

Origen y distribución de la radiactividad natural en la zona norte de la cuenca de Chihuahua, México

**Manuel Reyes-Cortés^{1,2}, Ignacio Alfonso Reyes-Cortés², Socorro Espino Valdez²,
Marusia Rentería-Villalobos¹, Juan Carlos Burillo Montúfar¹
y María Elena Montero-Cabrera^{1*}**

¹ Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV, Miguel de Cervantes 120,
Complejo Ind. Chihuahua, Chihuahua, Chih. CP 31109, México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, Nuevo Campus UACH, s/n. Chihuahua, Chih., México.

*elena.montero@cimav.edu.mx

RESUMEN

El valle de Chihuahua es una franja de terreno de 8 km de ancho por unos 32 km de largo, orientada de norte a sur, que forma parte de la cuenca hidrológica de Chihuahua, y de la que se extrae casi la totalidad del agua para el consumo de la ciudad. El agua de la presa de San Marcos, situada en la parte alta de esta cuenca, tiene materia orgánica hasta cien veces más enriquecida en uranio con respecto al agua. El agua y los peces de la presa de San Marcos y el agua de algunos pozos de la región noroccidental del valle de Chihuahua presentan altas concentraciones de uranio.

Mediante un estudio litoestratigráfico de barrenos y por mediciones de espectrometría gamma, se localizaron estratos y lentes arcillo-arenosos mezclados con material carbonoso. Estos horizontes se presentan con anomalías radiométricas de uranio en la zona noroccidental del valle de Chihuahua con valores de hasta 612 Bq/kg o aproximadamente 50 ppm. Las anomalías encontradas en el agua de algunos pozos profundos se corresponden con la presencia de cuerpos de sedimentos finos, formados por posibles paleosuelos o paleosedimentos de planicie de inundación. Se sugiere que estos horizontes de arcillas son recolectores del ión uranilo, que sufre un proceso de reducción por el material orgánico y es capturado. Dependiendo del pH y Eh, la removilización y oxidación del uranio causa nuevamente su reintegración al agua que se extrae de los pozos agrícolas de la región.

Palabras clave: Uranio, radiactividad, hidrogeoquímica, Chihuahua, México.

ABSTRACT

The Chihuahua valley is a north-south oriented basin 8 km wide and 32 km long, forming part of the Chihuahua hydrologic basin. This basin supplies most of the water for the Chihuahua City. Water enriched in organic matter from the San Marcos dam in the upper part of the basin has up to 75% of the uranium content incorporated as colloidal or suspended particles. Water and fish from the San Marcos dam and from some deep wells in the northwestern region of Chihuahua valley have relatively high uranium concentrations.

A lithostratigraphic study from several drill cuttings, logging and gamma spectrometry data defines the presence of sandy clay lenses and beds bearing carbonaceous material. These horizons

show uranium anomalies in the northwestern part of the Chihuahua valley with values up to 612 Bq/kg or approximately 50 ppm. The detected radiometric anomalies in the water from some deep wells may correspond to the presence of fine particles of carbonaceous material, formed by some paleo-soils or paleo-sediments from flooding plains. It is suggested that these clay horizons are uranyl ion collectors. The uranyl may suffer a reduction process by the presence of organic material. Depending on pH and Eh conditions, groundwater can oxidize and re-mobilize the uranyl ions that can be detected in some deep wells for agricultural water supply.

Key words: Uranium, radioactive contamination, hydrogeochemistry, Chihuahua, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El valle de Chihuahua es una franja de terreno de 8 km de ancho por unos 32 km de largo, orientada de norte a sur, que forma parte de la cuenca hidrológica de Chihuahua (Figura 1), y de la que se extrae casi la totalidad del agua para el consumo de la ciudad de Chihuahua. La cuenca conformada por los ríos Chuvíscar y Sacramento revela dos zonas en las que se han encontrado rocas con contenidos anómalos de minerales radiactivos: la sierra de Pastorías al sur-suroeste y la zona de San Marcos-Majalca al noroeste de la ciudad (Goodell, 1985). En esta última zona se realizó el presente estudio, con el objetivo de explicar la distribución del uranio en agua superficial y subterránea, así como en los estratos del acuífero en el noroeste de la ciudad de Chihuahua.

En la presente investigación se definieron los límites de estructuras geológicas y cuerpos de aluvión derivados de las áreas rocosas con mineralización de uranio. Se muestrearon sistemáticamente las rocas en zonas mineralizadas de uranio y los sedimentos de los arroyos del área, así como el agua de manantiales y pozos productores situados aguas abajo de la presa San Marcos. También se efectuó la caracterización de materiales de polvos y esquirlas de barrenos de pozos profundos proporcionados por la Junta Central de Aguas y Saneamiento (JCAS).

Se propone un modelo conceptual para explicar que las aguas y los sedimentos radiactivos del área de San Marcos, arrastrados por el río San Marcos-Sacramento, proporcionan el material radiactivo determinado en el área noroccidental de la cuenca hidrográfica de Chihuahua.

Antecedentes

Los primeros estudios específicos sobre la distribución de concentraciones radiactivas en agua para consumo humano en la ciudad de Chihuahua se iniciaron en el año 2000. Se han realizado estudios de radiactividad en sedimentos, aguas superficiales y aguas de pozos de diferentes localidades de la cuenca de Chihuahua y del estado (Rodríguez-Pineda, 2000; Rentería-Villalobos, 2003; Colmenero-Sujo et al., 2004; Rentería-Villalobos et al., 2005; Reyes-Cortés, 2005; Villalba et al., 2005; Villalba et al., 2006; Rentería-Villalobos, 2007; Silva-Sáenz, 2008)

Las concentraciones específicas del uranio en 33 pozos de la cuenca fluctuaron entre 460 y 1260 Bq/m³ (Montero-Cabrera et al., 2007). En el 80% de los pozos analizados se presentaron concentraciones de uranio o radio superiores a la norma mexicana de 560 Bq/m³ (SSA, 2000). Estos elementos disueltos en el agua son señal de la posible presencia de uranio en los sedimentos de los rellenos aluviales.

Por otra parte, en un análisis realizado por la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) se encontraron valores elevados de uranio contenidos en un acuífero del área de Tabalaopa-Aldama (Rodríguez-Pineda, 2000). Al realizar un estudio estadístico, aplicando discriminación multivariada para determinar el origen del elemento radiactivo, se encontró que el uranio proviene del agua de recarga del río Chuvíscar, así como de la recarga lateral generada por los abanicos aluviales que descienden de las sierras circundantes (Rodríguez-Pineda, 2000). En 2003, se reiniciaron estudios para determinar el origen de la contaminación radiactiva en dicha área (Rentería-Villalobos et al., 2005; Reyes-Cortés, 2005; Silva-Sáenz, 2008).

La primera ocasión en que se muestreó agua en el área de San Marcos fue en mayo de 2005 (Rentería-Villalobos et al., 2007), al final de una de las sequías más prolongadas en los últimos 50 años, con un volumen mínimo de embalse en la presa. Se obtuvieron valores de concentración de actividad del ²³⁸U de 7.7 Bq/L en aguas de la presa San Marcos. Esta concentración de actividad del ²³⁸U del agua, por compararla con una referencia, está cercana al límite superior del intervalo del agua potable que se reporta en UNSCEAR (2008) en Argentina y solamente es superado por Finlandia en el referido reporte de las Naciones Unidas. Dicha concentración de actividad de ²³⁸U del agua supera los valores establecidos por la norma mexicana para agua de consumo humano igual a 0.560 Bq/L de actividad alfa total (SSA, 2000), entre la que se encuentra la actividad alfa del uranio.

En mayo de 2007, después de copiosas lluvias y con el nivel máximo de captación en la presa, los resultados de los análisis del concentración de actividad total de U de aguas recolectadas fueron entre 0.14 y 0.52 Bq/L, pero igualmente con concentraciones en el límite superior de la norma para agua para consumo humano (SSA, 2000).

En la misma presa se colectaron muestras de agua que se filtraron para analizar exclusivamente la concentración de actividad total de uranio en los sólidos separados en el filtro,

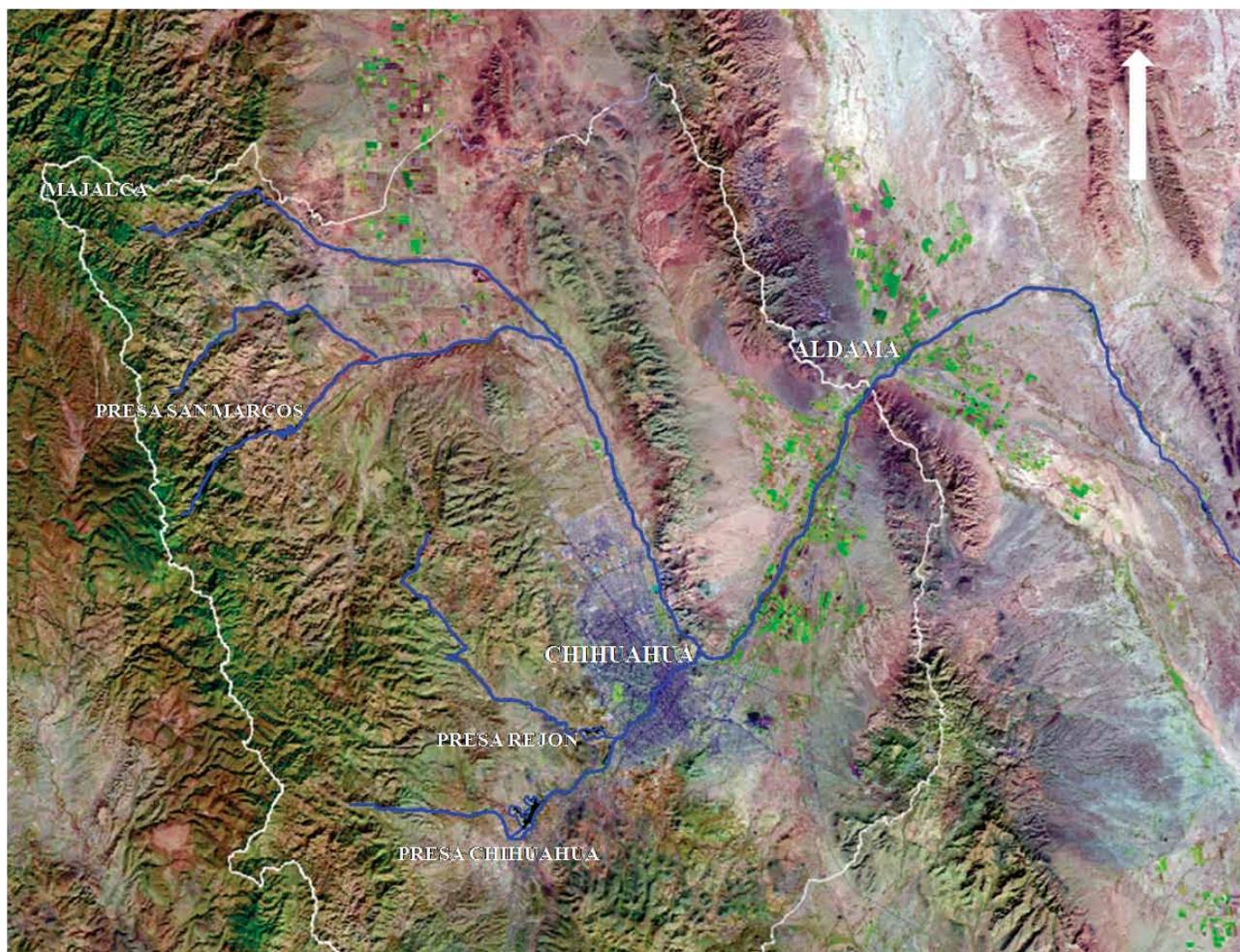


Figura 1. Imagen satelital de la cuenca hidrológica de Chihuahua. Se destacan los principales asentamientos poblacionales y los principales elementos de agua superficial en la zona.

como partículas suspendidas en el agua (Silva-Sáenz, 2008; Rentería *et al.*, 2009). Los resultados presentan un intervalo de 33 a 220 Bq/kg de uranio en material de origen orgánico.

