



Agenda

- Generalidades
 - Qué son los Reservorios no-convencionales
 - Importancia de los reservorios *Shale*
 - Aspectos básicos de la evaluación de reservorios *Shale* - Análogos
- Evaluación Petrofísica
 - Adquisición de datos en Laboratorio
 - Evaluación petrofísica de reservorios *Shale*

Características del Reservoirio *Shale* - Resumen

- Lutitas de grano muy fino, con alto contenido de materia orgánica y gran variabilidad mineralógica.
- Se comporta como roca madre, reservorio y sello.
- Tres mecanismos de almacenamiento de gas: compresión, adsorción y solución.
- A menudo son reservorios sobre-presionados
- La producción está relacionada con las características petrofísicas y con el fracturamiento hidráulico.
- Generalmente no producen agua de formación.

Objetivos del Análisis de Coronas

FUNDACIÓN
YPF

- Adquisición de datos específicos para el tipo de litología
- Volumen y composición del gas en el pozo
- Determinación de las propiedades de la roca
 - Descripción y orientación de fracturas
 - Petrografía inorgánica
 - Petrografía orgánica
 - Propiedades petrofísicas
 - Capacidad de almacenamiento de gas adsorbido
- Propiedades Mecánicas de las rocas
- Análisis de daño de formación

4

Programa típico de análisis de coronas en *Shale*

FUNDACIÓN
YPF

- Volumen y composición del gas en el pozo
- Carbono Orgánico Total
- Pirolisis
- Reflectancia a la vitrinita
- Porosidad, Saturación, Permeabilidad
- Difracción de Rayos-X
- Propiedades mecánicas de las rocas
- Sensibilidad de fluidos
- Rayos Gamma de Coronas
- Tomografía
- Preparación y descripción
- Fotografía digital
- Descripción de fracturas naturales
- Descripción de secciones delgadas
- Microscopía electrónica de barrido

5

Consideraciones operativas

FUNDACIÓN
YPF

- Respetar los protocolos de preservación de las muestras
- Por lo menos preservar 30 cm de corona adyacente a la muestra de *canister*
- Usar barreras térmicas antes de el recubrimiento con parafina
- Los intervalos no preservados mantenerlos en las vainas con tapas y puntas selladas.
- Minimizar el tiempo de manejo de la corona.



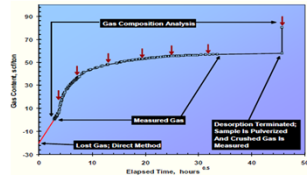
6

Mediciones de Gas

Mediciones de volumen de gas

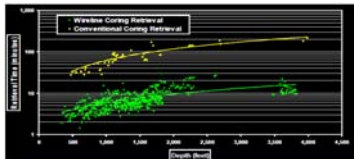
$$G_{c-ad} = 32.0368 \frac{V_l + V_m + V_c}{m_{ad}}$$

- G_{c-ad} Contenido de gas, scf/ton
- V_l Volumen de gas perdido, cm³
- V_m Volumen de gas medido, cm³
- V_c Volumen de gas triturado, cm³
- m_{ad} Masa, g



Mediciones de volumen de gas

- Inicialmente, inmediatamente después de cerrar los *canisters*, es crítico medir rápidamente y a intervalos cortos, el gas que emana de la corona.
- El volumen de gas medido en los tiempos iniciales se usa para calcular el gas perdido en el viaje de la corona, desde el fondo del pozo hasta superficie.



Mediciones de volumen de gas

- Provee una medición empírica directa de todo el gas libre, adsorbido y absorbido.
- El gas recuperado puede ser utilizado para cromatografía
- La composición del gas provee información para la interpretación adecuada de la isothermas de adsorción.
- La velocidad de recuperación de gas da una idea de la difusividad.



