

# SISTEMA HIDROTHERMAL PALEOZOICO EN LA CUENCA DE ILLINOIS Y SU EFECTO SOBRE LA DISTRIBUCION Y RANGO DE HIDROCARBUROS

Mariño, J.<sup>1</sup>; Marshak, S<sup>2</sup>

## RESUMEN

La Cuenca de Illinois en el Medio Oeste de Estados Unidos es una cuenca intracratónica que contiene reservas sustanciales de carbón en el Paleozoico Superior. El rango de dicho carbón es alto, considerando que el carbón no fue enterrado profundamente. Un re-análisis de las temperaturas al tiempo de carbonización (utilizando reflectancia de la vitrinita, conodontes, e inclusiones de fluidos) indica diferentes patrones. En la parte sur de la cuenca, las paleogeotermas (perfiles de temperatura vs. profundidad) son irregulares. En la parte central, hay un incremento abrupto en el gradiente cerca al nivel del contacto Pensilvaniano/Misisipiano. En la parte norte, el gradiente es paralelo a la geoterma actual. Estos resultados son compatibles con un modelo en el cual fluidos calientes, migrando de sur a norte a través de acuíferos carboníferos, introdujeron calor al carbón. Estos fluidos pudieron haber sido calentados por intrusiones Pérmicas al sur. Modelamiento preliminar de elementos finitos, utilizando Basin2, demuestra que la migración de tales fluidos pudo producir los rangos de carbón observados. Estudios preliminares de catodoluminiscencia encuentran dolomita barroca como evidencia adicional de migración de fluidos hidrotermales. Las inclusiones de fluidos en las venas indican que las temperaturas de los fluidos eran cercanas a los 100°C.

**Palabras claves:** hidrotermal, carbón, rango, gradiente, paleotermómetro

## PALEOZOIC HYDROTHERMAL SYSTEM IN THE ILLINOIS BASIN AND ITS EFFECT ON DISTRIBUTION AND RANK OF HYDROCARBONS

### ABSTRACT

The Illinois Basin of the Midwestern United States is an intracratonic basin containing substantial coal reserves in Upper Carboniferous strata. The rank of this coal is anomalously high, considering that the coal was not buried deeply. A reexamination of paleotemperatures at the time of coalification (using vitrinite reflectance; conodonts; and fluid inclusions) indicates distinct patterns. In the southern portion of the basin, paleogeotherms (profiles of paleotemperature vs. depth) are irregular. In the central part of the basin, there is an abrupt increase in the geothermal gradient at the level of the Pennsylvanian/Mississippian contact. In the northern portion of the basin, the gradient is parallel to present-day geotherm. These results are compatible with a model in which hot fluids, migrating from south to north through aquifers within the Carboniferous, introduced heat to the coal. These fluids may have been warmed by Permian intrusions at the south of the Illinois basin. Preliminary finite-element models of groundwater flow, produced using Basin2, demonstrate that such fluid migration could produce temperatures necessary to produce coal ranks observed. Preliminary cathodoluminescence study found baroque dolomite in cements, further evidence of hydrothermal-fluid migration. Fluid inclusions in the veins indicate fluid temperatures were close to 100°C.

**Key words:** hydrothermal, coal, rank, gradient, paleothermometer

---

<sup>1</sup>University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Geology, jemarino@uiuc.edu

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Sogamoso, Ingeniería Geológica jorgeemarino@hotmail.com

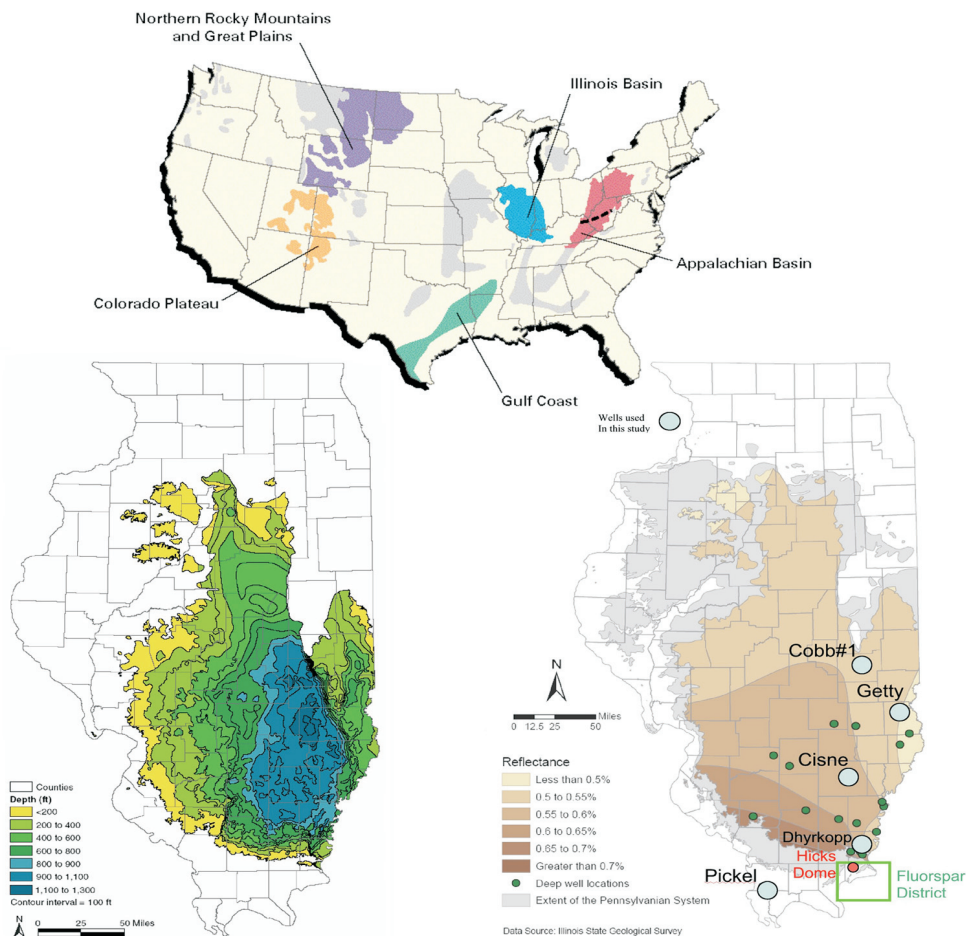
<sup>2</sup> University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Geology, smarshak@uiuc.edu