Como parte del presente estudio se planteó la posibilidad de que el origen de la radiactividad en el agua subterránea fuera a partir de la mineralización del uranio en las rocas de la zona de San Marcos. Se tomaron muestras de suelos, sedimentos, aguas, peces de la presa San Marcos y de arbustos de la zona. Parte de estos estudios se muestran en el presente trabajo. Los resultados de la radiactividad en los arbustos se reportaron en el trabajo de Luna-Porres *et al.* (2011).

GEOLOGÍA DEL ÁREA DE SAN MARCOS

La columna litológica del área de estudio está constituida por rocas volcánicas y volcanoclásticas de edad Cenozoica. Las rocas carbonatadas del Cretácico se encuentran a unos kilómetros al norte de la presa San Marcos, pero también al oriente, al otro lado del valle de Chihuahua, for-

mando parte del bloque oriental del *graben* de Sacramento y al mismo tiempo formando parte de la sierra de Nombre de Dios.

Unidades hidrogeológicas

Para el establecimiento de estas unidades se consideró la información de las unidades geológicas aflorantes (Reyes-Cortés *et al.*, 2010). Un corte longitudinal de la zona de estudio se muestra en las Figuras 2 y 3.

Rocas volcánicas del Cenozoico con baja conductividad hidráulica

En esta unidad se agrupan los domos riolíticos y las rocas piroclásticas riolíticas a dacíticas que forman tobas, ignimbritas y ceniza volcánica sin consolidar, así como algunos afloramientos interestratificados de tobas andesíticas y derrames basálticos. Esta unidad no presenta patrones de fracturas interconectadas. Fallas regionales controlan los rumbos de ríos y arroyos principales. En conjunto, estas

rocas son poco permeables, con bajos valores de conductividad hidráulica. Los detalles de una medición de la velocidad del flujo del agua en la zona vadosa aguas abajo de la represa de San Marcos, se publicaron en Burillo-Montúfar et al. (2012). No existen pozos para definir el espesor del aluvión, sin embargo en la geomorfología superficial afloran rocas sin alteración.

Depósitos aluviales con conductividad hidráulica media

Son depósitos aluviales y de talud, mal compactados con capas intercaladas del mismo material bien cementadas. En esta sección existen 12 pozos profundos con un espesor que varía desde 2 o 3 m hasta más de 100 m. Una prueba de bombeo publicada por Burillo-Montúfar et al. (2012) reporta una conductividad hidráulica de 0.85 m/día.

Depósitos aluviales granulares con alta conductividad hidráulica

Estos son los depósitos que se encuentran rellenando las zonas topográficamente bajas del área, compuestos por lentes de gravas con arenas y escasas arcillas. Su grado de compactación es muy reducido, y se originaron a partir de la denudación de las rocas volcánicas y calcáreas que las circundan. Su espesor es de más de 500 m en el centro del valle.

Existe una capa delgada de aluvión en las estribaciones de la sierra de Majalca, y en el área que ocupa el valle de Chihuahua existe un profundo graben flanqueado por la sierra de Majalca al poniente y por la sierra de Nombre de Dios al oriente. El graben está relleno por aluvión riolítico. De acuerdo con los estudios geofísicos de Alfonso-Zwanziger (1992), el bloque hundido descendió más de 700 m, lo cual es verificable en pozos barrenados exclusi-

vamente sobre aluvión de más de 500 m de profundidad en el centro del valle (INEGI, 1999). Los bloques emergidos (*horst*) de la sierra de Nombre de Dios al oriente y las de San Marcos-El Mogote al poniente, presentan rocas volcánicas con una geomorfología juvenil y escasa acumulación de aluvión en los lechos del río y los arroyos. El aluvión cubre una parte de la segunda sección y prácticamente a toda la tercera sección. Está constituido básicamente por grava, arena, material brechoide y conglomerático débilmente consolidado y con buenos índices de permeabilidad, generando zonas de transmisibilidad media, de $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (INEGI, 1999).

Mineralización del uranio

El área de estudio está constituida principalmente por rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición riolítica, diques y domos riolíticos resurgentes y diques de composición intermedia a básica (Ferriz, 1985). También presenta escasos afloramientos de rocas calcáreas del Cretácico en la divisoria norte de la cuenca. El material de relleno aluvial está al pie de las sierras relleno la cuenca (Figura 4).

Los depósitos de uranio en el área de San Marcos-Victorino (Figura 4) están emplazados en tobas fuertemente soldadas de composición riolítica de la unidad Quintas. Estos depósitos forman parte de una secuencia hidrotermal que comprende al menos dos eventos de alteración anteriores a la mineralización. En una primera etapa se formaron numerosas vetillas de cuarzo y feldespato con hematitización. En segundo lugar, una intensa alteración argilítica preparó las condiciones favorables para el depósito del mineral de uranio (Reyes-Cortés et al., 2010).

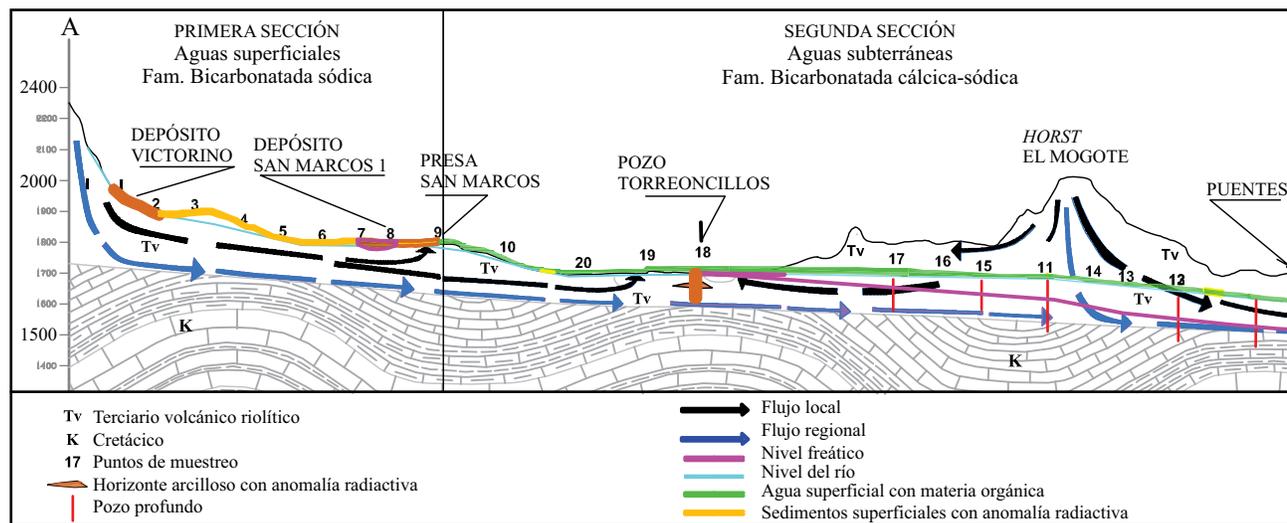


Figura 2. Corte longitudinal en el área de estudio al norte del valle de Chihuahua y modelo hidrogeológico para la primera y segunda secciones, mostrando el perfil de la sierra de San Marcos, desde la parte alta de Victorino, las estribaciones de la sierra de San Marcos-Majalca hasta los límites con el valle de Chihuahua. Modificado de Burillo-Montúfar et al. (2012).

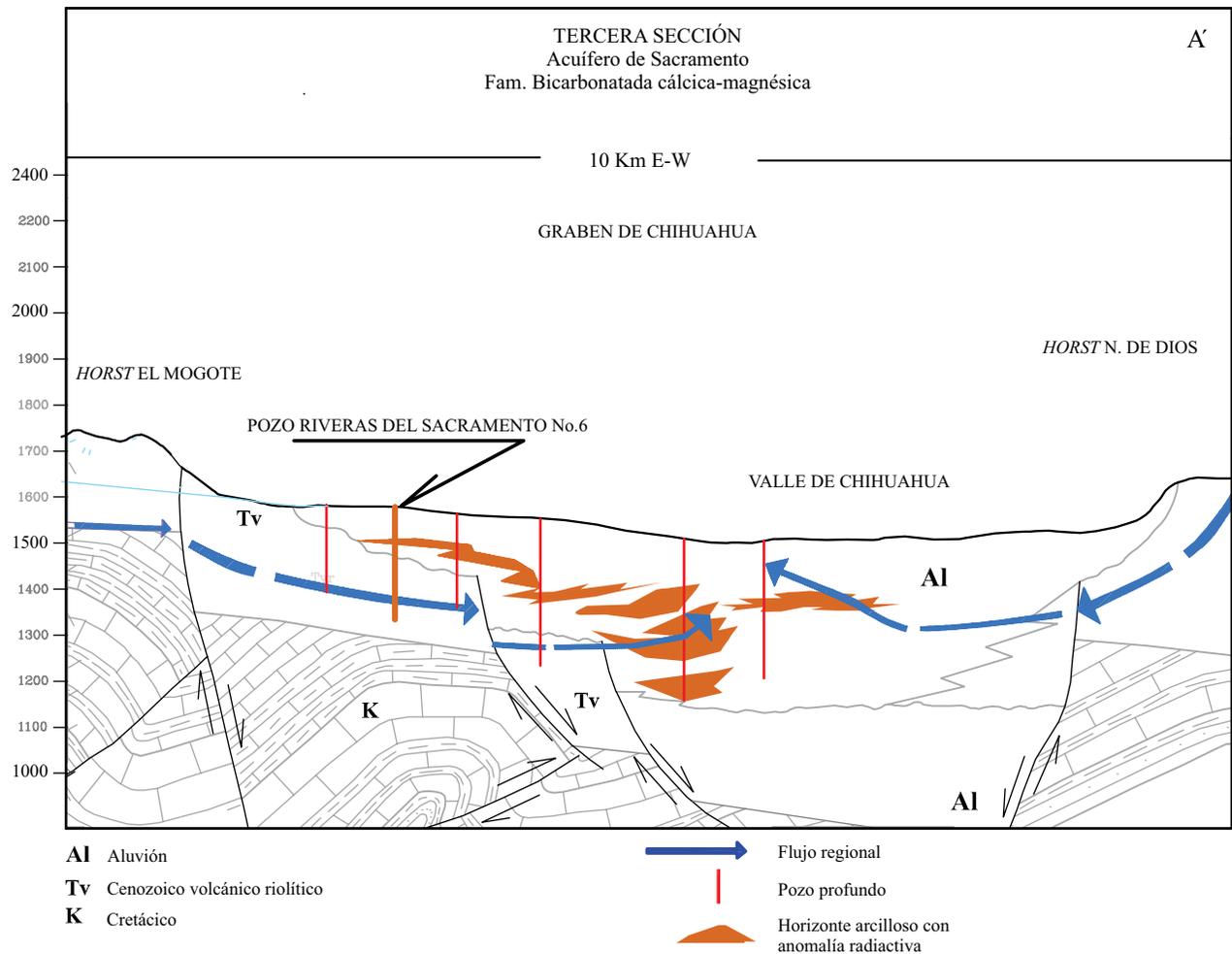


Figura 3. Tercera Sección. Modelo hidrogeológico para la parte norte del valle de Chihuahua, entre el *horst* El Mogote hasta la sierra de Nombre de Dios en el acuífero Sacramento.

