

# **CURSO de POSTGRADO**

## **“PETROFÍSICA: Teoría y Práctica de las Mediciones de Laboratorio en Rocas de Reservorios”**

### **Propuesta Académico-Pedagógica**

#### **1. Fundamentación y Objetivos**

El objetivo de este curso es desarrollar conceptos, teorías y procedimientos de laboratorio relacionados a la determinación y estudio de las propiedades de rocas porosas y sus interacciones con fluidos (gases, hidrocarburos líquidos y soluciones salinas (agua, de ahora en adelante)).

Las propiedades de las formaciones de rocas porosas y de los fluidos que contienen controlan el ritmo de producción y las cantidades de fluidos residuales que quedarán en la roca luego de que todos los métodos económicamente disponibles han sido empleados en la producción de hidrocarburos. Se estima que ~40% de los hidrocarburos quedan en la formación luego de las producciones primaria y secundaria. Esta gigantesca cantidad de hidrocarburos justifica la más completa caracterización que se pueda hacer del reservorio empleando para ello la teoría y los procedimientos de la petrofísica. Estos avances teórico/prácticos ha posibilitado que muchos pozos abandonados hayan vuelto a la producción.

En este curso se verán en conjunto las teorías y procedimientos específicos que se encuentran dispersos en la literatura. Particularmente se verá el “qué” es lo que hay que hacer y simultánea ó posteriormente se verá el “cómo”.

Toda la actividad en este curso estará orientada a trabajo en el laboratorio. El trabajo de campo –el “perfilaje”– será tema de un curso posterior. Sin embargo, en los casos sencillos, se analizarán similitudes y discrepancias entre las mediciones de laboratorio y las de campo tratando de encontrar las explicaciones más sencillas posibles.

Como primer paso, en el estudio de las propiedades de las rocas y de sus interacciones con fluidos, los dos primeros capítulos serán un review de mineralogía, petrología y geología. En el capítulo 3 se desarrollarán los dos conceptos más importantes en la ingeniería del petróleo: la porosidad y la permeabilidad, así como sus correlaciones. En el capítulo 4 se desarrollarán la resistividad eléctrica y la saturación con agua que son la base de las técnicas de perfilaje. En el capítulo 5 se desarrollan la teoría y las aplicaciones de la presión capilar y de la mojabilidad asociadas con rocas saturadas con fluidos. En el capítulo 6 se analizan las aplicaciones de la Ley de Darcy para el estudio de flujos lineales, radiales, laminares y turbulentos. En el capítulo 7 se analizan las interacciones entre las rocas del reservorio y los fluidos en ellas contenidos. En los capítulos 8 y 9 se analizan la última técnica incorporada al estudio de la petrofísica, i.e. la

Resonancia Magnética Nuclear, y las aplicaciones concretas de la misma al tema de la petrofísica. En el último capítulo, el 10, se efectúa una integración de todas las técnicas y de los resultados que de ellas se obtienen a fin de lograr la mejor caracterización posible de la muestra de roca que está siendo analizada. En todos los casos se presentarán y analizarán resultados de laboratorio en distintas muestras de rocas.

Como objetivo de todo este proceso se pretende que los participantes adquieran un conocimiento básico del sistema –la roca y su interacción con fluidos– y de los métodos y herramientas disponibles para llevar a cabo dichos estudios y determinaciones. No es la intención formar expertos en el tema, sino brindar a los participantes una perspectiva introductoria amplia que les permita aproximarse a entender y conocer la especificidad de los temas relacionados con la Petrofísica. Como parte de ello se discutirán todos los elementos físicos que permitan, a los participantes, tener un conocimiento satisfactorio de los fundamentos empleados en cada técnica experimental que se emplee.

## **2.Organización de los Contenidos**

### **Pautas Generales**

El desarrollo de los contenidos, más abajo presentados, es una propuesta orientativa y abierta a las modificaciones que surjan de su aplicación, desarrollo y evolución. Por esto su estructura es lo suficientemente flexible como para integrar esos nuevos aportes en un proceso de enriquecimiento progresivo. Este carácter abierto, del diseño de contenidos y metodología, se complementa con la preocupación de hacerlo accesible a la mayoría de los participantes de los distintos ámbitos y proponiendo su uso y adopción para satisfacer sus necesidades particulares.

Se pondrá énfasis en establecer un lenguaje común para mejorar la comunicación entre el docente y los participantes. Particularmente se desarrollarán los fundamentos físicos de los experimentos en los que se basan las técnicas experimentales empleadas.