## INTRODUCCIÓN

En algunas cuencas del mundo se ha encontrado que el enterramiento no siempre explica el metamorfismo del carbón. Ese también parece ser el caso de la cuenca de Illinois (CI) en el Medio Oeste de Estados Unidos donde se ha encontrado que los carbones con mayores rangos no están localizados en la parte mas profunda de la cuenca, sino que están cerca al Distrito Fluorspar, una región de conocidas alteraciones hidrotermales en la parte sur (FIGURA 1). Igualmente, se ha encontrado que los carbones Pensilvanianos tienen valores de madurez mas altos de lo que se podría explicar con la cantidad actual de enterramiento (Damberger, 1971; Hower & Gayer, 2002). Dichas anomalías térmicas han sido explicadas en diferentes formas. Una posible

explicación es que un paquete adicional de sedimentos haya causado el incremento en rango hacia el sur y que posteriormente haya sido removido por la erosión (Damberger, 1971; Cluff & Byrnes, 1991). La segunda explicación es que una intrusión haya incrementado el rango (Damberger, 1971). Otra explicación es flujo regional ya que muchos investigadores han mostrado que el calor transportado por el flujo regional a través de acuíferos en el Paleozoico Inferior, como respuesta a altos topográficos, puede tener un efecto termal en las cuencas (Bethke, 1986a; Rowan, 2002).

Nuestros análisis previos de la reflectancia de la vitrinita (RV) sugieren que no solamente hay anomalías en el rango, sino que también en ciertas partes de la cuenca el paleogradient (la curva que muestra temperatura



**FIGURA 1.** Profundidad vs. Rango en el manto de carbón Herrin en la Cuenca de Illinois. Note la ubicación de la intrusión ignea (Hicks Dome), del Distrito Fluorspar y de los pozos.

vs. profundidad, basada en temperatura derivada de RV) presenta una inflexión. Dicha inflexión no ha sido reportada previamente, no se explica a partir de un paquete adicional de sedimentos y no es compatible con las explicaciones o hipótesis que se han tratado de explicar la carbonización y las anomalías térmicas en la CI.

Los objetivos del presente estudio son: Primero, confirmar la presencia de la inflexión en el gradiente térmico de la CI. Segundo, determinar si la inflexión esta relacionada con las diferentes explicaciones o hipótesis, previamente mencionadas, que tratan de explicar las anomalías en el rango del carbón. Los resultados de esta investigación pueden proveer una perspectiva adicional en el estudio de las anomalías térmicas en la cuenca y pueden ayudar a explicar la no existencia de campos comerciales de petróleo y gas en el Pensilvaniano y en el Misisipiano superior del sur de la CI.

## ANTECEDENTES

Originalmente el rango del carbón era considerado el producto de la profundidad del enterramiento de las rocas, pero en algunas partes del mundo el enterramiento por si solo no explica las anomalías observadas en el rango del carbón, por lo que se han considerado varios mecanismos alternativos de metamorfismo. En la Cuenca de los Apalaches, donde la cubierta estratigráfica no explica la presencia de antracitas en la región, Daniels (1992) utilizo inclusiones de fluidos y mineralogía de las arcillas para concluir que los fluidos hidrotermales contribuyeron con el calor adicional necesario para formar antracita.

En Gales (Reino Unido), algunos carbones tienen un rango menor que los mantos de carbón que los sobreyacen y se ha sugerido que pulsos de fluidos calientes invirtieron el gradiente térmico en algunas partes de la sección estratigráfica; adicionalmente se ha encontrado que la permeabilidad de los carbones en algunas secciones fue incrementada por fracturas asociadas con fallas de cabalgamiento (Gayer & Fowler, 1999). En la Cuenca Bowen (Australia), el depocentro de la cuenca no coincide con la región de más alto rango. Uysal *et al.* (2000), después de analizar RV, arcillas e

isótopos, sugirieron que el flujo de los fluidos estaba restringido a los sectores permeables a lo largo de un sistema de fallas dando como resultado carbones de más alto rango y gradientes en el rango de los carbones adyacentes a las fallas en la Cuenca Bowen.