En el depósito San Marcos I, las fracturas con hematización y argilización tienen un rumbo E-W emplazadas en la unidad Quintas por más de 300 m, hasta cortar un dique riodacítico al poniente, lo cual indica que el fracturamiento es posterior al dique. Las vetas de cuarzo y hematita no son mayores de 3 cm de espesor. La hematita se presenta diseminada en la matriz de la roca. Los feldspatos originales están total o parcialmente caolinizados y rellenos por minerales de uranio como metatyuyamunita y uranofano. En algunos casos se observan los moldes de feldespato (“feldomoldes”) y una textura relicta. La alteración argílica del depósito actúa principalmente reemplazando la matriz de la roca por un agregado micro-cristalino cuarzo-feldespático con calcedonia y tridimita. Donde la densidad de las fracturas es alta, la roca está más alterada por caolinización y silicificación. En todas las anomalías visitadas, donde hay fracturamiento, se encontró intensa oxidación y argilización.

En el depósito Victorino, el mineral de uranio se observa formando la mesostasis de una brecha ignimbrítica que

constituye el cuerpo principal de este depósito. El material criptocristalino está incrustado en las paredes de las fracturas como polvo fino. El uranofano reemplaza parcialmente al feldespato caolinizado ocupando la forma tabular del molde de posibles cristales de sanidino alterados.

Según Gandhi y Bell (1995), los depósitos de uranio en rocas volcánicas comúnmente se asocian con Mo, F y Th. Ocurren en rocas formadas principalmente durante un período postorogénico y el uranio se concentra normalmente en rocas alcalinas potásicas, comúnmente albitizadas y hematizadas o alteradas por carbonatación. Los depósitos de uranio ocurren en todas las litofacies volcánicas, desde cercanas hasta distantes, incluidos en sedimentos volcánico-clásticos centrales de las calderas, flujos de lava, *ashflows*, cuencas volcano-sedimentarias, domos y brechas. Estos depósitos también pueden ser epigenéticos y haber sido formados por la circulación de fluidos con altas y bajas temperaturas, incluso por aguas meteóricas recalentadas en el subsuelo y enriquecidas con uranio por procesos de intemperismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo de campo

Para la determinación de contactos geológicos y límites topográficos así como para la ubicación de puntos de muestreo de rocas, sedimentos y aguas se utilizaron fotografías aéreas, imágenes satelitales y planos a escalas 1:50,000 y 1:250,000 (CRM, 2001).

Las muestras de agua corriente superficial y de manantiales se tomaron por etapas, al finalizar la época de lluvias y durante el estiaje. El muestreo consistió en coleccionar muestras de aguas de la presa San Marcos, aguas de escorrentías superficiales y pozos someros y profundos. También se muestrearon sedimentos y plantas. Las muestras fueron colectadas sistemáticamente en puntos estratégicos de concentración de sedimentos, como en las confluencias de los arroyos. Los análisis de uranio en sedimentos superficiales fueron realizados en los laboratorios del Servicio Geológico Mexicano por espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS, por sus siglas en inglés).

El muestreo se dividió en tres secciones, de acuerdo a las Figuras 2 y 3. La primera se inicia a partir del depósito Victorino y termina en la presa San Marcos (sección La Presa). No existen pozos ni norias en esta zona y los tres ranchos en la zona se proveen del agua de acarreo o de pequeños presones. Se tomaron 12 muestras en noviembre de 2008 (después del periodo de lluvias), que corresponden a las aguas superficiales de escorrentías y manantiales efímeros que alimentan a la corriente principal del río San

Marcos y que desembocan en la presa San Marcos.

La segunda sección inicia en la cortina de la presa, pasa por el poblado de Torreoncillo donde los ríos San Marcos y Majalca se unen para formar el río Sacramento (sección Torreoncillo). Las muestras se tomaron de pozos profundos en producción y norias someras de diferentes predios particulares. También en Noviembre de 2008 se tomaron dos muestras de agua en la cortina de la presa y diez muestras de pozos en producción ubicados aguas abajo de la presa. Se procedió a muestrear en los mismos sitios el agua superficial, al finalizar el periodo de estiaje en mayo de 2009 y al finalizar el periodo de lluvias en noviembre de 2009.

En abril de 2010, además de tomar las muestras en los mismos afloramientos, se incluyeron muestras de agua en la desembocadura principal del río a la presa y en la tercera sección. Todas las muestras de agua se colectaron para análisis radiométricos. La localización de todos los puntos de muestreo de agua se presenta en la Tabla 1.

Análisis de rocas y sedimentos

El equipo y las técnicas utilizados para la caracterización de materiales incluyeron microscopía óptica (MO) utilizando un microscopio petrográfico Olympus SZH-10 y un microscopio binocular estereográfico Olympus AX-70. Se prepararon muestras de rocas en secciones delgadas y superficies pulidas, así como de sedimentos en líquidos de inmersión para su determinación de acuerdo con la clasificación de Streckeisen (1980) y Le Bas y Streckeisen (1991).

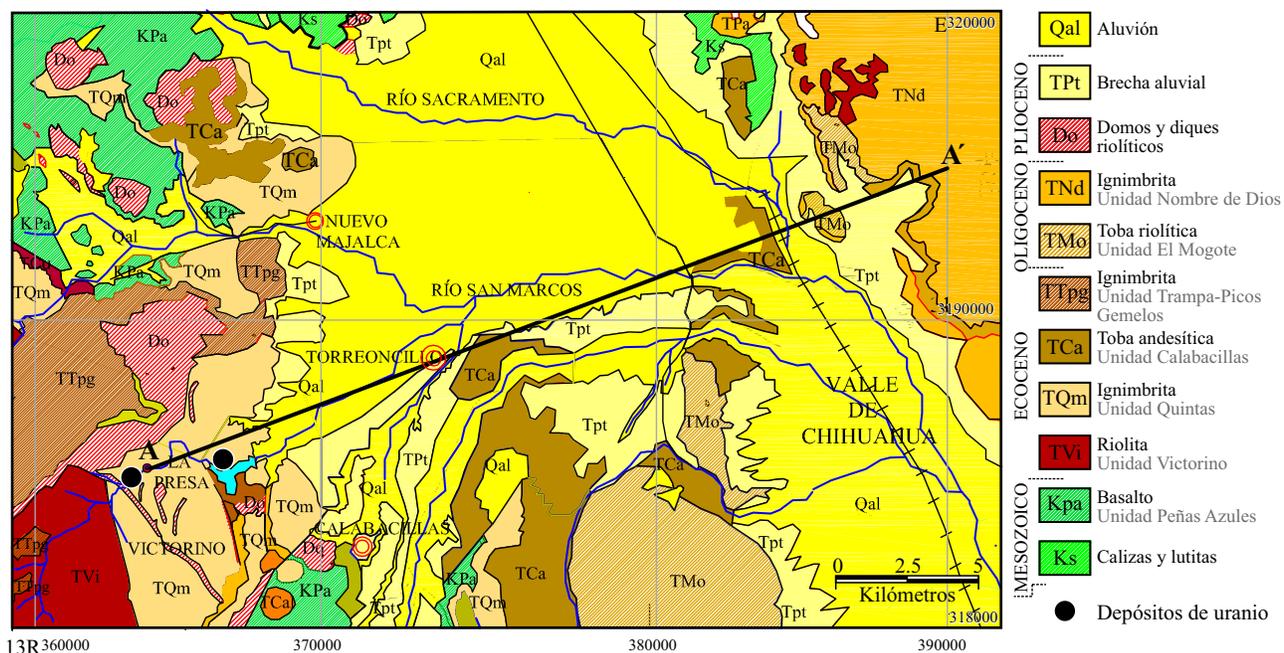


Figura 4. Plano geológico del área norte del valle de Chihuahua con la ubicación de los depósitos uraníferos en la zona de Victorino. La sección A-A' se presenta en el corte longitudinal de las Figuras 2 y 3.

Estudio del material de barrenación

En la segunda sección del área se estudiaron los materiales de barrenación del pozo Torreoncillo. En la sección 3 se estudiaron los materiales de la barrenación de 13 pozos proporcionados por la Junta Central de Aguas y Saneamiento del Gobierno del Estado de Chihuahua (JCAS) y otros de pozos particulares. Se seleccionaron muestras de esquilas de barrenación de pozos de profundidades entre 200 y 500 m.

Más de 1700 muestras obtenidas cada 2 metros en dichos barrenos fueron estudiadas con el microscopio binocular para obtener su granulometría y características megascópicas. También fueron seleccionadas 220 muestras de barrenos en tramos de 2 a 10 metros y preparadas para su estudio radiométrico.

Radiometría de sedimentos

En los laboratorios del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) se determinaron las concentraciones de uranio y torio en material de barrenación por espectrometría de rayos gamma (GS), utilizando un detector de 10x10 cm de NaI activado con Tl, acoplado a un espectrómetro CANBERRA con el programa GENIE 2000 para la interpretación de los espectros. Las muestras se cerraron en una geometría cilíndrica por 28 días para llegar al equilibrio secular (Ketcham, 1996; Chiozzi *et al.*, 2000). Se asume que el equilibrio parte desde el ^{238}U , debido a que el sistema es prácticamente cerrado. Debido

a la porosidad máxima en el acuífero aluvial de Chihuahua de 0.3 (INEGI, 1999), se puede despreciar el transporte de átomos de uranio desde el volumen de la roca al agua y el sistema se puede considerar cerrado para fines de medición por espectrometría gamma (Valenzuela-Hernández, 2006). El cálculo de las actividades se fundamenta en un método sugerido por Muminov *et al.* (2005). Se determinaron experimentalmente los coeficientes de atenuación másicos para las muestras extraídas de uno de los pozos estudiados con una fuente puntual de ^{125}Sn y $^{154-155}\text{Eu}$. Se construyó un colimador de plomo para garantizar una geometría óptima. Se comprobó que no existen diferencias significativas en la autoabsorción de las muestras ambientales y el estándar utilizado (Valenzuela-Hernández, 2006). Se aplicó el método Monte Carlo con el programa EGS4 para realizar las correcciones, en caso de ser necesarias, originadas por las diferencias de altura en las muestras y la eficiencia de fotopico. Se aplicó el lenguaje Visual Basic 6.0® en el programa Standard Striping (Valenzuela-Hernández, 2006) para el análisis de espectros gamma obtenidos por el detector de NaI(Tl) a través de la descomposición de la muestra en componentes espectrales por medio de estándares de ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ; para esto se midieron tres estándares de contenido certificado de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K RGU-1, RGTh-1 y RGK-1 de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), respectivamente (DNFC, 1987).