Mediciones en Roca

Mineralogía

- Difracción de Rayos-X (XRD)
- Fluorescencia de Rayos-X (XRF)
- Espectroscopia Infrarroja (FTIR)
- Microscopio electrónico

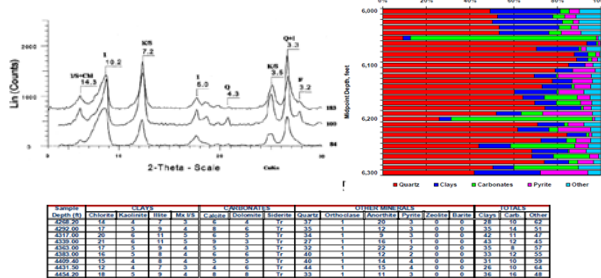
Difracción de Rayos-X

- Se caracteriza la difracción de Rayos-X en un arreglo de átomos tridimensional que tiene dimensiones estructurales periódicas del mismo orden de la longitud de onda de los rayos-x.
- Los Rayos-X son una radiación electromagnética con longitudes de onda de 10^{-8} a 10^{-11} m.

Difracción de Rayos-X

- Composición mineral de la roca total
- Abundancia relativa de minerales de *Clay*
- Porcentaje de capas de esmectita en arcillas estratificadas illita-esmectita (arcilla expandibles)
- Potenciales problemas de sensibilidad de las arcillas a los fluidos
- Minerales problemáticos que afectan a la densidad de grano. (Ricos en Hierro: Pirita, Clorita, etc.)
- Se debe suplementar con otras técnicas (Secciones delgadas, SEM, etc.)

Difracción de Rayos-X



Difracción de Rayos-X

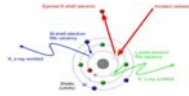
- Densidad de matriz a partir de los datos de difracción de Rayos-X

$$\rho_{mat} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{\rho_i}}$$

16

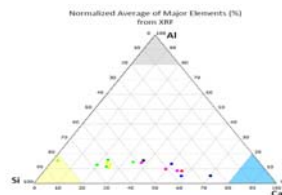
Fluorescencia de Rayos-X (XRF)

- Un haz de Rayos-X produce un desplazamiento de los electrones de los elementos, de una órbita a otra, liberando un pulso de energía que es característico de cada elemento.



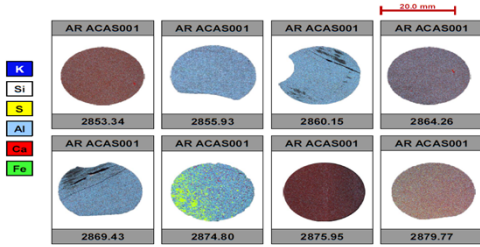
17

Fluorescencia de Rayos-X (XRF)

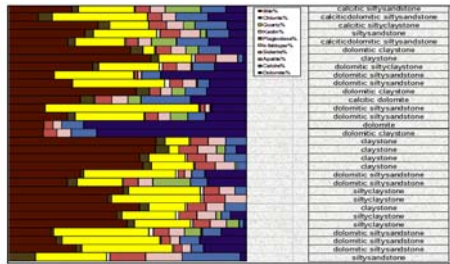


18

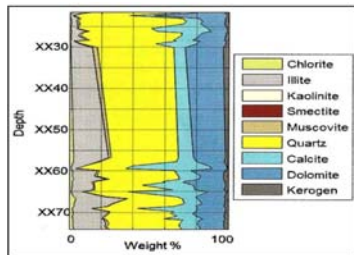
Mapeo u-XRF



Descomposición espectral Infra-Roja (FTIR)



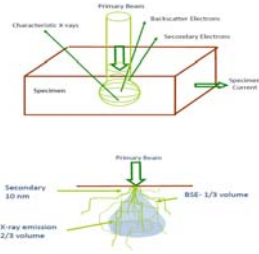
Descomposición espectral Infra-Roja (DRIFT)



Microscopio Electrónico de Barrido

FUNDACIÓN
YPF

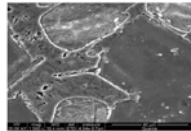
- SEM: Scanning Electron Microscopy
- EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
- BSEM: Back-Scattered Electron Microscopy
- FIB-SEM: Focused Ion Beam SEM



SEM

FUNDACIÓN
YPF

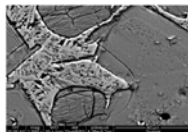
- La emisión de electrones secundarios muestra detalles de la superficie y diferencias morfológicas
- Deja en evidencia materiales muy finos en la superficie y estructuras superficiales pequeñas.



