.P. Patterson. 2002. Stable isotope values of Costa Rican surface waters. *Journal of Hydrology*, Vol. 260, pp. 135-150.
- Lachniet, M.S., and W.P. Patterson. 2006. Use of correlation and multiple stepwise regression to evaluate the climatic controls on the stable isotope values of Panamanian surface waters. *Journal of Hydrology*, Vol. 324, pp. 115-140.
- Lachniet, M.S., W.P. Patterson, S.J. Burns, Y. Asmerom, and V.J. Polyak. 2007. Caribbean and Pacific moisture sources on the Isthmus of Panama revealed from stalagmite and surface water $\delta^{18}\text{O}$ gradients. *Geophysical Research Letters*, 34(L01708): doi:10.1029/2006GL028469.
- Longinelli, A., and J.M. Edmond. 1983. Isotope geochemistry of the Amazon Basin: a reconnaissance. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, pp. 3703-3717.
- Melchiorre, E.B., R.E. Criss, and M.L. Davisson. 1999. Relationship between seismicity and subsurface fluids, central Coast Ranges, California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104(B-1), pp. 921-939.
- McBratney, A.B., and R. Webster. 1986. Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates. *Journal of Soil Science* Vol. 37, pp. 617-639.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 2008. On-line file data for Costa Rica. <http://weather.noaa.gov/index.html>
- Njitchoua, R., L. Sigha-Nkamdjou, L. Dever, C. Marlin, D. Sighomnou, and P. Nia. 1999. Variations of the stable isotopic compositions of rainfall events from the Cameroon rain forest, Central Africa. *Journal of Hydrology*, Vol. 223, pp. 17-26.
- Payne, B.R., and Y. Yurtsever. 1974. Environmental isotopes as a hydrological tool in Nicaragua: Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. International Atomic Energy Agency Symposium, Vienna, Austria, 193 pp.
- Poveda, G., P.R. Waylen, and R.S. Pulwarty. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*,

234(1): 3-27.

- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery. 1988. *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*. New York; Cambridge University Press.
- Pringle, C.M. 1991. Geothermally modified waters surface at La Selva Biological Station, Costa Rica: volcanic processes introduce chemical discontinuities into lowland tropical streams. *Biotropica*, Vol. 23, pp. 523-529.
- Pringle, C.M., F.J. Triska, and G. Browder. 1990. Spatial variation in basic chemistry of streams draining a volcanic landscape on Costa Rica's Caribbean slope. *Hydrobiologia*, Vol. 206, pp. 73-85.
- Rose, T.P., M.L. Davisson, and R.E. Criss. 1996. Isotope hydrology of voluminous cold springs in fractured rocks from an active volcanic region, northeastern California. *Journal of Hydrology*, Vol. 179, pp. 207-236.
- Rozanski, K., L. Araguas-Araguas, and R. Gonfiantini. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation: Climate change in continental isotopic records. *Geophysical Monograph 78*, American Geophysical Union; Washington, D.C., pp. 1-36.
- Salati, E., A. Dall'Olio, E. Matsui, and J.R. Gat. 1979. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 1250-1258.
- Sanabria, A.V. 2001. El manejo histórico de recursos hídricos en Costa Rica con énfasis en el período indígena y en los siglos XVI, XVII, XVIII y XIX. *Anuario de Estudios Centroamericanos*; Universidad de Costa Rica, Vol. 27, pp. 59-81.
- Vuille, M., and M. Werner. 2005. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: observations and model results. *Climate Dynamics*, Vol. 25, pp. 401-413.

DIRECCIÓN PARA LA CORRESPONDENCIA

Erik B. Melchiorre
Water Resources Institute and Department of Geology
California State University
5500 University Parkway
San Bernardino, CA 92407
USA

Email: emelch@csusb.edu