Análisis químico de las aguas

El análisis hidroquímico fue realizado en los

Tabla 1. Localización de los puntos de muestreo de agua en el área de San Marcos, Chihuahua. La litología de la zona es de rocas riolíticas.

No.	Nombre	Latitud N	Longitud W	Altitud (m)	Profundidad (m)
1	Río San Marcos	28°47'43.9"	106°24'52.6"	1812	superficial
2	Río San Marcos	28°47'36.9"	106°24'36.70"	1802	superficial
3	Río San Marcos	28°47'26.75"	106°24'33.83"	1786	superficial
4	Río San Marcos	28°47'19.30"	106°24'20.85"	1783	superficial
5	Río San Marcos	28°47'20.25"	106°24'07.76"	1811	superficial
6	Río San Marcos	28°47'04.96"	106°23'43.37"	1778	superficial
7	Río San Marcos	28°48'00.58"	106°22'42.16"	1723	superficial
8	Río San Marcos	28°47'41.97"	106°22'30.32"	1728	superficial
9	Presa San Marcos	28°47'34.90"	106°21'31.40"	1704	superficial
10	Rancho San Marcos	28°47'52.37"	106°20'42.27"	1669	10
11	Villa Patria Nueva	28°50'50.33"	106°15'43.95"	1585	300
12	Rancho El Hueco	28°51'11.68"	106°14'44.66"	1569	160
13	Rancho Caballo loco	28°50'52.80"	106°15'11.11"	1570	8
14	Rancho Ovejas	28°50'50.90"	106°15'15.47"	1574	10
15	Rancho El Peñasco 1	28°50'02.42"	106°15'57.00"	1587	135
16	Rancho El Peñasco 2	28°50'04.12"	106°16'04.48"	1578	10
17	Rancho Vizcarra	28°50'18.31"	106°16'30.00"	1588	183
18	Villa Torreoncillo	28°49'42.13"	106°17'04.6"	1600	240
19	Galería de la presa	28°49'54.72"	106°17'21.94"	1598	superficial
20	Rancho Casa Blanca	28°49'40.57"	106°18'26.00"	1608	10
21	Rancho Calabacillas	28°45'43.78"	106°18'12.64"	1666	140

Laboratorios de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) y en el Laboratorio de Análisis Químicos del CIMAV. Para el análisis de Na, Ca, Mg, K y Si se empleó el método NMX-AA-051-SCFI-2001 (SCFI, 2001c) con un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC modelo Avanta Sigma, los nitratos, sulfatos y la dureza mediante los métodos HACH 8171, 8051 y 8204, respectivamente (Hach, 2008), la alcalinidad bajo la norma NMX-AA-036-SCFI-2001 (SCFI, 2001a) y los cloruros mediante la norma NMX-AA-073-SCFI-2001 (SCFI, 2001b).

La actividad de los isótopos de uranio en el agua se determinó mediante un detector de centelleo líquido PERALS modelo 8100AB de Ordela Inc. y con un trazador de ^{232}U (Gómez-Escobar *et al.*, 1998). El trazador se preparó con el estándar del NIST SRM 4324B. La exactitud del procedimiento se verificó con material de referencia de uranio natural High Purity Standard 100064. Los resultados de ^{238}U y ^{234}U fueron 0.601 Bq y 0.571 Bq, respectivamente, con incertidumbre relativa de 3%, mientras que los notificados por el material de referencia fueron 0.617 ± 0.002 Bq de ^{238}U y 0.599 ± 0.002 Bq de ^{234}U . La actividad de uranio total ($^{238}\text{U} + ^{234}\text{U}$ simultáneamente) en el agua se obtuvo con el líquido centelleante UltimaGold AB de PerkinElmer con un contador Triathler OY de Hidex, (Aupiais *et al.*, 2003). Se repitió el análisis de una de cada diez muestras para verificar la precisión, resultando diferencias de 10-15%. Las incertidumbres relativas, de 10% aproximadamente, se determinaron aplicando las predicciones de la distribución de Poisson a la cantidad de eventos registrados (usualmente llamada “estadística nuclear”).

Para la definición de un modelo conceptual hidrogeoquímico sobre el comportamiento de la concentración de elementos radiactivos naturales, se realizó un levantamiento geológico a semi-detalle del área determinada con las hojas topográficas Majalca (H13C55) y Sacramento (H13C56) a escala 1:50000, así como la caracterización del material extraído de barrenos profundos. Se definieron los límites de estructuras geológicas de *horst* y *graben* y los cuerpos lenticulares con posible influencia de aluvión derivado de las zonas con mineralización de uranio.

RESULTADOS

Uranio en sedimentos

Las muestras de sedimentos superficiales en la primera sección mostraron el mayor contraste debido a la presencia de dos depósitos de uranio (Tabla 2). La mayor concentración de uranio se localiza en las áreas de los depósitos o a distancias muy cortas de ellos. En distancias hasta de 200 m la concentración de uranio es característica para sedimentos originados en rocas riolíticas, con menos de 20 ppm (IAEA, 1985). Más allá de los 200 m, la concentración de uranio es muy baja en los sedimentos por un largo tramo en el

recorrido por el arroyo, desde el depósito Victorino hasta casi llegar al segundo depósito denominado San Marcos I, que se localiza a 6 kilómetros de distancia aguas abajo. Se observó que el contenido de uranio se presenta elevado, de decenas de miles de ppm (Tabla 2), solamente en el área de los depósitos.

La concentración de actividad de uranio en muestras de esquilas de barrenación de varios pozos se presenta en la Tabla 3. Los valores por encima de 450 Bq/kg de ^{238}U /masa total, coinciden aproximadamente con los horizontes areno-arcillosos considerados como fondos lacustres o suelos orgánicos.

Las arenas arcillosas, sobre todo si contienen material carbonoso, juegan un papel reductor. Se presume que este material contribuye al depósito del uranio como ión U(IV) y de esta forma el uranio tetravalente puede quedar inmovilizado en los estratos con ambiente reductor.

Estudio del material de barrenación

Las muestras de material de barrenación se clasificaron en primera instancia como roca, aluvión, material arenáceo y sedimento areno-arcilloso mezclado con material carbonoso. Estos últimos materiales se observaron para definir su posible origen como suelo orgánico o como sedimento de zona de inundación. La clasificación de las muestras de los perfiles de los pozos se presenta en la Figura 5.

Se esquematizaron los perfiles litológicos de 14 pozos profundos perforados en el valle al norte de la ciudad de Chihuahua con un registro especial de los espesores y profundidades de las capas areno-arcillosas que preferentemente incluyeran material carbonoso (Figura 5).

Debido a la existencia de una porosidad máxima en el acuífero aluvial de Chihuahua de 0.3 (INEGI, 1999), se puede asumir que hay poco transporte de átomos de uranio del volumen de la roca al agua, de modo que el sistema se puede considerar cerrado para fines de medición por espectrometría gamma (Valenzuela-Hernández, 2006). En consecuencia la espectrometría gamma ofrece valores confiables de la radiactividad en el volumen de las muestras de sedimentos, que se presentan en la Tabla 3.

Se observaron varios horizontes o lentes limo-arcillosos con material bituminoso. Como se observa en la Tabla 3, se detectó un contenido anómalo de radiactividad, hasta de 612 Bq/kg, en los estratos identificados como fondo lacustre y suelo orgánico, que sugiere la presencia de uranio en el sedimento.

Química del agua

En la Figura 6 se presentan las concentraciones de iones y elementos mayores en diagramas Piper de las aguas del área estudiada, separándolas solamente según correspondan a un muestreo en estación húmeda o de post-lluvia

Tabla 2. Muestreo de sedimentos en la zona de San Marcos-Sacramento y resultados del análisis de las concentraciones de uranio.

Fecha	Punto	N	W	U _{Total} (ppm)
2-Mar-07 Antes de Victorino.	M1	28°47.744'	106°24.919'	12
Depósito Victorino	MV34	28°47.744'	106°24.919'	70030
	MV35	28°47.744'	106°24.919'	60920
	MV-V	28°47.744'	106°24.919'	13800
A < 200 m del depósito Victorino	MV37	28°47.603'	106°24.929'	100
	MV-VI	"	"	80
	M2	28°47.667'	106°24.767'	9
27-Mar-07 De Victorino al Rancho Tinajas	M3	28°47.514'	106°24.679'	10
	M4	28°47.832'	106°24.292'	9
	M5	28°47.683'	106°24.249'	10
	M6	28°46.851'	106°24.067'	8
	M7	28°46.751'	106°24.037'	7
	M8	28°46.833'	106°24.192'	12
30-Mar-07 De rancho Tinajas a la presa	M9	28°47.100'	106°23.700'	7
	M10	28°47.100'	106°23.700'	8
	M11	28°47.210'	106°23.560'	7
27-Abr-07 Arroyos del rancho a la presa	M12	28°47.450'	106°23.230'	6
	M13	28°47.900'	106°22.620'	8
	M14	28°47.660'	106°22.440'	6
	M15	28°46.687'	106°21.464'	7
	M16	28°46.812'	106°21.776'	7
28-Abr-07 Alrededor de la presa	M17	28°47.135'	106°22.032'	6
	M18	28°47.135'	106°22.032'	7
	M19	28°47.423'	106°22.190'	6
	M20	28°47.413'	106°22.194'	8
Dep. S. Marcos.	SM56	28°47.880'	106°22.570'	60100
A < 100 m de S. Marcos	SM52	28°47.765'	106°22.500'	120
	M21	28°47.760'	106°22.000'	8
	M22	28°47.686'	106°21.729'	7
	M23	28°47.694'	106°21.186'	7

y seca. Los resultados de la concentración de actividad total de uranio en el agua correspondiente a los muestreos de los años 2008-2010 se presentan en las Tablas 4 y 5. Las muestras de las primeras dos secciones se caracterizan por un pH entre 7.5 y 9.2 y son del tipo bicarbonatadas cálcicas-sódicas. Se interpreta que el incremento en la proporción de sodio en relación al calcio está en función del grado de evaporación del agua superficial según sea el clima y el tiempo transcurrido y la concentración del Na-Ca-HCO₃, producto de la lixiviación de las rocas félsicas de la zona.