BSE

FUNDACIÓN
YPF

- Los electrones retro-dispersados muestran diferencias elementales debido a la densidad y composición atómica
- Presenta densidad debajo de la superficie
- Áreas brillantes son generalmente más densas que las áreas oscuras.



FIB-SEM Secuencial

- FIB-SEM 3D segmentando la red de kerógeno.
- Tamaño de la muestra: 4x5x2.5 micrones



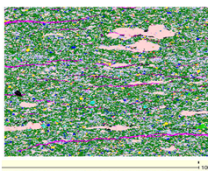
FIB-SEM Secuencial

- Porosidad Total
 - Porosidad no-conectada
 - Porosidad orgánica
 - Porosidad intergranular (no-orgánica)
- Distribución de tamaño de poro
- Geometría de poro
- Abundancia de materia orgánica
- Modelado de flujo
- A resolver los problemas de escala y representatividad de las muestras



QEMSCAN

- QEMSCAN es un sistema automático de análisis de roca y minerales basado en la combinación de técnicas de barrido electrónico.



FUNDACIÓN
YPF

Mediciones Petrofísicas

11

FUNDACIÓN
YPF

Caracterización petrofísica en laboratorio

- Densidad de grano
- Porosidad
- Permeabilidad
- Saturación
- Métodos
 - GRI (Gas Research Institute) – Utiliza Dean-Stark
 - TerraTek – Utiliza retorta
 - NMR
 - Otros
 - WIP (Chevron)
 - Total

12

FUNDACIÓN
YPF

GRI

- GRI: “*Development of Laboratory and Petrophysical Techniques for Evaluating Shale Reservoirs*”
- Programa del *Gas Research Institute* para el desarrollo de técnicas de evaluación en *Shale Gas*
- Desarrollado entre Octubre de 1986 y Septiembre 1993
- Forma la base para las técnicas utilizadas por los laboratorios comerciales
- En particular, desarrollaron nuevas metodologías o modificaciones de técnicas existentes, para medir porosidad, gas, agua y petróleo y permeabilidad en *shales*

13

Método GRI

FUNDACIÓN YPF

- Muestra original
 - Peso
 - Volumen
 - Bulk Density
- Muestra molida
 - Volumen
 - Peso
 - Grain Density
 - Gas Filled Porosity
- Permeabilidad (Pressure Decay)
- Extracción con Dean Stark
 - Agua
 - Hidrocarburo líquido
- Secado
 - Dry Grain Volume
 - Porosidad Total



14

GRI - Permeabilidad

FUNDACIÓN YPF

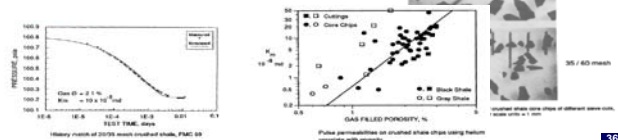
- Permeabilidad por pulso de presión con He (muestra entera) (*Pressure Decay*)
- Permeabilidad por pulso de presión (*Pressure Decay*) en muestra molida o *cutting* (Recomendada)
 - Mide permeabilidad de matriz
 - No tiene interferencia de microfisuras
 - No puede medirse con sobrecarga
 - Es más simple y rápido
- Permeabilidad de “desgasibilidad” con He o CH4 sobre muestra entera.