En la Cuenca de Illinois (CI), los primeros estudios de carbón utilizaron poder calorífico para determinar el rango. Esos estudios coinciden con estudios de humedad de carbón que encontraron que los carbones con mas alto rango están localizados en la parte sur de la cuenca (Damberger, 1971). Damberger sugirió que la madures térmica no es compatible con la profundidad actual de los carbones en el sur de Illinois y que el incremento de rango hacia el sur probablemente se debió a que el enterramiento era mayor, dicha sección sedimentaria adicional fue removida posteriormente por la erosión. Damberger (1971) también propuso que el incremento de flujo de calor a partir de una posible intrusión plutónica en esa parte de la CI contribuyo al aumento del rango del carbón. Hower & Rimmer (1990a) encontraron que en algunos sectores de la CI en Kentucky, no hay correlación entre la reflectancia y la profundidad relativa y sugirieron que la actividad hidrotermal fue parte del metamorfismo.

Mas recientemente, Hower & Gayer (2002) y Rowan *et al.* (2002) utilizaron RV como base para sugerir que el flujo de fluidos podría explicar la inconsistencias en la madures del carbón. Especificamente, Hower & Gayer indicaron que la falta de incremento del rango con la profundidad sugiere que el enterramiento por si solo no es el principal control del metamorfismo y que fluidos hidrotermales podrían ser los responsables por esos cambios. Ellos sugirieron que evidencia adicional del mecanismo hidrotermal esta en la asociación entre el aumento del rango y los sulfuros en las mineralizaciones típicas del Valle del Misisipi (MVT). Dicha mineralización se atribuye a fluidos recargados topográficamente en el cinturón orogénico Ouachita. Rowan *et al.* (2002) Utilizo modelos numéricos para demostrar que ni el enterramiento o el flujo de fluido por si solos podrían proveer la temperatura necesaria que explique los valores de RV e inclusiones de fluidos a través de la CI. Ellos concluyeron que al adicionar la profundidad de enterramiento y el efecto de los fluidos se podría elevar la temperatura lo suficiente para explicar la actual madurez de la CI.

## MARCO GEOLOGICO

La CI es una cuenca cratonica que cubre la mayor parte del Estado de Illinois, SW Indiana y W Kentucky (FIGURA 1). Inicialmente la cuenca se desarrollo sobre un rift Precámbrico que no evoluciono (Kolata & Nelson, 1991). Durante el Paleozoico, la cuenca estuvo bajo subsidencia episódica y posteriormente fue expuesta a la erosión. Como resultado, se desarrollaron cuatro secuencias sedimentarias mayores, separadas por cinco grandes discordancias (FIGURE 2; Sloss, 1963). Desde el Ordovícico medio hasta el Misisipiano medio se depositaron carbonatos marinos de aguas superficiales que fueron cubiertos por areniscas fluviales en ciclos múltiples. Los carbonatos Misisipianos y las areniscas son más gruesos en la parte sur de la cuenca que en la parte norte (Kolata & Nelson, 1991). Hacia la parte centro-norte de la cuenca, las rocas Misisipianas fueron erosionadas y cubiertas de una manera discordante por rocas Pensilvanianas; el contacto entre el Misisipiano y el Pensilvaniano es la Discordancia sub-Absaroka (Willman et al., 1975).

Durante el Pensilvaniano, se desarrollo un sistema deltaico amplio que cubría varias cuencas interiores en el Medio Oeste. Algunas de las areniscas del Pensilvaniano inferior son acuíferos que se extendieron hacia el norte con buena continuidad y que contienen algunas unidades conglomeraticas (Willman *et al.*, 1975). Cambios del nivel de mar de corta duración dieron lugar a secuencias cíclicas o ciclotemas que incluyen carbonos. En la CI alrededor de 119.800 Km.<sup>2</sup> están subyacidos por carbonos que hacen parte del sistema Pensilvaniano. La CI contiene muchos carbonos de los cuales 20 han sido explotados (FIGURA 2), pero la mayor parte de la producción proviene de los mantos Herrin y Springfield que son altos en volátiles.

La CI experimento una deformación estructural generalizada desde el Misisipiano tardío hasta el Pérmico temprano durante el ensamble del supercontinente Pangea. El esfuerzo compresional de las Orogenias Ouachita y Alleghenian se transmitió al interior del continente, reactivando fallas e incrementando las ratas de subsidencia (Kolata & Nelson, 1991; Marshak *et al.*, 2003). Durante el Pérmico, la actividad intrusiva en la cuenca parece haber generado un sistema hidrotermal relacionado con el Distrito Fluorspar, dicho distrito esta localizado

hacia el límite entre Illinois y Kentucky al sur de la cuenca, adyacente a la zona de carbonos con rango anómalo (Kolata & Nelson, 1994). Se ha determinado, con métodos de Nd-Sm, que la mineralización en el Distrito Fluorspar ocurrió durante el Pérmico Medio ( $272 \pm 17$  MA) (Chesley *et al.*, 1994). Posteriormente el Arco de Pascola se levanto en el extremo sur de la CI, entre los periodos post-Pensilvaniano y pre-Cretácico tardío, y produjo la presente geometría de la cuenca. Durante el Mesozoico, la ruptura de Pangea genero esfuerzos tensionales lo que nuevamente reactivo las fallas dentro del sistema compuesto de Cottage Grove-Rough Creek (Kolata & Nelson, 1991).