Los grupos de aguas bicarbonatadas sódicas y cálcicas-sódicas con bajos contenidos de cloruros y sólidos totales disueltos (STD) sugieren flujos locales que circulan relativamente más tiempo en un medio fracturado.

Para la tercera sección (Figura 6) los resultados están de acuerdo con los reportes internos de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2001). Los acuíferos pertenecen

al grupo bicarbonatado cálcico-magnésico, indicando que los fragmentos de rocas que se encuentran en el relleno del valle son los portadores de los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺. El predominio del anión HCO₃⁻ y un contenido de STD que llega a alrededor de 200 mg/L (ver punto 18 en las Tablas 4 y 5) se interpreta como producto de una mezcla de aguas que circulan predominantemente en el medio poroso y en menor proporción en el medio fracturado.

Radiometría del agua

La concentración de actividad total del uranio del material disuelto en el agua correspondiente al muestreo de mayo de 2007 se presenta en la Tabla 6. La concentración de actividad total del uranio del material suspendido de origen orgánico en agua del río San Marcos, incluyendo la

Tabla 3. Concentración de actividad del ^{238}U en sedimentos extraídos de pozos.

Pozo Torreoncillos			Pozo RS 6		
Prof. (m)	U/ mT (Bq/kg)	Simbología y descripción	Prof. (m)	U/ mT (Bq/kg)	Simbología y descripción
0		/././ Suelo orgánico	4	510 ± 13	/././ Suelo Orgánico
10		^ 0 ^ 0 Aluvión y brecha	8	413 ± 7	..o.^ Gravilla
20		^ 0 ^ 0 conglomeratica	12	755 ± 19	
30		^ 0 ^ 0 riolítica			
40		^ 0 ^ 0	34	203 ± 3	^ 0 ^ 0 Aluvión y brecha conglomerática
50	181 ± 3	----- Fondo lacustre	52	322 ± 6	^ 0 ^ 0 riolítica
60	456 ± 8	----- Fondo lacustre			^ 0 ^ 0
70	439 ± 10	^ 0 ^ 0 Aluvión y brecha			^ 0 ^ 0
80		^ 0 ^ 0 conglomeratica	98	268 ± 4	^ 0 ^ 0
90		^ 0 ^ 0 riolítica	100	231 ± 11	0 ^ 0 ^
100		^ 0 ^ 0			^ 0 ^ 0
110	158 ± 2	^ 0 ^ 0	124	297 ± 10	^ 0 ^ 0
120	523 ± 11	^ 0 ^ 0			^ 0 ^ 0
130	608 ± 14	----- Fondo lacustre			^ 0 ^ 0
140	602 ± 12	^ 0 ^ 0 Aluvión y brecha	150	476 ± 9	/././ Suelo orgánico
150	374 ± 6	^ 0 ^ 0 conglomeratica	154	533 ± 11	----- y Fondo lacustre
160		^ 0 ^ 0 riolítica	162	362 ± 7	
170	202 ± 3	^ 0 ^ 0	174	463 ± 9	/././
180	418 ± 7	----- Fondo lacustre	182	460 ± 9	-----
190	481 ± 10	/././ Suelo orgánico	190	460 ± 9	/././
200		^ 0 ^ 0 Aluvión y brecha	198	418 ± 8	-----
210	249 ± 3	^ 0 ^ 0 conglomerática	202	512 ± 9	
220	239 ± 9	^ 0 ^ 0 riolítica	204	391 ± 7	
230	270 ± 4	^ 0 ^ 0	206	612 ± 13	/././
			222	479 ± 8	-----
			232	522 ± 11	
			234	399 ± 8	/././
			236	492 ± 9	-----
			238	461 ± 9	
			240	371 ± 7	v ^ v ^ Roca sin alteración
			250	406 ± 7	ignimbrita
			252	379 ± 6	v ^ v ^ riolítica
			258	447 ± 9	
			274	463 ± 8	

presa, (Rentería *et al.*, 2009) se muestra también en la Tabla 6. Los resultados de la concentración de actividad total de uranio en el agua correspondiente a los muestreos de los años 2008-2010 se presentan en las Tablas 4 y 5.

Se observa que en la presa de San Marcos (muestras 9a-f en la Tabla 6) el uranio está hasta 100 veces más concentrado en la materia orgánica que disuelto en el agua. También se advierte que las concentraciones de uranio en las aguas superficiales son menores que en las subterráneas, tanto de pozos someros como profundos. Esta observación se mantiene tanto para la época posterior a las lluvias (muestreos de Noviembre 2008 y 2009) como al final de la época de estiaje (Mayo 2009 y Abril 2010).

Sin embargo, de acuerdo con los resultados para el agua de la presa, la concentración de actividad de ^{238}U varía desde 0.015 Bq/L hasta el valor máximo registrado de 7.7 Bq/L (Rentería-Villalobos *et al.*, 2007), mientras que los valores para las aguas de escorrentías y pozos puede variar desde 0.02 hasta 0.52 Bq/L.

Modelo conceptual

Con base en la información obtenida del estudio litoestratigráfico de los barrenos, y de los registros eléctricos de otros pozos proporcionados por la JCAS, así como la

PERFILES LITOLÓGICOS DE BARRENOS DE POZOS PROFUNDOS UBICADOS EN EL NORTE DE LA CUENCA DE CHIHUAHUA														
PROF (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	I.1	I.2	RS.1	RS.3	RS.4	RS.5	RS.6	RS.7	PERI	SAL5	SAL8	P.DE	NMA	TOR
	..0^	..0..^	..0..^	..0..^	..0..^	/./././	/./././	..0..^	..0..^	.0.0	.0.0	.0.0	v^v	/./././
	..0^	0.0	..0..^	..0..^	..0..^	/./././	/./././	0..^	..0..^	.0.	.0.0	0.0	v^v	..0..^
	..0^	.0.	..0..^	..0..^	..0..^	0^0	/./././	0..^	..0..^	0.0	0.0	0.0	v^v	..0..^
	..0^	0.0	..0..^	..0..^	..0..^	^0	.0.	0..^	..0..^	^./^.	..0..^	0.0	v^v	..0..^
	..0^	.0.	..0..^	..0..^	..0..^	0^0	0.0	v^v	..0..^	^./^.	..0..^	0.0	v^v	..0..^
	..0^	0.0	..0..^	..0..^	..0..^	0^0	.0.	v^v	0^0	^./^.	.0.	..0..^	v^v	
	..0^	.0.	..0..^	..0..^	..0..^	^0^	0.0	v^v	0^0	..0..^	0.0	..0..^	v^v	
	..0^	0.0	..0..^	..0..^	..0..^	0^0	.0.	v^v	0^0	..0..^	.0.	..0..^	v^v	..0..^
	..0^	.0.	..0..^	..0..^	..0..^	0^0	0.0	v^v	^./^.	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	..0..^
100	..0^	0.0	v^v	..0..^	..0..^	0^0	/./././	v^v	^./^.	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	..0..^
	..0^	.0.	v^v	..0..^	..0..^	^0^	/./././		^./^.	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	
	..0^	0.0	v^v	..0..^	..0..^	0^0	..0..^		0..^	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	
			v^v	..0..^	..0..^	0^0	..0..^		^./^.	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	..0..^
	0		v^v	..0..^	..0..^	^0^	..0..^		^./^.	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	..0..^
	0		v^v	..0..^	..0..^	^0^	..0..^		v^v	..0..^	..0..^	..0..^	v^v	..0..^
	0		v^v	..0..^	..0..^	/./././	..0..^		v^v	0.0	..0..^	..0..^	v^v	..0..^
	0	v^v	v^v	..0..^	v^v		/./././		v^v	0.0	0.0	. ...	v^v	..0..^
		v^v	v^v	..0..^	v^v	///	..0..^		v^v	0.0	0	... .	v^v	..0..^
		v^v	v^v		v^v		..0..^		v^v	0.0	0.0	... .	v^v	..0..^
200	v^	v^v	v^v		v^v	/./././	0.0		v^v		0.0	... ..	v^v	
	v^	v^v	v^v		v^v	/./././	/./././		v^v		0.0	... ..	v^v	
	v^	v^v	v^v		v^v		///		..0..^	0.0	0	... ..	v^v	0.0
	v^	v^v	v^v		v^v	0^///	0.0		..0..^	0	0.0	... ..	v^v	
	^v	v^v	v^v		v^v	/./././	/./././		v^v	0.0	0.0	... ..	v^v	
	v^	v^v	v^v		v^v	/./././	^0^		v^v	0.0	0.0	... ..	v^v	
	v^	v^v	v^v		v^v	0^///	0^0		v^v	0.0	0.0	... ..	v^v	
	^v	v^v	v^v		v^v	v^v	0^0		v^v	0	0			
	^v	v^v	v^v		v^v	v^v	0^///		v^v	0.0	0.0			
	v^	v^v			v^v	v^v	0^0		v^v	0.0				
300	^v	v^v			v^v	v^v	v^v		v^v	0.0				
	^v	v^v			v^v	v^v	v^v		v^v	0.0				
								v^v	..0//	0..^.				
									v^v	..0..^	0..^.			
		/./././	Suelo orgánico			Fondo lacustre		v^v	..0//	0..^.				
		/./././						v^v	0..^.	0..^.				
		/./././						v^v	0..//^	0..^.				
	0.0	Aluvión Conglomerático	..0//	Material. con caliche				..0..^						
	.0.		..0//					v^v						
400	0.0		..0//					v^v						
	..0..^	Aluvión	v^v	Ignimbrita riolítica				v^v						
	..0..^		v^v					v^v						
	..0..^		v^v					v^v						
	0.0	Limos y arenas	... .	Gravilla fina y arena				v^v						
	0		. ...					v^v						
	0.0		... .					v^v						
	0^0	Brecha Conglomerática	^./^.	Brecha con limo				v^v						
	^0^		^./^.					v^v						
500	0^0		^./^.					v^v						

Figura 5. Perfiles estratigráficos de 14 pozos profundos en la zona San Marcos-Sacramento Norte. Se resaltan los horizontes con alto contenido de sedimentos finos con características de paleo-suelos orgánicos o paleo-zonas de inundación.