15

GRI – Permeabilidad – Pulse Decay – Roca molida

FUNDACIÓN YPF

- Se realiza la medición del decaimiento de presión sobre la muestra molida y tamizada a tamaño uniforme.
- Se obtienen porosidad y permeabilidad de matriz a partir de un ajuste
- Se asume una forma geométrica de los pedazos de roca

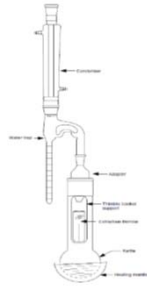


16

GRI – Saturación de fluidos

FUNDACIÓN YPF

- Extracción por destilación (Dean-Stark)
- Destilación con solventes
- El agua y el solvente se condensan
- El agua se acumula en un recipiente calibrado.
- Muestra entera o molida
- El petróleo se obtiene por diferencia de peso
- El solvente condensado cae sobre la muestra disolviendo y arrastrando el petróleo
- Tarda dos días o más



Método Terratek/Schlumberger

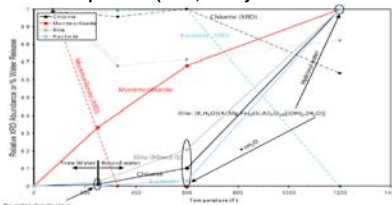
FUNDACIÓN YPF

- SPE 147456 Handwerger et al.
- Roca triturada
- Retorta (modificación del método de la API RP40):
 - Separa agua libre, ligada y estructural
 - Determina directamente el petróleo
- Métodos de transitorio de presión para la permeabilidad

Método Terratek/Schlumberger

FUNDACIÓN YPF

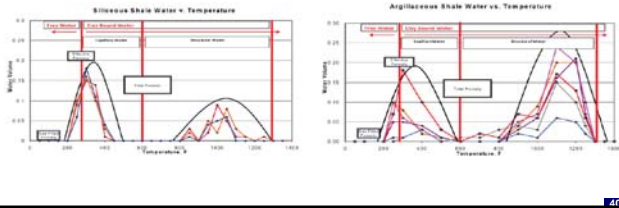
- Determinación de saturación de fluidos por retorta:
- Se vaporizan los fluidos por calentamiento y se condensan en un recipiente graduado
- Se realizan tres escalones de temperatura (250F, 600F y 1300F)



Método Terratek/Schlumberger

FUNDACIÓN YPF

- Selección de temperaturas (ejemplo de Canadá)



Método Terratek/Schlumberger

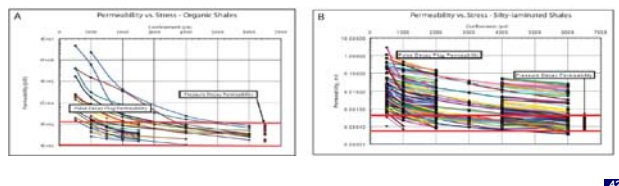
FUNDACIÓN YPF

- El agua se divide en libre (T1) y capilar + ligada a arcillas (T2)
- Separa agua estructural de las arcillas (T3)
- La porosidad total se obtiene por suma de fluidos más el gas calculado inicialmente ("As-received gas filled porosity")
- El volumen poral debe corregirse por el volumen ocupado por el gas adsorbido

Método Terratek/Schlumberger

FUNDACIÓN YPF

- Permeabilidad
 - Pulse Decay
 - Pressure Decay



Método Terratek

FUNDACIÓN
YPF

- Muestra original
 - Peso
 - Volumen
 - Bulk Density
- Muestra molida
 - Volumen
 - Peso
 - Grain Density
 - Gas Filled Porosity
- Permeabilidad (Pressure Decay – Pulse Decay)
- Extracción con Retorta
 - Agua libre
 - Agua ligada
 - Hidrocarburo líquido



