

## EVALUACION GEOQUIMICA DEL EFECTO DEL AGUA CALIENTE SOBRE UNA FORMACION NO CONSOLIDADA

F. VILLEGAS Y W. KUBACKI  
División de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad del Zulia  
Maracaibo, Venezuela

### RESUMEN

La Faja Petrolífera del Orinoco es la acumulación conocida de crudos pesados más grandes del mundo. Cubre un área de 54,000 kilómetros cuadrados y contiene aproximadamente  $1.2 \times 10^{12}$  Bbls POES. El objetivo de este estudio consistió en realizar una inyección de agua caliente a muestras restauradas de núcleos, en las arenas no consolidadas del área de Cerro Negro de la FPO de la Cuenca Oriental de Venezuela a objeto de determinar el efecto de la inyección térmica sobre las características geoquímicas de las muestras. Se realizaron una serie de análisis petrofísicos antes y después de la inyección de agua caliente con el propósito de encontrar una interpretación adecuada a los resultados obtenidos. Tales análisis fueron: permeabilidad y porosidad, Capacidad del Intercambio Catiónico, análisis mineralógico por difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, SEM y análisis del efluente (solamente después de la inyección de agua caliente). Los análisis experimentales demostraron una reducción en los parámetros petrofísicos, sin observarse neoformación mineralógica, y evidenciaron la reacción geoquímica de las arenas no consolidadas de esta área frente a una inyección de agua caliente.

### ABSTRACT

Orinoco Petroleum Belt is the largest heavy oil accumulation known in the world; it covers an area of 54,000 square kilometers and it has  $1.2 \times 10^{12}$  Bbls of petroleum in situ. The purpose of this study consisted in the injection of hot water on resaturated core samples of unconsolidated sands of the Cerro Negro Area of the Orinoco Petroleum Belt in the East Venezuelan Basin. In order to have a suitable interpretation of the final results, several petrofisic analysis were carried on, before and after the hot water injection. These analysis included: permeability and porosity, Cation Exchange Capacity, CEC, scanning electron microscopy, SEM and effluent ions analysis. The experimental analysis demonstrated a reduction in petrofisic parameters, without observed mineralogical neoformations, but with a geochemical reaction of the unconsolidated sands of this area in presence of hot water injection.

### DESCRIPCION DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA INYECCION DE AGUACALIENTE

El equipo utilizado para la inyección de agua caliente consta de las siguientes partes:

Un porta-muestras con revestimiento de plomo, donde se colocó la muestra que iba a ser sometida al proceso de inyección de agua caliente. A la muestra se le aplicó la presión de sobrecarga equivalente a la carga geostática que soportaba cuando estuvo en el subsuelo.

En la cara anterior del porta-muestras se conectó la línea que permitía el desplazamiento de agua, que era empujada con una bomba dosificadora del caudal.

El calentamiento del agua se efectuó por el paso a través de un serpentín colocado dentro de una fuente de calor, donde la temperatura fue controlada por termocuplas.

En la cara posterior del porta-muestras se colocó una válvula reguladora de presión, previamente calibrada, que permitía la salida del efluente cuando la presión de inyección alcanzaba el valor de 250 Lpc (ver fig. 3).

### METODOLOGIA

#### SELECCION DE MUESTRAS.

Fueron seleccionados seis grupos de tres muestras cada uno, de 1 pulgada de diámetro y 1.5 pulgadas de longitud, en un arreglo triangular.

Dos grupos obtenidos del Miembro Yabo-Jobo y los cuatro restantes del Miembro Morichal, todos pertenecientes a la Formación Oficina, edad Mioceno, de la Cuenca Oriental de Venezuela.

#### POROSIDAD

Para determinar este parámetro petrofísico se utilizó el porosímetro de Boyle, que emplea el principio de expansión de los gases o Ley de Boyle, considerándose solamente el volumen poroso interconectado.