## METODOLOGIA

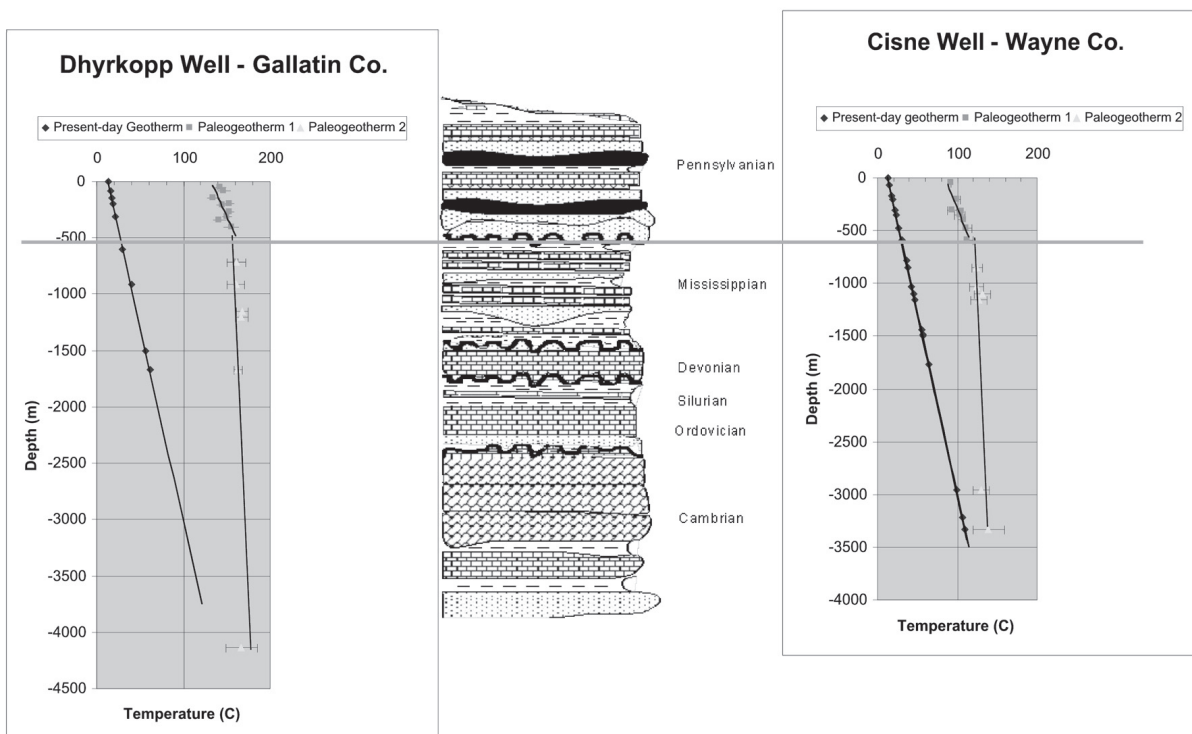
Para confirmar la existencia de la inflexión y su relación con las diferentes hipótesis sobre carbonificación en la CI, se adelanto un estudio en 3 partes: (1) Se caracterizo la arquitectura paleotérmica en tres dimensiones de la CI utilizando RV; (2) Se caracterizo la migración de los paleofluidos a escala regional utilizando conodontes, análisis petrográfico catodoluminiscente, y estudios de inclusiones de fluidos; (3) Se modelo la CI con el programa *Basin2* para replicar la arquitectura paleotérmica.

En la primera parte del estudio se completo un modelo hidrotermal 3D de la CI, para esto se utilizo la RV existente de pozos profundos (TABLA 1 y FIGURA 1), geotermas actuales, registros de pozos, y registros de porosidad y permeabilidad. 60 muestras adicionales para VR se recogieron en pozos profundos al sur de la cuenca. Por cada pozo, la geoterma actual y la paleogeoterma se graficaron simultáneamente (FIGURA 2). Las paleogeotermas o perfiles de paleotemperatura se obtuvieron al convertir los valores de VR a paleotemperatura de acuerdo al modelo de Barker & Pawlewicz (1986).

21 muestras de conodontes se obtuvieron de las calizas localizadas abajo y arriba de la inflexión. Las calizas fueron disueltas en soluciones con ácidos a fin de obtener los diminutos fósiles. Los índices de alteración de los conodontes (CAI) y el aspecto de la superficie de los mismos se utilizaron para determinar las máximas temperaturas que afectaron dichos fósiles según el método de Epstein *et al.* (1977).

**TABLA 1.** Valores de profundidad, reflectancia de la vitrinita, paleotemperatura (°C) y desviación estándar de los valores de temperatura en los Pozos Dhyrkopp y Cisne.