43

Resultados

FUNDACIÓN
YPF

	A.M. Bulk Density	A.M. Grain Density	Dry Grain Density	Porosity % of BV	Water Saturation % of PV	Gas Saturation % of PV	Stable Oil Saturation % of PV	Gas Filter Porosity % of BV	Bound Hydrocarbon Saturation % of BV	Bound Water Saturation % of BV	Pressure Decay Permeability md
Gas Producer (Run-1,7)	2.371	2.761	2.597	9.46	19.36	79.35	1.67	7.41	0.06	3.99	0.000116
	2.381	2.761	2.587	9.81	18.20	83.95	0.81	7.62	0.08	4.89	0.000532
	2.339	2.644	2.575	9.62	17.31	81.92	0.77	8.05	0.13	4.39	0.000413
	2.481	2.818	2.652	7.96	26.14	75.50	0.96	8.09	0.00	8.21	0.000389
2.480	2.843	2.675	7.94	23.32	73.65	1.03	8.18	0.08	5.35	0.000411	
Gas & Condensate Producer (Run-1,1)	2.451	2.803	2.657	8.79	25.35	86.40	0.25	9.84	0.00	8.45	0.000792
	2.487	2.808	2.651	8.13	29.39	71.93	8.27	8.82	0.11	3.20	0.000210
	2.670	2.587	2.632	7.09	28.32	68.18	9.08	4.88	0.11	5.81	0.000321
	2.487	2.890	2.631	7.69	19.32	74.62	10.08	3.72	0.34	4.92	0.000962
2.417	2.878	2.638	8.96	21.27	70.66	8.07	8.20	0.04	4.36	0.000218	
No Production (Run-1,8)	2.298	2.318	2.381	5.17	60.39	16.76	22.85	0.87	8.09	4.38	0.000045
	2.284	2.325	2.381	6.21	59.82	28.34	13.84	1.79	10.03	4.59	0.000028
	2.432	2.684	2.597	7.81	63.77	21.88	13.54	1.98	6.81	3.99	0.000034
	2.279	2.326	2.408	7.48	87.69	26.81	15.90	2.01	9.18	4.06	0.000031
2.122	2.743	2.232	7.41	32.29	13.14	54.08	0.97	14.33	4.20	0.000030	

44

Mediciones Geoquímicas

FUNDACIÓN
YPF

45

Carbono Orgánico Total (TOC)

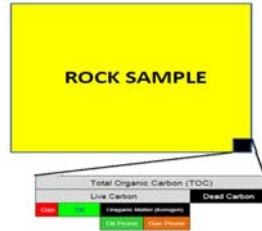
FUNDACIÓN YPF

- El TOC representa solamente el carbono de la materia orgánica y es una pequeña fracción de la masa o el volumen total de la roca

$$V_i = (\rho_o + \rho_i)w_i$$

$$W_i = (\rho_i + \rho_o)V_i$$

- w_i = weight fraction of component i ; fraction of total weight
- ρ_i = density of component i , g/cm³
- ρ_o = bulk density of sample, g/cm³
- V_i = volume fraction of component i , fraction of bulk volume



46

Métodos para medir TOC

FUNDACIÓN YPF

- Combustión directa
- Combustión directa modificada
- Método indirecto (por diferencia)
- Pirólisis



47

TOC por combustión directa

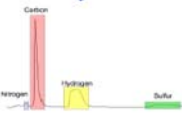
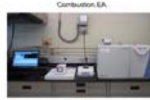
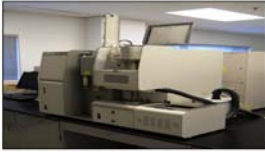
FUNDACIÓN YPF

- Es el método más comúnmente usado para determinar TOC
- Se remueve el carbonato de la muestra mediante acidificación en un crisol con filtro
- Se saca el filtrado y se seca la muestra a 55C
- La muestra seca se combustiona con un acelerador metálico a 1000C
- El CO₂ liberado durante la combustión es analizado con detectores infrarrojos o por detectores de conductividad térmica (TCD)
- Problemas:
- Aunque es un método rápido, no es muy preciso en rocas con bajo TOC o con alto contenido de carbonato

48

TOC por combustión directa

- Analizador de combustión elemental
- Combustión completa de la muestra
- Se analizan los gases
- LECO



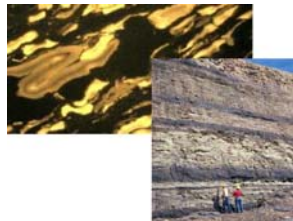
Métodos para medir TOC

- Combustión directa modificada
 - No se filtra y se mide primero el CO2 generado por la acidificación
- Método indirecto (por diferencia)
 - Se analizan dos muestras
 - Combustión sobre muestra total
 - Lavado ácido para medir CO2 del carbonato
 - Diferencia entre las dos anteriores



Alto TOC = Buen Reservorio Shale?