## PERMEABILIDAD

Se usó el permeámetro de gas, adaptado a la Ley de Darcy, tomándose en consideración en efecto de deslizamiento de las moléculas de gas dentro del espacio poroso, conocido como "Efecto de Klinkenberg".

## CAPACIDAD DEL INTERCAMBIO DE CATIONES

Se hizo uso del método de titulación conductométrica y los resultados de este análisis se expresan por  $Q_v$ , que es la Capacidad del Intercambio Catiónico en miliequivalencias por mililitro de volumen poroso y la densidad de granos de la roca.

## ANALISIS DE EFLUENTES

Se efectuó la determinación de los iones  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  (por el método de titulación con la solución EDTA,  $a^{B^+}$  y  $SiO_2$  (por el método de titulación de molybdato de amonio).

## MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO

Fue utilizada la fracción de finos menores de 2 micrones, usándose un baño de oro-paladio por pulverización catódica. Los puntos de interés fueron fotografiados con ampliaciones de 500x, 2000x y 3500x.

## ANALISIS MINERALOGICO POR DIFRACCION DE RAYOS X

Se usó la fracción de granos finos menores de 2 micrones, utilizándose el difractor de marca Philips, model PW 1390, con las siguientes características energéticas: radiación  $CuK\alpha$  bajo 35 mA y 40 kV.

## DISCUSION DE RESULTADOS

### POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

Después de la inyección de agua caliente, se observó en general, una disminución drástica en los valores de permeabilidad, en contraposición con una leve disminución en los valores de porosidad.

Este fenómeno se presume que sea resultado del arrastre de partículas, desprendidas por la disolución del cemento de los granos, debido al flujo de agua caliente.

## CAPACIDAD DEL INTERCAMBIO DE CATIONES

El efecto del agua caliente sobre las muestras sugiere que hubo una porción de arcilla conglomerada y no activa para el intercambio catiónico en condiciones iniciales. Después de la inyección de agua caliente estos conglomerados fueron destruidos y la caolinita aumentó la cantidad de partículas (ver Tablas No. 2 y 3).

## ANALISIS DE EFLUENTE

Se tomó en consideración que dentro de los cálculos del balance de masa la aparición de iones  $Al^{3+}$  se debe a la disolución de caolinita y en general a los aluminosilicatos, la aparición de iones  $Mg^{2+}$  se debe a la disolución de carbonatos y los de  $SiO_2$  corresponde a la disolución del cemento entre granos o los aluminosilicatos de tipo arcilloso.

La mayor cantidad de carbonatos disueltos correspondió a las muestras No. 5 y 11; esto se debe al pH ácido del fluido caliente inyectado. El mayor porcentaje de sílice disuelta correspondió a la muestra No. 7, debido a que el agua caliente más alcalina disuelve preferencialmente la sílice.

La mayor cantidad de  $Al^{3+}$  disuelto se encontró en la muestra No. 14, por la existencia de material amorfo, mayormente arcilloso. En las muestras No. 7 y 11 se halló el mayor contenido de Mg, correspondiente este resultado a una mayor abundancia de clorita.

## MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO

En la inspección visual de las microfotografías de las muestras obtenidas antes y después de la inyección de agua caliente se observó una reducción del tamaño de grano después de la inyección, notándose que esto coincide con las muestras que presentaron mayor concentración de partículas en los efluentes (ver fig. No. 2).

## DIFRACCION DE RAYOS X

En los resultados de todas las muestras, después de la inyección del agua caliente, se observó un incremento sustancial de caolinita y una disminución de cuarzo; además aparecen otros tipos de aluminio-silicatos que no fueron identificados en condiciones iniciales, debido a que se encontraban enmascarados dentro de los paquetes de caolinita (ver Tabla No. 4).

En la Tabla No. 4 se encuentran los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X de las muestras, comparándolas antes y después de la inyección de agua caliente, al utilizar las partículas de tamaño menor de 2 micrones.