Las actividades típicas durante el Curso incluyen: dictado de las clases y asistencia a las mismas, realización de trabajos prácticos presenciales y no presenciales, tareas de integración grupal, elaboración de monografías por parte de los participantes y búsqueda de bibliografía.

En todos los casos se pretende lograr de parte de los participantes un manejo acabado de los distintos temas.

## **3.Detalle de los Contenidos**

### **Introducción**

Constituyentes Minerales de las Rocas. Rocas Ígneas, Metamórficas y Sedimentarias. Propiedades de Partículas Sedimentarias. Desarrollo y Uso de la Petrofísica.

### **Introducción a la Geología del Petróleo**

Composición de la Tierra. Corteza. Placas Tectónicas. Tiempo Geológico. Geología Sedimentaria.

Cuencas. Deriva Continental. Ciclos. Acumulación de Sedimentos. Entrampamiento de Hidrocarburos. Origen del Petróleo. Transformación de Orgánicos en Kerógeno y de éste en Gas y Petróleo. Migración y Acumulación del Petróleo. Migraciones Primaria y Secundaria. Propiedades de Fluidos Subterráneos. Gradiente de Presión Hidrostática. Gradiente de Presión Litostática de Sobrecarga Total. Gradiente Geotérmico. Agua en Campos Petrolíferos. Compresibilidad. Solubilidad de los Gases. Viscosidad. Petróleo. Densidad de los Gases. Viscosidad de los Gases. Densidad del Petróleo. Viscosidad del Petróleo. Química del Petróleo.

## **Porosidad y Permeabilidad**

Porosidad. Factores que Controlan la Porosidad. Clasificación de la Porosidad. Porosidad Primaria. Porosidad Secundaria. Saturación con Fluidos. Utilización de la Porosidad. Permeabilidad. Clasificación de la Permeabilidad. Factores que Afectan la Magnitud de la Permeabilidad. Relación Porosidad-Permeabilidad. Correlación de Kozeny. Efectos Klinkenberg y Forcheimer. Tortuosidad. Efectos del Tamaño de Grano y del Agua de Saturación. Rocas Fracturadas Naturalmente. Indicadores de Fractura Natural. Distribución de las Propiedades de las Rocas. Distribución de la Permeabilidad y de la Porosidad. Medición de la Porosidad y la Permeabilidad.

### **3.1 Resistividad de Formación y Agua de Saturación**

Factor de Formación (FF). Medición de la Resistividad. Determinación de la Resistividad del Agua de Formación. Análisis Químico. Correlación Resistividad-Concentración. Correlaciones FF-Porosidad-Tortuosidad-Cementación. Modelos para el FF. Correlación FF Agua de Saturación. Correlación FF y Permeabilidad. Resistividad de Rocas de Reservorios. Evaluación en Laboratorio de Rocas de Reservorios. Evaluación de Perfiles de Rocas de Reservorios. Evaluación de la Formación. Análisis de la Corteza. Análisis del Perfilaje Pozo. Agua de Saturación. Porosidad. Análisis de Ensayo de Pozo.

## **Presión Capilar y Mojabilidad**

Tensión Interfacial. Ángulo de Contacto. Tensión de Adhesión. Influencia de las Propiedades Químicas de la Superficie. Presión Capilar. Derivación de la Ecuación de Plateau. Elevación Capilar. Función-J de Presión Capilar. Medición de la Presión Capilar por Disco Semipermeable, por Inyección de Mercurio y por Centrifugación. Procedimientos de Laboratorio. Cálculo de la Presión Capilar por Centrifugación. Velocidad Límite de Centrifugación. Cálculos Teórico y Aproximado de la Saturación. Mojabilidad. Alteraciones de la Mojabilidad. Restauración de la Mojabilidad. Índice Amott de Mojabilidad. Ensayo Combinado de Mojabilidad USBM-Amott. Efecto de la Temperatura sobre la Mojabilidad. Efecto de la Mojabilidad sobre las Propiedades Eléctricas. Distribución de Tamaño de Poros. Perfil Vertical de Saturación en Reservorios. Número Capilar. Efecto de la Mojabilidad sobre la Recuperación de Petróleo.

## **Aplicaciones de la Ley de Darcy**

La Ley de Darcy. Flujo Lineal de Fluidos Incompresibles. Flujo Lineal de Gases. Leyes de Darcy y de Poiseuille. Flujo Lineal a través de Fracturas y Canales. Flujo a través de Fracturas. Flujo a través de Canales en Soluciones. Sistemas de Flujo Radial. Flujo en Estado Estacionario. Flujo en Estados Transitorios. Zona Superficial. Flujo Laminar Radial de Gases. Flujo Turbulento de Gases. Flujo Lineal Turbulento. Factor de Fricción de Rocas Porosas. Flujo Radial Turbulento. Efectos

Klinkenberg y Forcheimer. Rocas con Permeabilidad Múltiple. Reservorios en Capas con Flujo Cruzado. Reservorios en Capas sin Flujo Cruzado. Reservorios Compuestos. Sistemas de Flujo Lineal. Sistemas de Flujo Radial. Rocas de Porosidad Múltiple.