Pozo Dhyrkopp				Pozo Cisne			
Pro.(m)	Ref.Vitri.	PaleoTem.	Desv.St	Pro.(m)	Ref.Vitri.	PaleoTem.	Desv.St
51.8	0.95	142.6	6.1	73.1	0.45	64.9	3.8
79.2	0.99	146.9	6.9	167.6	0.49	73.8	3.6
149.3	0.88	134.7	7.2	301.7	0.57	89.5	6.2
201.1	1.05	153.0	5.6	356.6	0.54	83.9	5.0
207.2	0.97	144.8	6.9	472.4	0.56	87.6	5.2
268.2	1.05	153.0	5.2	588.2	0.58	91.3	5.4
313.9	1.02	150.0	5.7	783.3	0.62	98.2	5.8
344.4	0.94	141.5	7.3	853.4	0.67	106.3	5.3
405.3	1.07	155.0	8.2	1028.7	0.68	107.8	7.5
713.2	1.13	160.7	10.6	1155.1	0.65	103.1	8.2
917.4	1.13	160.7	9.8	1443.2	0.69	109.4	8.7
1152.1	1.21	167.8	6.2	1484.3	0.69	109.4	8.7
1200.9	1.2	166.9	7.0	1496.5	0.7	110.9	8.8
1670.3	1.15	162.5	4.7	1769.3	0.71	112.3	6.7
4142.2	1.2	166.9	18.0	2955.0	0.84	129.8	10.3
				3217.1	0.78	122.1	14.6
				3326.8	0.92	139.3	19.5



**FIGURA 2.** Cambios en los valores de paleotemperatura vs. Profundidad en los pozos Dhyrkopp y Cisne. Note la ubicación de la inflexión cerca de la discordancia Pensilvaniano/Misipiano.

La petrografía y la determinación de secuencias paragenéticas permitieron determinar el tiempo relativo de la formación de los componentes principales de la roca, especialmente cementos, y en esta forma, hacer correlaciones con otras zonas. Para estudios de inclusiones de fluidos (IF) se analizaron 22 secciones delgadas ( $\approx 100\mu\text{m}$ ). IF son pequeñas muestras de fluidos del subsuelo que han sido preservadas dentro del mineral, se formaron bajo condiciones de alta temperatura y posteriormente se enfriaron cuando quedaron atrapadas dentro de minerales diagenéticos. IF son la única forma de estimar la temperatura mínima al momento de la formación del mineral por medio de calentar la inclusión hasta la temperatura de homogenización (Th) en la que la burbuja es reabsorbida (Goldstein & Reynolds, 1994).

La evidencia sobre el flujo de los acuíferos se tomó de RV, conodontes, petrografía, e IF. Los valores de temperatura de los diferentes paleotermómetros se recogieron y analizaron para determinar cambios laterales y gradientes como indicadores de flujo. Se sospecha la existencia de flujos ya que las formaciones arriba y abajo de la discordancia PA/MI contienen unidades arenosas con buena porosidad (17-18%) y permeabilidad (60-196 md) para comportarse como acuíferos.

El tiempo de ocurrencia y la duración del evento termal se puede inferir a partir de la forma como el evento queda registrado en RV y en conodontes; igualmente se puede inferir de los cementos, ya que se sospechan que son contemporáneos con la carbonificación. Los cementos fueron correlacionados con los cementos dolomíticos del Distrito Fluorspar y de los distritos MVT en Missouri. La duración del evento termal se infirió a partir de las diferentes formas como son afectados los paleotermómetros. Por ejemplo, la superficie de los conodontes que están cubiertas de apatito retarda los efectos del metamorfismo termal sobre la materia orgánica, mientras que la materia orgánica en el carbón es afectada más fácilmente (Epstein, *et al.*, 1977). Otra forma como se determinó el gradiente térmico fue por medio del análisis de las paleogeotermas. Si el gradiente inferior es paralelo a la geoterma actual, este ha alcanzado un estado estable. Si el gradiente inferior es cercano a la vertical, el paleogradiente registra un estado transitorio, lo que indica un periodo de actividad corto (Bray *et al.*, 1992).

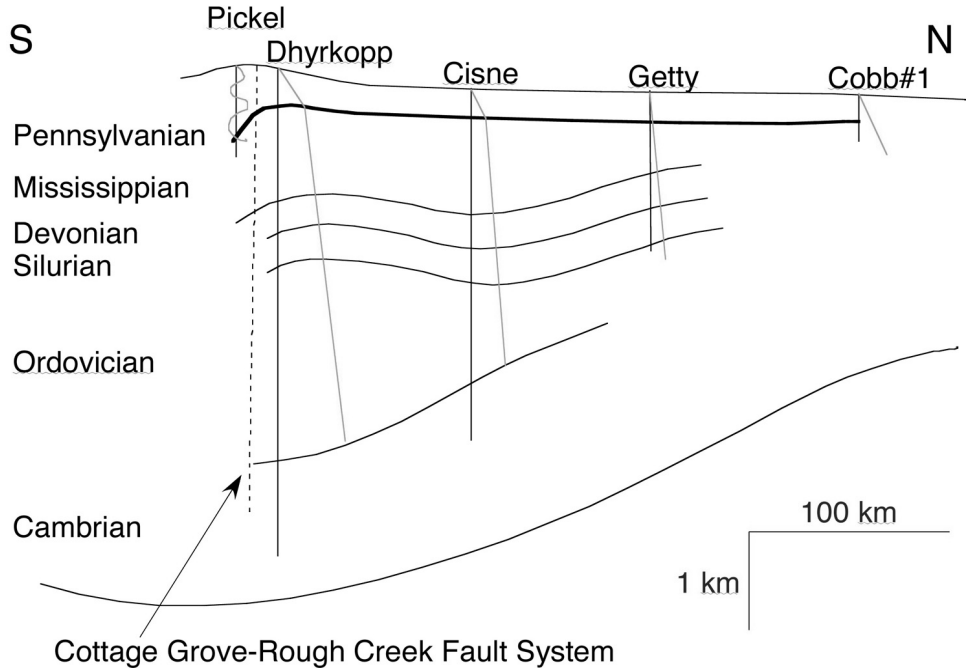
Finalmente se consideraron una serie de escenarios de posibles enterramientos y flujos para explicar la historia térmica registrada por los diferentes paleotermómetros. Esto se hizo simulando flujos, temperaturas y madures de la materia orgánica a lo largo de una sección transversal orientada S-N, en la que el carbón con el más alto rango está hacia el sur. Para las simulaciones se utilizó el programa de diferencias finitas *Basin2* (Bethke *et al.*, 1999) que maneja diferentes variables como sedimentación, compactación, levantamiento, erosión, cambios de permeabilidad y porosidad, transporte de fluido y calor, y madures de la materia orgánica.