- Aunque una buena roca madre debe tener alto TOC, lo inverso no es necesariamente cierto
- Es necesario evaluar otros indicadores y características del TOC



Evaluación del potencial generador

FUNDACIÓN
YPF

- ANALISIS
 - TOC
 - Pirólisis Programada
 - S1
 - S2
 - Bitumen
 - Hidrocarburos
- HERRAMIENTAS
 - LECO – Análisis TOC
 - Rock-Eval y SRA (Source Rock Analysis)
 - Análisis de extractos y cromatografía de gases

52

Pirólisis Programada

FUNDACIÓN
YPF

- Pirólisis se refiere al calentamiento de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, para separar los componentes orgánicos (Peters, 1986)
- Pirólisis Programada:
 - Muestras pulverizadas se calientan gradualmente en una atmósfera inerte
 - Primero se destilan los componentes orgánicos libres y luego los productos de craqueo de la materia orgánica (kerógeno)
 - Determina la calidad y la madurez de la materia orgánica

53

Instrumentos de Laboratorio – Rock-Eval 2

FUNDACIÓN
YPF

- Se utiliza un crisol metálico conteniendo 100 mg de roca molida
- La muestra se transfiere a un horno dentro del instrumento y se calienta inicialmente hasta 300C, durante 3 minutos en atmósfera inerte
 - Los hidrocarburos libres son térmicamente liberados de la muestra
- La abundancia de hidrocarburos libres se mide con detectores infrarrojos y se registra como S1



54

Instrumentos de Laboratorio – Rock-Eval 2

FUNDACIÓN YPF

- Posteriormente la muestra es pirolizada, aumentando la temperatura del horno desde 300C hasta >550C a 25C/minuto
- Los hidrocarburos generados durante esta fase son medidos por un detector infrarrojo y reportados como S2
- La temperatura de máxima velocidad de generación de hidrocarburos se reporta como Tmax, medida en C
- Parte del producto de pirolización generado entre 300C y 390C se utiliza para medir el contenido de oxígeno de la muestra y se reporta como S3



55

Instrumentos de Laboratorio – Rock-Eval 6

FUNDACIÓN YPF

- Mejora la tecnología de Rock-Eval 2
- Mide continuamente la abundancia de CO y CO2, a través de la pirólisis
- Completamente automático
- Dos hornos
- Análisis de TOC hasta 100% C

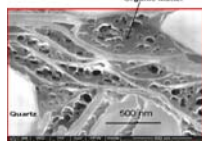


56

Mediciones Rock-Eval

FUNDACIÓN YPF

- Rock-Eval 2 y Rock-Eval 6 se pueden utilizar para determinar el TOC de la muestra
- Rock-Eval 2: el carbono orgánico residual se combustiona a 600C, reportado como S4. El TOC se determina sumando todos los componentes de oxidación determinados durante la pirólisis.
- Rock-Eval 6: La oxidación de los residuos orgánicos se realiza a 850C, temperatura próxima a la utilizada por Leco, minimizando el problema de combustión incompleta