## **Interacciones Roca-Fluido**

Importancia de la Permeabilidad en las Proximidades del Pozo. Naturaleza, Origen y Tipos del Daño de la Permeabilidad. Efecto de Migraciones de Finos sobre la Permeabilidad. Tipos y Tamaños de Finos. Migración de Finos. Daño químico. Daño Mecánico. Migración de Sólidos Extraños. Concepto de Velocidad Crítica. Deposición Superficial y Arrastre. Arrastre y Taponamiento. Identificación de Mecanismos de Daño de la Permeabilidad. Daño de la Permeabilidad por Sólidos Extraños. Daño de la Permeabilidad por Formación de Finos. Efecto de la Calidad del Agua sobre la Permeabilidad. Desarrollo Interno y Externo del Taponamiento. Disminución de la Inyectividad por Taponamiento de las Perforaciones y por Llenado del Pozo. Ensayos de Filtración por Membrana. Ensayos de Filtración de Coronas. Formación Interna y Externa del Taponamiento.

## **Física de la Resonancia Magnética Nuclear**

Elementos de Resonancia. Magnetismo Nuclear. Polarización. Resonancia Magnética Nuclear (RMN). Rotación de la Magnetización y Decaimiento de la Inducción Libre. Eco Nuclear y Secuencia CPMG. La Señal Nuclear. Relajación Nuclear. Tiempos de Relajación Espín-Red ( $T_1$ ) y Espín-Espín ( $T_2$ ). Espectrómetros de RMN y Parámetros Característicos.

### **3.2 Elementos Básicos de Petrofísica por Resonancia Magnética Nuclear**

Mecanismos de Relajación de Fluidos Contenidos en Poros. Relajación de Volumen, superficial y por difusión. Decaimiento Multiexponencial. Ajuste de la distribución de  $T_2$ . Distribución de Tamaño de Poros. Determinación de Fluidos Irreducibles. Determinación de  $T_{2\text{cutoff}}$ . Determinación de la Porosidad por RMN. Estimación de la Permeabilidad Utilizando los Modelos de Coates (Modelo del Fluidos Libre) y de Kenyon (Modelo del  $T_2$  Medio).

## **Experimentos e Integración de Resultados**

Determinación de Fluidos Contenidos por Destilación. Saturación. Centrifugación, Presión Capilar y Fluidos Irreducibles. Viscosidad. Porosidades Total y Efectiva. Permeabilidad Absoluta. Verificación del Efecto Klinkenberg. Permeabilidad Relativa. Tensión Superficial. Presión Capilar. Distribución de Tamaño de Poros. Resonancia Magnética en Muestras Saturadas y Centrifugadas, y su Análisis Conjunto. Gargantas Porales. Resistividad. Integración y Compatibilización de Resultados.

## **4. Modalidad de Trabajo**

El Curso se desarrollará a lo largo 15 (quince) semanas, a razón de una clase de 4 h (cuatro horas) por semana, lo que hace un total de 60 h (sesenta horas) de actividad presencial.

A lo largo del mismo se desarrollan actividades presenciales consistentes en clases expositivas, trabajos prácticos individuales y talleres donde, trabajando grupalmente, se desarrollarán ejercicios y problemas así como monografías sobre temas específicos, coordinados y supervisados por el profesor. En estos talleres se deberá lograr un manejo práctico de los temas tratados. Además, brindarán el espacio natural para canalizar dudas y controlar la marcha del aprendizaje. Éste control permitirá efectuar un control de gestión continuo, y, de ser necesario, proceder a realizar, sobre la marcha, los ajustes necesarios.

Por razones prácticas y académico-pedagógicas se establece un cupo máximo de 25 (veinticinco) participantes.

## **5.Actividades**

Las actividades típicas durante el Curso incluyen: dictado y asistencia de las clases, tareas de integraciones grupales, realización de trabajos prácticos de ejercicios y problemas así como la elaboración de informes sobre temas específicos, y búsquedas de bibliografía.

### **Del Docente**

El docente se encargará de la parte expositiva y de la parte de práctica; tendrá la responsabilidad de preparar, asignar y coordinar las actividades prácticas; y corregir los ejercicios, problemas e informes. Durante los prácticos el docente deberá detectar los conceptos que han tenido dificultad de entenderse, y efectuar las aclaraciones pertinentes. El docente es el encargado de establecer un clima de cordialidad que facilite la comunicación.