## RESULTADOS OBTENIDOS

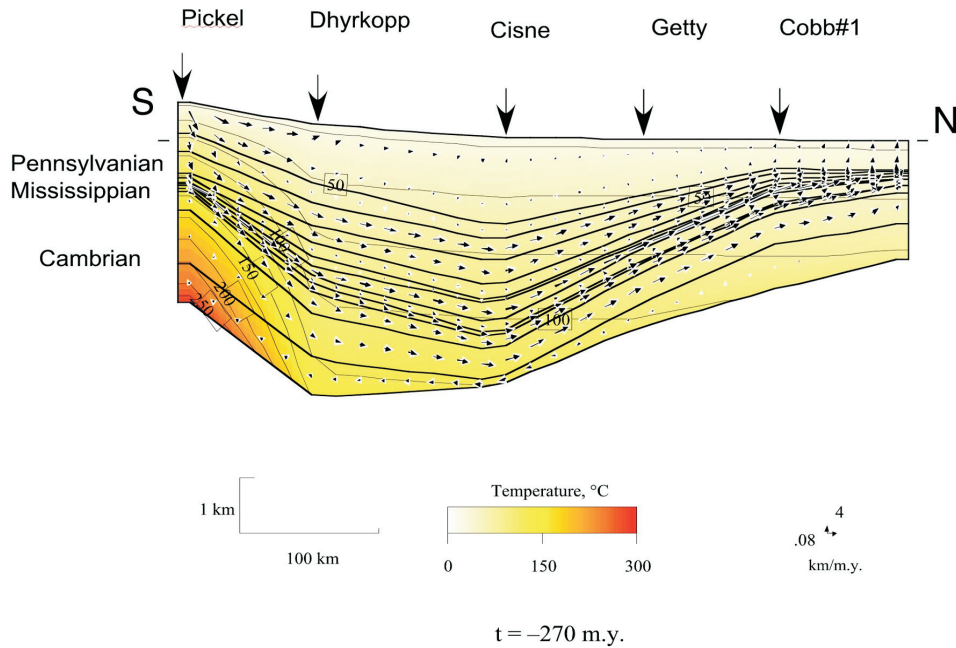
Los resultados de las paleogeotermas en la (FIGURA 3) indican que al parecer en la CI se presentan tres estilos diferentes de historia térmica. Hacia el sur, los cambios de temperatura a partir de RV vs Profundidad son tantos que no hay un patrón específico. En la parte centro-sur de la cuenca, hay una inflexión en el paleogradiente con un segmento superior con un gradiente más alto ( $60^\circ\text{C}/\text{km}$ ) y un segmento inferior con un gradiente más bajo ( $14^\circ\text{C}/\text{km}$ ; FIGURAS 2 y 3). En la parte centro-norte de la cuenca no hay inflexión, las paleogeotermas se comportan de manera normal y son paralelas a las geotermas actuales. Los cambios observados demuestran que la forma de las paleogeotermas depende de la temperatura y que cambian, junto con la disminución de la temperatura, de sur a norte.

Los índices de alteración de los colores de los conodontes (CAI) encontrados a lo largo de la sección estratigráfica fueron de 1 cerca a la superficie a 1.5+ en las calizas Misisipianas. Dichos valores se consideran normales y no representan ninguna alteración. Sin embargo, las superficies de los conodontes son irregulares con pequeños huecos y textura azucarada. Lo anterior significa que los conodontes fueron afectados solo de manera superficial.

Las inclusiones de fluidos se analizaron en venas solamente. Las venas delgadas o "cleats" en los carbones Pensylvanianos no presentan inclusiones de fluidos con fase gaseosa o burbujas que permitan hacer una lectura de temperatura de homogenización (Th); en casos como estos se considera un origen



**FIGURA 3.** Diagrama de la Cuenca de Illinois. Para ubicación de los pozos ver (FIGURA 1) Note los cambios en el paleogradiente (color más claro). Hacia el sur no hay un patrón específico. En la parte centro-sur hay una inflexión con dos gradientes. Hacia la parte centro-norte la inflexión no es evidente.