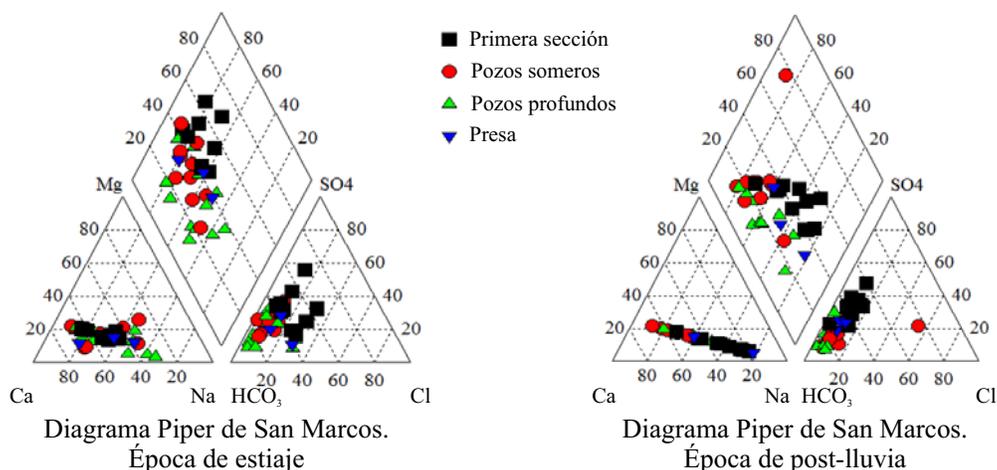


Figura 6. Diagramas de Piper resultantes de los análisis del agua superficial, de la presa, de pozo someros y de pozos profundos en la zona de San Marcos, Chihuahua. Se reúnen los resultados según fecha de muestreo en época de estiaje o seca y de post-lluvia o húmeda.

información proporcionada por la CNA, se ha diseñado un modelo hidrogeológico sobre la sección vertical AA' que corre desde las estribaciones de la sierra de Victorino-Majalca al poniente, hasta las estribaciones de la sierra de Nombre de Dios al oriente (ver Figuras 2 y 3). En los barrenos de perforación de pozos profundos se detectaron capas de sedimentos arenosos-arcillosos con anomalías en la radiactividad. Aunque las concentraciones no han sido las suficientes para identificar variedades mineralógicas por métodos convencionales, la radiometría indica anomalías en algunos de los estratos areno-arcillosos (ver por ejemplo las profundidades a 60, 130 y 190 m en el pozo Torreoncillos, así como las que se encuentran a 4, 154, 206 y 236 m en el pozo RS6 en la Tabla 3). Los tramos anómalos presentaron contenidos variables de material carbonoso-bituminoso, que indica que pudieron ser sedimentos de planicie de inundación o paleo-suelos (Tabla 3). El método de muestreo de estas esquirlas de barrenación en ocasiones puede mezclar materiales de otros estratos. Por este motivo estos resultados se toman en conjunto como indicios de captación de uranio en su estado reducido por los horizontes que presentan contenido de material carbonoso-bituminoso:

Se propone que estos horizontes arcillosos son recolectores del ión uranilo. Esto permite explicar los procesos que sufrió el material radiactivo desde el depósito de origen, hasta su transformación iónica que causó su enriquecimiento en las aguas del subsuelo.

Con los resultados obtenidos se generó el modelo conceptual que representa el movimiento de las aguas superficiales y subterráneas y la migración del uranio a partir de los depósitos reconocidos como las fuentes primarias.

En el modelo conceptual, que se presenta en las Figuras 2 y 3, se muestra el flujo de las aguas subterráneas (acuífero regional) y superficiales (local), los principales puntos de muestreo de agua en superficie y en pozos profundos, así como el tipo de agua en cada zona; las tres secciones contienen familias bicarbonatadas.

La concentración de elementos disueltos a partir de las interacciones agua-roca está determinada por la velocidad del flujo y el tiempo de residencia del agua en el depósito (Tricca *et al.*, 2000; Chabaux *et al.*, 2008; Porcelli, 2008). El flujo y composición del agua de la primera sección, que es una zona fracturada, es heterogénea, de acuerdo con la descripción de Fitts (2002). En nuestro caso, al existir solamente corrientes superficiales efímeras, se puede considerar que la composición química y los contenidos de uranio también serán variables.

La concentración de uranio en los sedimentos colectados a lo largo del río San Marcos es baja y uniforme (de 6 a 12 ppm, ver Tabla 2), a excepción de las pequeñas áreas exclusivas donde afloran los depósitos de uranio. Esto indica que el material radiactivo no está siendo transportado por largas distancias en sedimentos con diámetros mayores que la malla 200. Sin embargo, en los filtros de agua recolectada en época de estiaje, se identificó material radiactivo (Rentería *et al.*, 2009). El tiempo de residencia del agua en las corrientes efímeras es corto, como es característico en zonas áridas. En los pozos someros el tiempo de residencia es de 2 a 20 días y en acuíferos profundos es de 12 a 120 años (Burillo Montúfar *et al.*, 2012). El agua superficial o sub-superficial, tipo bicarbonatada cálcica a sódica con un pH de 7 a 8, propicia condiciones para mantener al ión uranilo en solución.

El agua subterránea profunda, tipo bicarbonatada-cálcica-sódica a cálcica, con pH de 7.5 a 9.2, genera las condiciones alcalinas para la precipitación del uranio si el estrato receptor presenta un Eh reductor.

DISCUSIÓN

El uranio se presenta más frecuentemente en dos estados de oxidación; U(IV) y U(VI). Este último, el uranio hexavalente, en el estado oxidado, es el ión uranilo (UO_{2+2})

Tabla 4. Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, Temperatura (T), Eh y concentración de actividad total de uranio (U), en agua superficial (S), pozos someros (PS), Pozos Profundos (PP) y agua de la presa (P) del área de San Marcos, correspondiente a los muestreos en época húmeda (Agosto, 2008; Noviembre, 2008; Noviembre 2009). La incertidumbre estadística es 15 %.

No.	Tipo	Agosto, 2008			Noviembre, 2008					Noviembre, 2009				
		SDT mg/L	pH	U Bq/L	SDT mg/L	pH	T °C	Eh mV	U Bq/L	SDT mg/L	pH	T °C	Eh mV	U Bq/L
1	S	220	7.6	0.26						100	7.19	21.4	240	0.029
2	S	430	7.6	0.14	120	8.2	16.4	244	D.L.					
3	S	210	7.1	0.17						110	7.35	14.7	238	0.022
4	S	170	7.9	L.D.										
5	S	400	7.2							100	7.7	21.9	238	0.040
6	S	280	8	0.5						90	6.6	20.6	240	0.026
7	S	130	7.5	L.D.										
8	S	120	7.8	0.48										
9	P	90	7.5	0.28	60	8.4	23.6	233	L.D.	60	8.4	22.9	226	0.030
10	PS	150	7.3	0.09	120	7.5	22.6	280	0.2	100	6.16	20.7	274	0.059
11	PP				350	7.6	13.2	283	L.D.	260	7.61	21.7	217	0.38
12	PP									220	8.6	14.4	202	0.29
13	PS				350	7.7	16.3	282	L.D.	450	6.47	19.8	230	0.16
14	PS				1640	7.2	14.9	304	0.6	580	6.47	20.7	235	0.33
15	PP				300	8.3	15.6	270	0.4	310	6.93	27.1	221	0.45
16	PS				130	7.7	23.8	240	L.D.	130	6.5	21.7	200	0.046
17	PP				120	9.2	16.7	240	L.D.	230	7.29	21.7	224	0.13
18	PP				200	8.5	13.7	263	L.D.	200	7.3	20.9	228	0.17
19	P									160	6.46	20.1	255	0.053
20	PS				120	7.8	16.2	285	L.D.	120	6.73	21.4	250	0.064
21	PP				210	7.9	26.8	253	L.D.	150	6.9	20.8	243	0.12

Nota: Una celda vacía significa que ese parámetro no se determinó en esa campaña de muestreo. Concentraciones que exceden el límite de actividad alfa total (0.56 Bq/L) de la norma NOM-127-SSA1-1994 aparecen en negritas. L.D. significa valor debajo del Límite de Detección. L.D. = 0.10 Bq/L Agosto 2008; L. D. = 0.15 Bq/L Noviembre, 2008; L. D. = 0.002 Bq/L Noviembre, 2009.

y la forma más soluble del elemento, mientras que en un medio reductor predomina el mineral uraninita UO_2 y sus hidróxidos, que son insolubles mientras no estén expuestos a un ambiente oxidante.

Los depósitos de uranio en areniscas y arcillas se forman cuando el uranio que circula disuelto en las aguas subterráneas, se mueve en los acuíferos hasta conseguir un medio reductor (Goldhaber *et al.*, 1978). La localización de este tipo de depósitos de uranio y su tamaño depende de la abundancia de material radiactivo disuelto y la reactividad del medio reductor, el cual será el responsable de convertir a la especie soluble UO_{2+2} hacia la especie insoluble UO_2 .

La naturaleza y la abundancia del material carbonoso en la secuencia sedimentaria por donde circulan las soluciones, son de importancia crítica. En las areniscas pobres en materia orgánica, se ha demostrado que la presencia de gas H_2S es capaz de ejercer la función reductora para el uranio (Gascoyne, 1992). En consecuencia, la movilidad y la concentración de uranio está fuertemente controlada por las condiciones de reducción-oxidación del área. Los depósitos de uranio alojados en areniscas se definen como acumulaciones epigenéticas que ocurren en formaciones de origen fluvial, lacustre o deltaico. La forma de estos depósitos tiende a ser tabular o del tipo *roll-front* (Figura 7)

(Harshman, 1970; Harshman, 1972; Guilbert y Park, 1986). Cada una se relaciona con procesos geoquímicos particulares en donde las aguas subterráneas con baja concentración de uranio se infiltran en las areniscas.

Los depósitos de *roll-front* no son estáticos, migran según la dirección del flujo de las aguas subterráneas (Plant *et al.*, 1999). Las aguas oxidantes al entrar en contacto con la superficie anterior del *roll* producen una redisolución del depósito, lo cual podría ser el caso en las aguas de pozos con horizontes arcillosos analizados en la cuenca de Chihuahua.

El ión uranilo (UO_{2+2}) puede estar en solución mientras se encuentra en un ambiente oxidante; cuando el flujo de agua transita del ambiente oxidante a un ambiente reductor, el U(VI) se reduce a U(IV) y se deposita temporalmente hasta que nuevamente las soluciones oxidantes transforman la zona reductora. El flujo de agua está oxidando continuamente al acuífero y el frente de reducción-oxidación se va desplazando en el espacio-tiempo en la dirección del flujo (Figura 7). De acuerdo con Langmuir (1978), el uranio primario puede ser movilizado por oxidación al estado hexavalente:

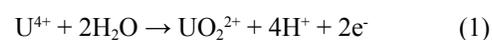
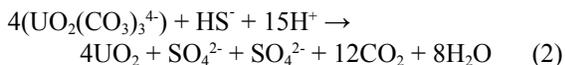


Tabla 5. Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, Temperatura (T), Eh y concentración de actividad total de uranio (U), en agua superficial (S), pozos someros (PS), Pozos Profundos (PP) y agua de la presa (P) del área de San Marcos, correspondiente a los muestreos en época (Mayo 2009; Abril, 2010). La incertidumbre estadística es 15 %.