T A B L A No. 1

CONDICIONES EXPERIMENTALES DE LA INYECCION DE AGUA CALIENTE

Miembro	No. de Muestra	Tiempo (días)	Caudal (cc/hr)	Presión de sobre carga (LPC)	Presión de Flujo (LPC)	Temperatura (°F)	pH
Yabo/Jobo	3	7	12.5	2953	250	300.	6.0
Yabo/Jobo	5	7	12.5	3005	250	300.	7.0
Morichal	7	7	12.5	3054	250	300.	9.0
Morichal	8	5	12.5	3241	250	300.	9.0
Morichal	11	7	12.5	3280	250	300.	9.5
Morichal	14	5	12.5	3319	250	300.	9.5

T A B L A No. 2

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES  
(ANTES DE LA INYECCION DE AGUA CALIENTE)

Miembro	Prof.	No. de Muestra	Densidad de Granos(gms/cc)	CV (meq/Vl.yp)
Yabo/Jobo	2953'	Tope 3	2.61	0.365
Yabo/Jobo	3005'10"	Tope 5	2.60	1.216
Morichal	3054'9"	Tope 7	2.62	0.346
Morichal	3241'1"	Tope 8	2.60	0.174
Morichal	3280'10"	Tope 11	2.61	0.291
Morichal	3319'1"	Tope 14	2.65	0.109

T A B L A No. 3

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES  
(DESPUES DE LA INYECCION DE AGUA CALIENTE)

Miembro	Prof.	No. de Muestra	Densidad de Granos(gms/cc)	Dv (meq/ml.vp)
Yabo/Jobo	2953'	Tope 3	2.61	0.080
Yabo/Jobo	3005'10"	Tope 5	2.60	0.605
Morichal	3054'9"	Tope 7	2.62	0.281
Morichal	3241'1"	Tope 8	2.60	0.142
Morichal	3280'10"	Tope 11	2.61	0.243
Morichal	3319'1"	Tope 14	2.65	0.096
Yabo/Jobo	2953'	Base 3	2.61	0.092
Yabo/Jobo	3005'10"	Base 5	2.60	0.919
Morichal	3054'9"	Base 7	2.62	0.316
Morichal	3241'1"	Base 8	2.60	0.163
Morichal	3280'10"	Base 11	2.61	0.246
Morichal	3319'1"	Base 14	2.65	0.099

Yabo/Jobo	2953'	Base 3	2.61	0.708
Yabo/Jobo	3005'10"	Base 5	2.60	1.234
Morichal	3054'9"	Base 7	2.62	0.354
Morichal	3241'1"	Base 8	2.60	0.197
Morichal	3280'10"	Base 11	2.61	0.434
Morichal	3319'1"	Base 14	2.65	0.115

T A B L A No. 4

ANÁLISIS MINERALÓGICO. COMPARACION DE RESULTADOS  
ANTES Y DESPUES DE LA INYECCION DE AGUA CALIENTE

Miembro	No. de Muestra	Prof. (Pies)	% Cuarzo	% Calcita	% Plagioclasa	% Clorita	% Essecita	Símorfo
Yabo/Jobo	34.C	2953	94.0	5.0	—	—	—	1.0
	30.C	2953	75.2	32.0	2.1	1.7	3.0	36.6
Yabo/Jobo	54.C	3005.83	79.4	14.5	—	2.3	Traxas	3.6
	52.C	3005.83	39.7	39.0	—	5.4	4.0	9.6
Morichal	74.C	3054.75	81.0	18.0	—	Traxas	—	0.8
	70.C	3054.75	30.0	55.0	2.0	2.7	4.5	15.0
Morichal	84.C	3241.04	94.0	5.0	—	Traxas	—	0.8
	80.C	3241.04	18.0	47.3	—	2.5	2.7	27.0
Morichal	114.C	3280.83	94.0	4.3	—	Traxas	—	1.5
	110.C	3280.82	65.0	14.7	2.1	1.2	4.0	13.0
Morichal	144.C	3319.08	94.0	4.4	—	Traxas	Traxas	0.9
	140.C	3319.50	53.5	17.2	3.2	4.1	5.0	17.0