**FIGURA 4.** Modelo de un corte estratigráfico S-N de la Cuenca de Illinois durante el Periodo Pérmico en el que adicionalmente se muestran los contornos de temperatura y una fuente de calor (intrusión) localizada al sur. Se utilizó el modelo de elementos finitos *Basin2*.

meteorico con temperaturas que están por debajo de 50 °C (Goldstein & Reynolds, 1994). Las inclusiones de fluido en las venas Misisipianas reportan temperaturas de homogenización entre 61 y 99 °C. El tamaño pequeño de las inclusiones impidió hacer lecturas de descongelamiento, después de congelar la inclusión, para determinar la densidad de los fluidos y tener una idea sobre el origen de los mismos.

La FIGURA 4 presenta el modelamiento adelantado con *Basin2* con la intención de replicar las condiciones observadas a partir de los geotermómetros. Primeramente, se analizó si el calor causado por la sobrecarga de estratos era suficiente para explicar los valores de RV y temperaturas, encontrándose que no era suficiente. Posteriormente, se estableció un modelo que combinaba diferentes fuentes de calor como sobrecarga, fluidos e intrusiones. Se encontró que la actual distribución de la cuenca depende no solamente de la sobrecarga adicional, sino también de una fuente adicional de calor hacia el sur y de la presencia de unos horizontes acuíferos Carboníferos.

## DISCUSION DE RESULTADOS

El principal propósito de este estudio fue confirmar la presencia de la inflexión en el gradiente térmico y determinar si la inflexión se relaciona con las hipótesis que han tratado de explicar el rango del carbón y las anomalías en la CI.

La falta de correlación entre profundidades y temperaturas en el sur de la CI podría indicar que fluidos calientes pasaron a través de los diferentes reservorios o a través de zonas permeables relacionadas con las muchas fallas en la zona (FIGURA 3). Dichos fluidos podrían estar relacionados con intrusiones al sur de la cuenca, como el Domo Hicks, los que han sido asociados con los depósitos de minerales en el Distrito Fluorspar (MVT). El gradiente inferior, debajo de la discordancia Pensilvaniano/Misisipiano, parece indicar que los fluidos calientes fueron transitorios; debido a esto, el gradiente geotérmico inferior no se equilibra nuevamente y por lo tanto es menor que el gradiente superior. La falta de inflexión del gradiente en la parte centro-norte de la cuenca y el paralelismo con la geoterma actual, indican que la influencia térmica correspondió principalmente a la sobrecarga. Los cambios en la forma de las paleogeotermas soportan

una disminución gradual de la influencia ígnea e hidrotermal hacia el norte (FIGURAS 3 y 4).

La influencia hidrotermal en los conodontes no fue evidente en los índices de alteración del color (CAI) ya que los valores obtenidos se consideran normales y no representan ninguna alteración. Sin embargo, los cambios en la superficie de los fósiles como superficies toscas y texturas azucaradas podrían corresponder con el paso de fluidos calientes transitorios que no estuvieron presentes por el tiempo suficiente para cambiar el CAI. La presencia hidrotermal es evidente no solo por los cambios en la superficie de los conodontes, sino también por la presencia de algunas características en los cementos como carbonatos brillantes bajo luz catodolumínica y dolomita barroca. Las temperaturas de homogenización (Th) obtenidas a partir de las inclusiones de fluidos se acercan a los 100 °C, dichas temperaturas no han sido corregidas por presión; por lo que se sospecha que Th adicionales más al sur y cerca a la intrusión estén sobre 100 °C, tal como se ha encontrado en los estudios de depósitos de fluoesparita.

Del modelamiento adelantado con *Basin2*, se encontró que el calor causado por la sobrecarga de estratos es insuficiente para explicar los valores de RV y temperaturas; por lo que se adicionó una fuente de calor que representa la intrusión. Los cálculos muestran que la distribución de temperatura dentro de la cuenca depende en buena parte de la recarga y permeabilidad de los acuíferos estratigráficos del Carbonífero, de la sobrecarga adicional y de la presencia de una fuente adicional de calor (intrusión) hacia el sur (Figure 4). Los resultados están de acuerdo con los encontrados por Hower *et al.* (1990) quienes encontraron que hacia la parte sur no hay relación entre la profundidad y la VR y con los de Rowan *et al.* (2002) en el sentido que no solamente la profundidad de enterramiento influyó la carbonificación.

Este estudio se enfocó en encontrar evidencia, en los registros de pozos, de los efectos de un sistema hidrotermal sobre los carbones y rocas adyacentes. Aunque el muestreo fue limitado por la escasez de corazones en las rocas carboníferas, y aunque las temperaturas son relativamente bajas, los resultados soportan la hipótesis de que fluidos se desplazaron a través de acuíferos Pensilvanianos y Misisipianos superiores como parte de un sistema hidrotermal de baja tem-



peratura e incrementaron la maduración térmica del carbón, desplazando los hidrocarburos y generando la inflexión(es) en las paleogeotermas.

## AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo económico del Departamento de Geología de la Universidad de Illinois UIUC, del Leighton Award 2005 y 2006, y de AAPG a través del Richard Beardsley Research Grant 2006.