No.	Tipo	Mayo, 2009					Abril, 2010				
		SDT mg/L	pH	T °C	Eh mV	U Bq/L	SDT mg/L	pH	T °C	Eh mV	U Bq/L
1	S	230	7.5	28.6	243	0.12					
2	S										
3	S	330	6.6	38.5	240	0.13					
4	S	338	6.7	33	221	0.14	140	8.75	24.1	249	0.16
5	S						150	8.77	24.2	247	0.024
6	S						100	8.73	24.2	242	0.033
7	S	240	6.8	35	235	L.D.	140	8.9	23.6	244	0.43
8	S						230	9.1	26.1	240	0.36
9	P	50	8.5	31	206	0.034	70	8.89	19.6	185	0.35
10	PS	80	6.5	30.5	248	L.D.	90	7.75	21	285	1.61
11	PP	600	6.4	24.1	254	L.D.	240	8.73	23.4	242	0.23
12	PP	230	7.4	25.8	217	0.35	310	8.57	20.4	250	0.28
13	PS	450	6.7	29.3	252	0.25	450	8.47	22.2	260	L.D.
14	PS	240	7.1	27.7	240	0.44	600	8.29	20.7	252	0.26
15	PP	160	6.5	26.6	260	0.34	300	8.67	23	240	0.49
16	PS	350	8.2	29.2	240	0.048	170	8.56	23	238	0.02
17	PP	230	8.9	29.9	212	0.39	230	9.32	22.3	254	0.10
18	PP	233	7.4	29.3	200	0.17	190	8.82	23.5	243	L.D.
19	P	220	7.3	29.3	242	L.D.					
20	PS	90	6.8	30.3	260	L.D.	120	8.51	24.1	253	0.29
21	PP	60	9	28.1	232	0.26	170	8.74	22.9	252	L.D.

Nota: Una celda vacía significa que ese parámetro no se determinó en esa campaña de muestreo. Concentraciones que exceden el límite de actividad alfa total (0.56 Bq/L) de la norma NOM-127-SSA1-1994 aparecen en negritas. L.D. significa valor debajo del Límite de Detección. L.D. = 0.004 Bq/L Mayo 2009; L. D.= 0.003 Bq/L Abril, 2010.

Posteriormente el uranio hexavalente transportado por el flujo de aguas superficiales y subterráneas entra en alguna zona reductora en el acuífero y se precipita nuevamente como tetravalente (Figura 7);



En el caso de estudio, el uranio está siendo transportado por las escorrentías y las aguas subterráneas en forma de disolución iónica con Eh (+), con valores que fluctúan entre 185 y 304 mV y con pH que varía entre 7.16 y 9.20.

Las Figuras 7 y 8 presentan el transporte del uranio en forma acuosa y su depósito como uraninita de acuerdo con el ambiente de reducción-oxidación y su pH según Tosiani et al. (2004). De acuerdo con esta gráfica, el campo bicarbonatado marcado por los límites de Eh (entre 0.185 y 0.304) y pH (entre 7.16 y 9.20) obtenidos para las aguas del área en estudio, es favorable para la disolución y transformación del uranio tetravalente en uranio hexavalente.

De este modo se explica que en la zona norte de la cuenca de Chihuahua, al finalizar la época del estiaje, durante los meses de abril y mayo la presa San Marcos pierde más de la mitad de su volumen debido a la evaporación y la

extracción para la irrigación de tierras de cultivo. Esto incrementa el pH y acelera la concentración de sólidos disueltos y suspendidos, así como la concentración de materia orgánica

Tabla 6. Concentración de actividad total del uranio en material suspendido (Bq/kg) y disuelto en el agua (Bq/L) del río San Marcos, Mayo 2007. La incertidumbre estadística es 10%.

Muestra	Act _{esp} U _{TOTAL} (Bq/kg)	A _{esp} U _{TOTAL} (Bq/L)
2	33	
5	205	
8	88	
9a	130	0.20
9b	147	0.52
9c	220	0.21
9d	202	0.22
9e	110	0.29
9f		0.14
16	129	
18	145	
19	110	
20	51	
22	70	

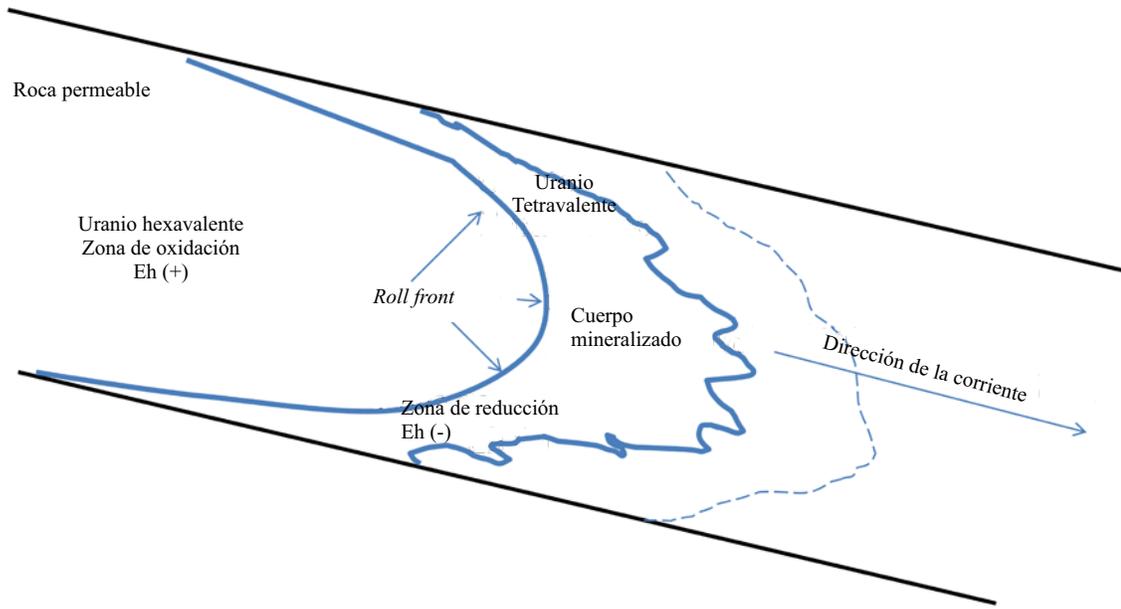


Figura 7. Esquema del depósito uranífero tipo *roll-front*. Modificado de Guilbert y Park (1986).

en forma coloidal. Estas partículas coloidales son capaces de capturar al uranio, lo cual se demostró en el incremento de la concentración de actividad de uranio en las muestras colectadas durante el estiaje.

Esta agua con uranio disuelto se transporta por la superficie y se infiltra. Se sugiere que los horizontes de arcillas en la llanura aluvial son recolectores del ión uranilo. En estos horizontes el uranilo sufre un proceso de reducción y captura por el material orgánico. Dependiendo del pH y Eh, la removilización y oxidación del uranio causa nuevamente su reintegración al agua que se extrae de los pozos agrícolas de la región. Potencialmente, este proceso ocurre en el valle Chihuahua-Sacramento de la misma manera.

CONCLUSIONES

Se comprobó la existencia de estratos y lentes arcillo-arenosos con anomalías radiométricas en la zona noroccidental del valle Chihuahua-Sacramento. La presencia de material carbonoso en estos sedimentos es conspicua.

Las anomalías encontradas en el agua de algunos pozos profundos están asociadas a la presencia de cuerpos de material fino con material carbonoso-bituminoso, que son posibles paleo-suelos o paleo-sedimentos de inundación.

En aguas ricas en materia orgánica, como es el caso de la presa San Marcos, el uranio puede estar unido a partículas de materia orgánica con concentraciones mayores a 100 veces que un valor normal.

En la presa San Marcos la presencia de materia orgánica coloidal es un factor de retención del uranio. Las aguas de la presa San Marcos y las aguas de algunos pozos de la región noroccidental del valle de Chihuahua presentan

valores de concentración de actividad del uranio superiores a los de referencia UNSCEAR (2008).

El modelo conceptual hidrogeoquímico propuesto contribuye a explicar la dispersión del uranio y la radiactividad del agua en el valle. La radiactividad en Chihuahua está relacionada con la presencia natural de los cuerpos uraníferos del área de San Marcos. El material radiactivo puede ser transportado ya sea en forma iónica o como material suspendido por las escorrentías hasta las zonas de reducción en la cuenca de Chihuahua donde es depositado como U(IV).

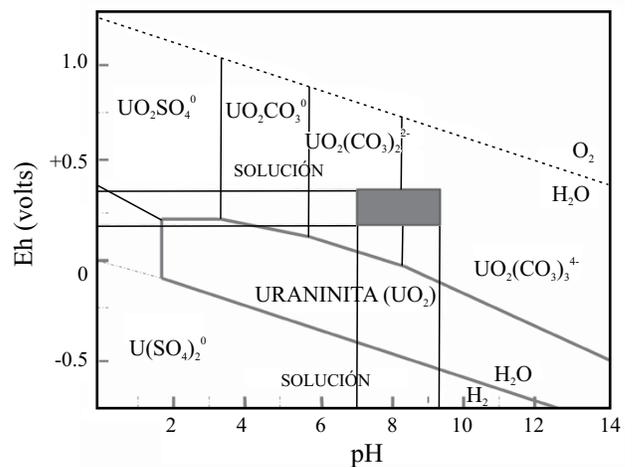


Figura 8. Diferentes especies de uranio según el pH y el potencial de óxido-reducción (Eh) del medio (Tosiani *et al.*, 2004). El recuadro oscuro marca los límites de las condiciones de pH y Eh de las aguas superficiales y subterráneas de la zona norte de la cuenca de Chihuahua. (Eh de 185 a 304 mV y pH de 7.16 a 9.2).

Una vez precipitado, el uranio puede re-disolverse con el flujo del agua oxidada y continuar su migración hasta encontrar una nueva zona reductora.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos SEP-CONACYT 26040 y Fondos Mixtos Conacyt-Gobierno del Estado de Chihuahua CHIH-2008-C02-91931.