A.V.: Antes de la Inyección de Agua Caliente  
D.V.: Después de la Inyección de Agua Caliente

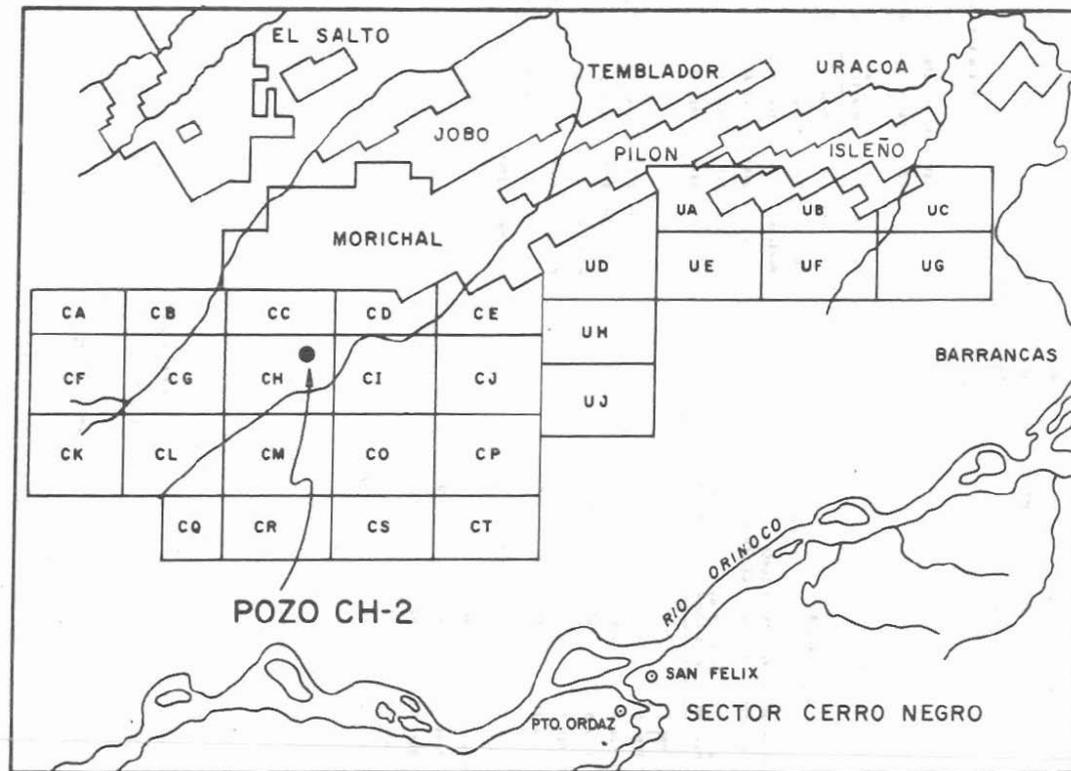
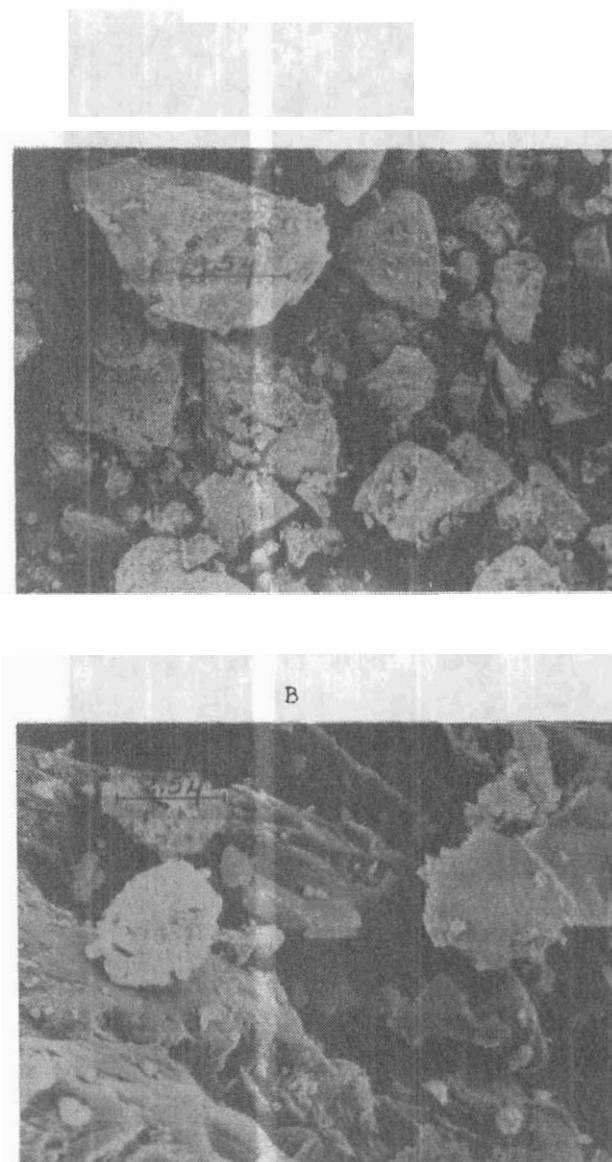