Se agradece el apoyo técnico de Bruce Fouke (UIUC) con la petrografía; el soporte técnico y la información proveída por los geólogos del Servicio Geológico de Illinois: David Morse, Ilham Demir, Bob Mumm, Joan Crocket, John Nelson y Christopher Korose; Rodney Norby ayudo generosamente con la preparación y lectura de los conodontes. Maria Mastalerz del Servicio Geológico de Indiana ayudo con la reflectancia de la vitrinita.

## REFERENCIAS

- Barker, C.E., and Pawlewicz, M.J. (1986). The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic kerogen: Springer Verlag, New York. 16p.
- Bray, R.J., Green, P.F, and Duddy, I.R. (1992). Thermal history reconstruction using apatite fission track analysis and vitrinite reflectance: a case study from The UK East Midlands and Southern North Sea. (in) Hardman, R.F.P. (Ed), Exploration Britain.
- Bethke, C.M., Lee, M.K., Park, J. (1999). Basin modeling with Basin2 Release 4. University of Illinois Urbana-Champaign. 205 p.
- Bethke C.M. (1986a). Hydrologic constrains on the genesis of the Upper Mississippi Valley mineral district from Illinois Basin brines: *Economic Geology*, Vol. 81, pp. 233-249.
- Chesley, J.T., Halliday, A.N., Kyser, T.K., Spry, P.G. (1994). Direct dating of Mississippi Valley-type mineralization-use of Sm-Nd in fluorite: *Economic Geology*, Vol.89, pp.1192-1199.
- Cluff, R.M., and Byrnes, A.P. (1991). Lopatin analysis of maturation and petroleum generation in the Illinois Basin, in: Interior Cratonic Basins. Editors. Leighton, M.W., Koala D.R., Oltz D.F., and Eidel J.J. Interior cratonic basins. AAPG Memoir 51, 819 p.
- Damberger, H.N. (1971). Coalification patterns of the Illinois Basin: *Economic Geology*, vol.66 N.3 pp. 488-494.
- Daniels, E. J. (1991). Nature and origin of minerals in anthracite from eastern Pennsylvania [PhD] thesis], University of Illinois Urbana-Champaign, 129 p.
- Epstein, A., Epstein, J.B., Harris, L. (1977) Conodont color alteration - an index to organic methamorphism. USGS Professional paper 995.
- Gayer, R.A., Fowler, P. (1999). The association between tectonic deformation, inorganic composition and coal rank in the bituminous coals from the South Wales coalfield, United Kingdom. *International Journal of Coal Geology*, Vol.42, N°1, pp. 1-31.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T.J. (1994). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals SEPM Short Course, Society of Sedimentary Geology, Tulsa, OK. Vol.31, 199 p.
- Hower, J.C., Rimmer, S.M., Williams, D.A., Beard, J.G. (1990a). Coal rank trends in the western Kentucky coalfield and relations to hydrocarbon occurrence. In: Nuccio, V.T., Barker, C.E. (Eds.), Applications of thermal maturity studies to energy exploration. Rocky Mountain Section, Society of Economic Paleontologist and Mineralogist, Los Angeles, CA, pp.127-138.
- Hower, J.C., and Gayer, R.A. (2002). Mechanism of coal metamorphism: case studies from Paleozoic coalfields. *International journal of coal geology* 50, pp. 215-245.
- Marshak, S., Nelson, W.J., McBride, J.H. (2003). Phanerozoic strike-slip faulting in the continental interior platform of the United States: examples from the Laramide Orogen, Midcontinent, and ancestral Rocky Mountains: in Storty, F., Holdsworth, R.E., Salvini, F. (Eds) Intraplate Strike-Slip Deformation Belts. Geological Society, London, Special publications, 210, pp. 159-184.
- Kolata, D.R. and Nelson, W.J. (1991). Tectonic history of the IB P. 263-283. In: Interior Cratonic Basins. Editors. Leighton, M.W., Koala D.R., Oltz D.F., and Eidel J.J. Interior cratonic basins. AAPG Memoir 51, 819 p.
- Rowan E. L., Goldhaber, M. B., and Hatch, J.R. (2002). Regional fluid as a factor in the thermal history of the Illinois Basin: Constrains from fluid inclusions and the maturity of Pennsylvanian coals. *AAPG Bulletin*, Vol. 86, N° 2 (February 2002), pp. 257-277.
- Sloss, L.L. (1963). Sequences in the cratonic interior of North America: *Geological Society of America Bulletin*, 74, pp. 93-114.
- Uysal, I.T., Glikson, M., Golding, S.D., Audsley, F. (2002). The thermal history of the Bowen Basin, Queensland, Australia: Vitrinite reflectance and clay mineralogy of Late Permian coal measures. *Tectonophysics* 323, pp.105-129.
- Willman, H.B., E. Atherton, T.C. Buschbach, C. Collinson, J.C. Frye, M.E. Hopkins, J.A. Lineback, J.A., and Simon J.A. (1975) *Handbook of Illinois stratigraphy: Illinois State Geological Survey Bulletin* 95, 261p.

---

Trabajo recibido: febrero 13 de 2007

Trabajo aceptado: mayo 29 de 2007