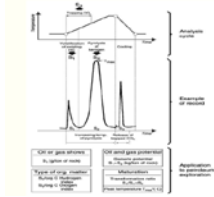


57

Mediciones Rock-Eval

FUNDACIÓN YPF

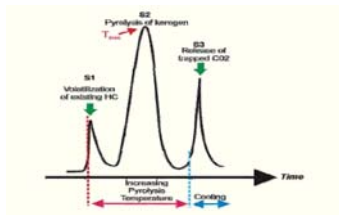
- S1 (primer pico) – miligramos de hidrocarburo que puede ser térmicamente destilado de un gramo de muestra de roca.
- S2 (segundo pico) – miligramos de hidrocarburo generado por degradación termal (pirólisis) del kerógeno en un gramo de roca
- S3 (tercer pico) – miligramos de CO₂ generado a partir de un gramo de roca durante la rampa de temperatura hasta los 390C
- La temperatura es medida continuamente durante la pirólisis
 - Tmax – temperatura a la que se genera la mayor cantidad de hidrocarburo S2



68

Mediciones Rock-Eval

FUNDACIÓN YPF

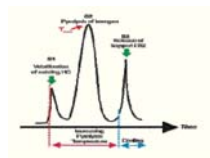


69

Mediciones Rock-Eval – S1

FUNDACIÓN YPF

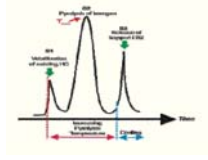
- S1 – Cantidad de hidrocarburo libre en la muestra (gas y líquido) (mgHC/g de roca)
- S1 > 1 mg/g puede indicar Oil Shale
- La contaminación de la muestra con lodo de perforación (OBM) puede conducir a valores anormalmente altos de S1.



60

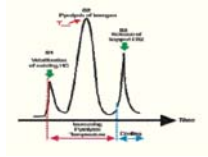
Mediciones Rock-Eval – S2

- S2 – Cantidad de hidrocarburo generado por craqueo térmico de la materia orgánica
- S2 es un indicador de la cantidad de hidrocarburo que la roca tiene el potencial de producir, si se dan las condiciones favorables



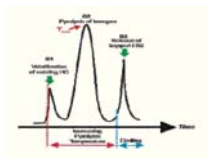
Mediciones Rock-Eval – S3

- S3 – Cantidad de CO2 (en mg de CO2 por gramo de roca) producido durante la pirólisis del kerógeno
- S3 es un indicador de la cantidad de oxígeno en la muestra y se usa para calcular el índice de oxígeno.
- Si S3 es anormalmente alto, se puede sospechar de contaminación



Mediciones Rock-Eval – Tmax

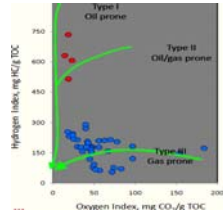
- Tmax – Temperatura a la cual se libera la mayor cantidad de hidrocarburos durante el proceso de craqueado del kerógeno. (Máximo del pico S2)
- Tmax es un indicativo de la etapa de maduración térmica de la materia orgánica en la muestra
- Tmax depende parcialmente del tipo de materia orgánica en la muestra



Interpretación de Pirólisis Programada

FUNDACIÓN YPF

- Índice de Hidrógeno (HI) S2/TOC
- Índice de Oxígeno (OI) S3/TOC
- Índice de Producción (PI) S1/(S1+S2)
- Tmax
 - 400 a 440C Inmaduro
 - 440 a 470C Generación de petróleo
 - Arriba de 470C Generación de gas

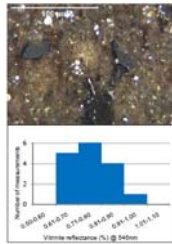


64

Reflectancia a la Vitrinita Ro

FUNDACIÓN YPF

- Ro es el parámetro más ampliamente usado para indicar la madurez termal de una roca madre
- Se mide rutinariamente
- Se mide la luz reflejada sobre una muestra de kerógeno preparada especialmente
- En alta madurez se reporta Romin y Romax debido a la anisotropía de la vitrinita



65

Reflectancia a la Vitrinita Ro

FUNDACIÓN YPF

Guía práctica para madurez termal

- Inmaduro < 0.6% Ro
- Ventana de Petróleo 0.6-1.1% Ro
- Ventana de Gas Húmedo 1.1-1.4% Ro
- Ventana de gas Seco 1.4-3.2% Ro
- Destrucción de Gas >-3.2% Ro

66