Fig. 1.- Plano de ubicación Pozo CH-2

**FIGURA N° 2**

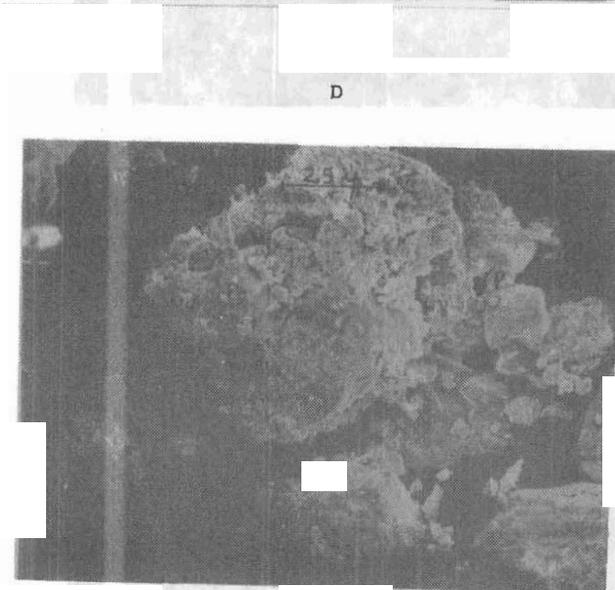
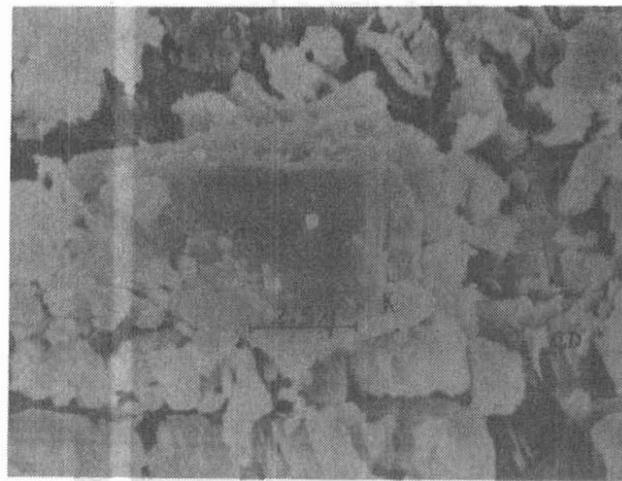
**FOTOGRAFÍAS DE LA MUESTRA N° 7 (profundidad 3054'9") BAJO MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO**



**Condiciones Iniciales:**

- A. Se observan granos de cuarzo sub-angulares recubiertos por material detrítico.
- B. Detalle de parte de la muestra, demostrando el material detrítico que recubre los granos de cuarzo y se encuentra inserto en los poros.