REFERENCIAS

- Alfonso-Zwanziger, J., 1992, New concepts in Mesozoic stratigraphy of Chihuahua, *en* Godell, P.C., García-Gutiérrez, C., Reyes-Cortés, I., Energy resources of the Chihuahua Desert region: El Paso, Texas, United States of America, El Paso Geological Society, 77-124.
- Aupiais, J., Aubert, C., Dacheux, N., 2003, Some rules to improve the energy resolution in alpha liquid scintillation with beta rejection: *Radiochimica Acta*, 91, 63-69.
- Burillo-Montúfar, J.C., Reyes-Cortés, M., Reyes-Cortés, I.A., Espino-Valdez, M.S., Hinojosa de la Garza, O.R., Nevárez-Ronquillo, D.P., Herrera-Peraza, E., Rentería-Villalobos, M., Montero-Cabrera, M.E., 2012, Uranium-series isotopes transport in surface, vadose and ground waters at San Marcos uranium bearing basin, Chihuahua, Mexico: *Applied Geochemistry*, 27, 1111-1122.
- Chabaux, F., Bourdon, B., Riotte, J., 2008, Chapter 3 U-Series Geochemistry in Weathering Profiles, River Waters and Lakes, *en* Krishnaswami, S., Cochran J.K. (eds.), U-Th Series Nuclides in Aquatic Systems: Elsevier, Series Radioactivity in the Environment, v. 13, 49-104.
- Chiozzi, P., De Felice, P., Fazio, A., Pasquale, V., Verdoya, M., 2000, Laboratory application of NaI(Tl) γ -ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics: *Applied Radiation and Isotopes*, 53(1-2), 127-132.
- Colmenero-Sujo, L., Montero-Cabrera, M.E., Villalba, L., Rentería-Villalobos, M., Torres-Moye, E., García-León, M., García-Tenorio, R., Mireles-García, F., Herrera-Peraza, E.F., Sánchez-Aroche, D., 2004, Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico: *Journal of Environmental Radioactivity*, 77(2), 205-219.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2001, Hidrodinámica de los acuíferos Chihuahua-Sacramento, Chih. y Chupaderos, Zac.: Comisión Nacional del Agua, Subdirección Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Tomo 1, informe del contrato No. GAS-014-PRO-01, 207 p.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 2001, Carta Chihuahua H13C66, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, México.
- Division of Nuclear Fuel Cycle (DNFC), 1987, Preparation and certification of IAEA gamma-ray spectrometry reference materials RGU-1, RGTh-U and RGK-1: Vienna, International Atomic Energy Agency, report IAEA/RL/148, 52 pp.
- Ferriz, H., 1985, Uranium mineralization in the San Marcos volcanic center Chihuahua, Mexico, *en* Uranium deposits in volcanic rocks, Proceedings of a Technical Committee Meeting, El Paso, Texas, 2-5 Abril 1984: International Atomic Energy Agency, STI/PUB/690, 197-216.
- Fitts, C.R., 2002, Principles of flow, *en* Fitts, C.R., *Groundwater Science*: London, Academic Press, 39-80.
- Gandhi, S.S., Bell, R.T., 1995, Volcanic-Associated Uranium, *en* Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. (eds.), *Geology of Canadian Mineral Deposits Types*: Geological Survey of Canada, 8, 269-276.
- Gascoyne, M., 1992, Geochemistry of the actinides and their daughters, *en* Ivanovich, M., Harmon, R.S. (eds.), *Uranium Series Disequilibrium. Applications to Earth, Marine, and Environmental Science*: Oxford, United Kingdom, Clarendon Press, 34-61.
- Goldhaber, M.B., Reynolds, R.L., Rye, R.O., 1978, Origin of a South Texas roll-type deposit; II, Sulfide petrology and sulfur isotope studies: *Economic Geology*, 73(8), 1690.
- Gómez-Escobar, V., Vera Tomé, F., Lozano, J.C. y Martín Sánchez, A., 1998, Extractive procedure for uranium determination in water samples by liquid scintillation counting: *Applied Radiation and Isotopes*, 49(7), 875-883.
- Goodell, P.C., 1985, Chihuahua city uranium province, Chihuahua Mexico, *en* Uranium deposits in volcanic rocks, Proceedings of a Technical Committee Meeting, El Paso, Texas, 2-5 Abril 1984: International Atomic Energy Agency, STI/PUB/690, 97-124.
- Guilbert, J.M., Park, C.F., 1986, *The geology of ore deposits*: W. H. Freeman, New York, 985 pp.
- Hach, C., 2008, *Water analysis handbook*: Hach Co., 1700 pp.
- Harshman, E.N., 1970, Uranium ore rolls in the United States. Uranium Exploration Geology: Viena, International Atomic Energy Agency, STI/PUB/277, 219-232.
- Harshman, E.N., 1972, Geology and uranium deposits, Shirley basin area, Wyoming: United States Geological Survey, Professional Paper 745, 82.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1999, Estudio Hidrológico del Estado de Chihuahua: Aguascalientes, México, 222 pp.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 1985, Uranium deposits in volcanic rocks, Proceedings of a Technical Committee Meeting, El Paso, Texas, 2-5 Abril 1984: International Atomic Energy Agency, STI/PUB/690, 468 pp.
- Ketcham, R.A., 1996, An improved method for determination of heat production with gamma-ray scintillation spectrometry: *Chemical Geology*, 130(3-4), 175-194.
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42, 547-569.
- Le Bas, M.J., Streckeisen, A.L., 1991, The IUGS systematics of igneous rocks: *Journal of the Geological Society*, 148(5), 825-833.
- Luna-Porres, M.Y., Alarcón-Herrera, M.T., Silva-Sáenz, M., Rentería-Villalobos, M., Rodríguez-Villa, M.A., Herrera-Peraza, E., Reyes-Cortés, M., Montero-Cabrera, M.E., 2011, *Baccharis Salicifolia* development in the presence of high concentrations of uranium in the arid environment of San Marcos, Chihuahua: *Revista Mexicana de Física*, 57, 40-43.
- Montero-Cabrera, M.E., Rentería-Villalobos, M., Reyes-Cortés, M., Burciaga-Valencia, D., Silva-Sáenz, M., Reyes-Cortés, I., Herrera Peraza, E.F., 2007, Contaminación natural con uranio del agua subterránea en el valle de Chihuahua-Sacramento: características y origen, *en* VI Congreso Internacional y XII Nacional de Ciencias Ambientales, Chihuahua, México.
- Muminov, I.T., Muhamedov, A.K., Osmanov, B.S., Safarov, A. A. y Safarov, A.N., 2005, Application of NaI(Tl) detector for measurement of natural radionuclides and ^{137}Cs in environmental samples: new approach by decomposition of measured spectrum: *Journal of Environmental Radioactivity*, 84(3), 321-331.
- Plant, J.A., Simpson, P.R., Smith, B., Windley, B.F., 1999, Uranium ore deposits-products of the radioactive earth, *en* Burns P.C., Finch, R.J. (eds.), *Uranium: Mineralogy, Geochemistry and Environment*: Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 38, 257-319.
- Porcelli, D., 2008, Chapter 4 Investigating Groundwater Processes Using U- and Th-Series Nuclides, *en* Krishnaswami, S., Cochran J.K. (eds.), U-Th Series Nuclides in Aquatic Systems: Elsevier, Series Radioactivity in the Environment, v. 13, 105-153.
- Rentería-Villalobos, M., 2003, Estudio de la radiactividad natural en la ciudad Aldama, Chihuahua (Medio Ambiente y Energía): Chihuahua, México, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, tesis de maestría, 115 pp.
- Rentería-Villalobos, M., 2007, Modelo conceptual de las concentraciones de uranio en agua superficial y subterránea en la zona de San Marcos-Sacramento, Chihuahua (Medio Ambiente y Energía): Chihuahua, México, Centro de Investigación en Materiales

- Avanzados, tesis doctoral, 126 pp.
- Rentería-Villalobos, M., Montero-Cabrera, M.E., Rodríguez-Pineda, A., Reyes-Cortés, M., Herrera-Peraza, E.F., Valenzuela-Hernández, M., 2005, Uranium series specific activities of rocks forming ranges around Chihuahua City, Mexico, *en* 2nd International Conference on Radioactivity in the Environment, Nice, France, International Union of Radioecology, 133-136.
- Rentería-Villalobos, M., Montero-Cabrera, M.E., Reyes-Cortés, M., Herrera Peraza, E. F., Rodríguez-Pineda, A., Manjón-Collado, G., García-Tenorio, R., Crespo, T., Valenzuela-Hernández, M., 2007, Characterization of source rocks and groundwater radioactivity at the Chihuahua valley: *Revista Mexicana de Física*, S53(3), 16-22.
- Rentería, M., Silva, M., Reyes, M., Méndez, C.G., Burciaga, D., Herrera, E.F., Montero, M. E., 2009, Radionuclides present in surface water at the San Marcos Range, Chihuahua, Mexico, *en* 10 International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements (ICOBTE), Chihuahua, Mexico, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 340-341.
- Reyes-Cortés, M., 2005, Distribución mineralógica de las fuentes primarias de radiactividad en la zona noreste del valle de Chihuahua: Física de Materiales: Chihuahua, México, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Maestría en Ciencia de Materiales, tesis de maestría, 91 pp.
- Reyes-Cortés, M., Fuentes-Cobas, L., Torres-Moye, E., Esparza-Ponce, H., Montero-Cabrera, M., 2010, Uranium minerals from the San Marcos District, Chihuahua, Mexico: *Mineralogy and Petrology*, 99(1), 121-132.
- Rodríguez-Pineda, J.A., 2000, A geochemical, geophysical and remote sensing investigation of the water resources in the city of Chihuahua, Mexico: El Paso, Texas, University of Texas at El Paso, tesis de doctorado, 144 pp.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI), 2001a, NMX-AA-036-SCFI-2001, Análisis de agua -determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba, 22 pp.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI), 2001b, NMX-AA-073-SCFI-2001, Análisis de agua -determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba, 18 pp.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI), 2001c, NMX-AA-051-SCFI-2001, Análisis de agua -determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- Método de prueba, 52 pp.
- Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), 2000, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización: *Diario Oficial de la Federación*, 21 pp.
- Silva-Sáenz, M.Y., 2008, Actividad de los isótopos ^{234}U - ^{238}U y ^{226}Ra en el río San Marcos-Sacramento Norte, Chihuahua, México (Medio Ambiente y Energía): Chihuahua, México, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, tesis de maestría, 105 pp.
- Streckeisen, A., 1980, Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks, International Union of Geological Science, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks: *Geologische Rundschau*, 69(1), 194-207.
- Tosiani, T., Loubet, M., Viers, J., Valladon, M., Tapia, J., Marrero, S., Yanes, C., Ramirez, A., Dupre, B., 2004, Major and trace elements in river-borne materials from the Cuyuni basin (southern Venezuela): evidence for organo-colloidal control on the dissolved load and element redistribution between the suspended and dissolved load: *Chemical Geology*, 211(3-4), 305-334.
- Tricca, A., Porcelli, D., Wasserburg, G., 2000, Factors controlling the groundwater transport of U, Th, Ra, and Rn: *Journal of Earth System Science*, 109(1), 95-108.
- United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR) 2008, Sources and Effects of Ionizing Radiation: Report to the General Assembly with Scientific Annexes, New York, United States of America, 1, 24 pp.
- Valenzuela-Hernández, M., 2006, Estudio de la radiactividad de rocas extraídas de pozos de agua profundos (Medio Ambiente y Energía): Chihuahua, México, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, tesis de maestría, 95 pp.
- Villalba, L., Colmenero-Sujo, L., Montero-Cabrera, M.E., Cano-Jiménez, A., Rentería-Villalobos, M., Delgado-Mendoza, C.J., Jurado-Tenorio, L.A., Dávila-Rangel, I., Herrera-Peraza, E.F., 2005, Radon concentrations in ground and drinking water in the state of Chihuahua, Mexico: *Journal of Environmental Radioactivity*, 80(2), 139-151.
- Villalba, L., Montero-Cabrera, M.E., Manjón-Collado, G., Colmenero-Sujo, L., Rentería-Villalobos, M., Cano-Jiménez, A., Rodríguez-Pineda, A., Dávila-Rangel, I., Quirino-Torres, L., Herrera-Peraza, E.F., 2006, Natural radioactivity in groundwater and estimates of committed effective dose due to water ingestion in the state of Chihuahua (Mexico): *Radiation Protection Dosimetry*, 121(2), 148-157.

Manuscrito recibido: Agosto 8, 2011

Manuscrito corregido recibido: Junio 22, 2012

Manuscrito aceptado: Junio 26, 2012