### **De los Participantes**

Asistirán a las clases teóricas y prácticas. Realizarán las prácticas. Consultarán al docente todas sus dudas durante los horarios establecidos a tal fin. Deberán realizar las evaluaciones parciales durante el desarrollo del Curso, así como el examen final y otras tareas que se les asignen.

## **6.Material Didáctico, Programas y Bibliografía**

### **A Ser Provistos por el Dr. Carlos A. Martín**

- Notas de clases y apuntes. Este material estará disponible para los participantes inscriptos. Éste material es abundante y excede los contenidos mencionados en el Punto 4. Detalle de los Contenidos, brindando de esta forma lectura adicional y complementaria en los distintos temas tratados.
- Programas de ajuste, de simulaciones y de estadística. Este material estará disponible para los participantes inscriptos.

### **Bibliografía**

- Tiab, Djebbar and Donaldson, Erle C., *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring*

*Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties*, Gulf Publishing Company, 1996.

- Monicard, Robert P., *Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis*, Editions Technip, 1980.
- *Recommended Practices for Core Analysis*, Recommended Practice 40, Second Edition, February 1998. American Petroleum Institute, Exploration and Production Department.
- *Principios y Aplicaciones de la Interpretación de Registros*, Schlumberger, 2002.
- Ollier, Carlos, *Registros a Cable: Adquisición, Interpretación y Nuevas Tecnologías*. Comunicación privada.
- Coates, George R., Xiao, Lizhi and Prammer, Manfred G., *NMR Logging: Principles and Applications*, Halliburton Energy Services, 1999.
- Ransom, Robert C., *Practical Formation Evaluation*, John Wiley & Sons, 1996.

## 7. Distribución de la Carga Horaria según los Contenidos a Dictar

El Curso se desarrollará a lo largo 15 (quince) semanas, a razón de una clase de 4 h (cuatro horas) por semana, lo que hace un total de 60 h (sesenta horas) de actividad presencial. La distribución de carga horaria presencial se indica a continuación:

<b>Calidad en Laboratorios</b>			
<b>Capítulo</b>		<b>Semana</b>	<b>Tiempo (h)</b>
1	Introducción	1	4
2	Introducción a la Geología del Petróleo	2	4
3	Porosidad y Permeabilidad	3–4	8
4	Resistividad de Formación y Agua de Saturación	5	4
5	Presión Capilar y Mojabilidad	6–7	8
6	Aplicaciones de la Ley de Darcy	8	4
7	Interacciones Roca–Fluido	9	4
8	Física de la Resonancia Magnética Nuclear	10–11	8
9	Elementos Básicos de Petrofísica por Resonancia Magnética Nuclear	12–13	8
10	Experimentos e Integración de Resultados	14–15	8
	Cierre del Curso	16	4
	<b>Total</b>		<b>60 h</b>

Durante las actividades presenciales, se desarrollarán las siguientes tareas:

- Desarrollo de temas a cargo del profesor.

- Realización de trabajos prácticos, a cargo de los participantes y supervisado por el profesor, cuyos objetivos son:
  - ⇒ Familiarizarse con conceptos específicos.
  - ⇒ Realizar los ejercicios y problemas propuestos.
  - ⇒ Realizar los informes propuestos.

Estos trabajos prácticos son elementos claves para la evaluación y aprobación del Curso, tal como se indica a continuación.

## 8. Evaluación y Aprobación del Curso

Los participantes deberán asistir al 80 por ciento de las clases, tanto expositivas como prácticas. Se realizará un seguimiento del desempeño de cada participante. A los que hayan demostrado un buen desempeño y que hayan participado activamente en las clases expositivas y de prácticas y realizado los informes solicitados antes mencionados, se les dará por aprobado el Curso.

## 9. Reconocimiento del Curso

El Curso tendrá el reconocimiento de un Curso de Posgrado de 60 h (Sesenta horas) de duración por la Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, extendiendo la certificación correspondiente a cada uno de los participantes que hayan aprobado el mismo.

Córdoba, Octubre 29 de 2007.–

Tel.: (0351) 433-4051 (Int.107)  
Fax: (0351) 433-4054  
Celular: (0351) 15-545-1139  
E-mail: martin@famaf.unc.edu.ar

---

Dr. Carlos A. Martín  
Facultad de Matemática, Astronomía y Física  
Universidad Nacional de Córdoba  
Ciudad Universitaria  
5000 - Córdoba