Fig. 2



**Condiciones finales:**

- C. Se nota un paquete de caolinita (K) con escasos finos recubriendo su superficie; además, zonalmente y de forma ocasional, se pueden apreciar cristales distorciónados (C,D) por la temperatura.
- D. Se observan granos de cuarzo con menor angularidad que antes de la inyección, además de que las cavernas (poros=P) se encuentran más despejadas.

## CONCLUSIONES

1. A la temperatura de 300-F, no se presentaron neoformaciones, solo hubo disolución del cemento de los granos; esto fue confirmado con los análisis posteriores a la inyección de agua caliente.
2. La alta reducción de permeabilidad, comparada con la baja variación de porosidad después de la inyección de agua caliente, se debe a la acumulación de partículas arrastradas por el flujo en la base de la muestra.
3. La solubilidad del cuarzo depende de la temperatura de inyección de agua caliente, calidad de cuarzo (pureza) y del pH del fluido.
4. Después de la inyección del agua caliente, los granos de cuarzo presentaron angularidad debido a la disolución del cemento que rodea los granos.
5. En los resultados de difracción de rayos X, después de la inyección de agua caliente, la presencia de minerales que no fueron detectados antes de la inyección se debe al enmascaramiento de estos minerales por la caolinita.
6. El agua caliente más alcalina disuelve preferencialmente la sílice  $\text{SiO}_2$ ; el agua caliente ácida disuelve los carbonatos, por lo tanto el pH óptimo para minimizar daño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) BUCKLEY, S.E. AND LEVERETT, M.C.: Mechanism of Fluid Displacement in Sands. Trans. AIME (1942), 146, 107-116.
- 2) VAN HEININGEN, J. AND SCHWARZ, N.: Recovery increased by Thermal Drive, Proc. Fourth World Ccong., Roma (1955), Sec. II 299..
- 3) CROES, G.A. AND SCHWARZ, N.: Dimensionally scaled Experiments and Theories and Water-Drive Process. Trans. AIME (1955), 204, 35-42.
- 4) JORDAN, J.K., RAYNE, J.R. AND MARSHALL, S.W. III: A Calculation Procedure for Estimating the Production History During Hot Water Injection in Linear Reservoirs. Presented at the Technical Conf. on Petroleum Production. Pennsylvania State University, University Park, May 9-10, 1957.
- 5) FOURNIER, K.P.: A numerical Method for computing Recovery of Oil by Hot Water Injection in a Radial System. Trans. AIME, 234, (1965).
- 6) DIETZ, D.N.: Hot Water Drive. Proc. Seventh World Pet., Congress. Ciudad de México (1967), 3, 451-457.
- 7) SPILLETE, A.G. AND NIELSEN, R.L.: Two Dimensional Method for Predicting Hot Waterflood Recovery Behavior. SPE Paper No. 1895 presented at the 42-d Annual Meeting of the Soc. Pet. Eng., Houston, Texas, October (1957).
- 8) POSTON, S.W., YSRAEL, S.C., HASSAIN, A.K.M.S., MONTGOMERY, E.F. III AND RAMEY, H.J. Jr.: Effect of Temperature on Irreducible Water Saturation and Relative Permeability of Unconsolidated Sands. Soc. Pet. Eng. Jr., June (1970), 171-180; Trans. AIME, 249.
- 9) WILLIAM, A.A., ROMERY, H.J. Jr and MARSDEN, S.S. Jr: Effect of Temperature Level Upon Capillary Pressure Curves. Soc. Pet. Eng. Jr, March (1971), 13-22.
- 10) SOCORRO, J.B. AND REID, T.B.: Technical Analysis of Cicle Hot Water Stimulation-Morichal Field, Venezuela. Presented at III Jornadas Técnicas, Maracaibo 14-16 Octubre (1971).

Recibido el 9 de Noviembre de 1989  
En forma revisada el 28 de Mayo de 1990

