

PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS

Apunte 3:

- Perfil de Rayos Gamma
- Espectroscopía de rayos gamma

Los perfilajes radioactivos se pueden realizar por medio de tres metodologías:

a) a partir de equipos que detectan la radiación γ resultante de radioactividad natural;

b) aquellos que emplean fuentes de rayos γ artificiales

c) aquellos que usan fuentes de neutrones.

Métodos de perfilaje nuclear

Detección de radiación

- ☐ Detectores de rayos gamma
- ☐ Detectores de neutrones

Fuentes de radiación

- ☐ Fuentes de rayos gamma
- ☐ Fuentes de neutrones

Perfiles de densidad

- ☐ Herramientas estándar de densidad
- ☐ Herramientas de perfilaje de densidad espectral

Perfiles neutrónicos

Perfiles de rayos gamma

- ☐ Herramientas estándar de rayos gamma
- ☐ Herramientas de perfilaje de espectroscopía de rayos gamma

Que miden los perfiles de rayos gamma?

- ☐ los perfiles de rayos de gamma son perfiles de litología que miden la radioactividad natural de una formación.
- ☐ como el material radiactivo se concentra en las lutitas, estas tienen altas lecturas de rayo de gamma. Las areniscas libres de lutitas y carbonatos, por consiguiente, tienen lecturas de rayo de gamma bajas.

- 1) Cámara de ionización
- 2) Detector Geiger-Muller
- 3) Contadores proporcionales
- 4) Detectores de Centelleo

El primer tipo de detector ya no se usa. En el caso de 2) y 3) solo se usan en herramientas miniaturizadas; en cambio los detectores de centelleo son los que se utilizan normalmente en perfilaje de pozo, pero no en pozos de pequeño diámetro por problemas de protección del detector.

6"

4" DIA.

3/8" STEEL DECK PLATE

WATER

LOW ACTIVITY CONCRETE (20/40 OTTAWA SILICA, LOW ACTIVITY CEMENT SELECTED FOR UNIFORMITY OF ACTIVITY)

CORRUGATED PIPE

LOW ACTIVITY CONCRETE

RADIOACTIVE CONCRETE

LOW ACTIVITY CONCRETE

6'

6'

6'

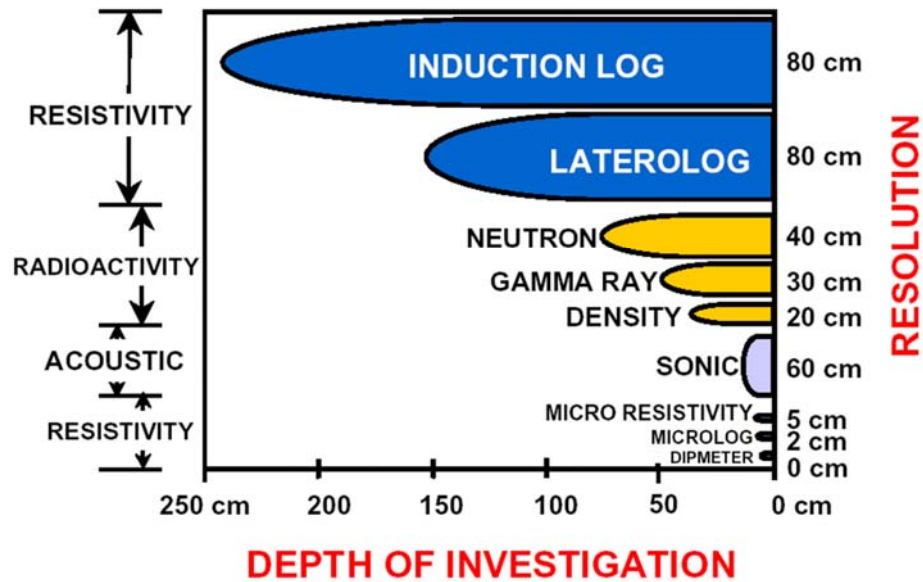
15'

CASING (5 1/2" O.D., 17# J-55)



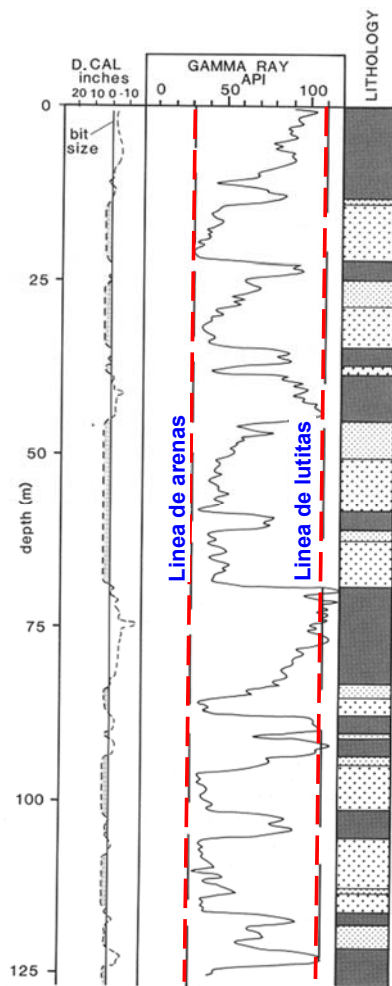
Profundidad de investigación y resolución vertical.

Logging Tools



Encabezado típico del perfil de rayos gamma

other logs (SP, caliper etc.) GAMMA RAY (API)	depths (m)	other logs (resistivity, sonic, density neutron etc.)
0.0 100.0		
gamma-ray log (reading about 70 API)	1400	

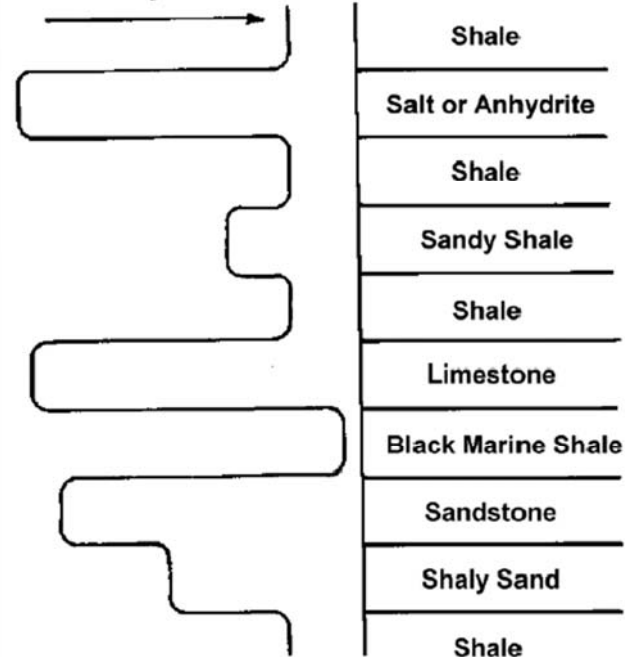


Linea base de arena y de lutita definidas sobre un perfil de rayos gamma

Respuesta típica del perfil de rayos gamma para varios minerales

Gamma Ray Increases →

MINERALOGY



Aplicaciones del perfil de rayos gamma

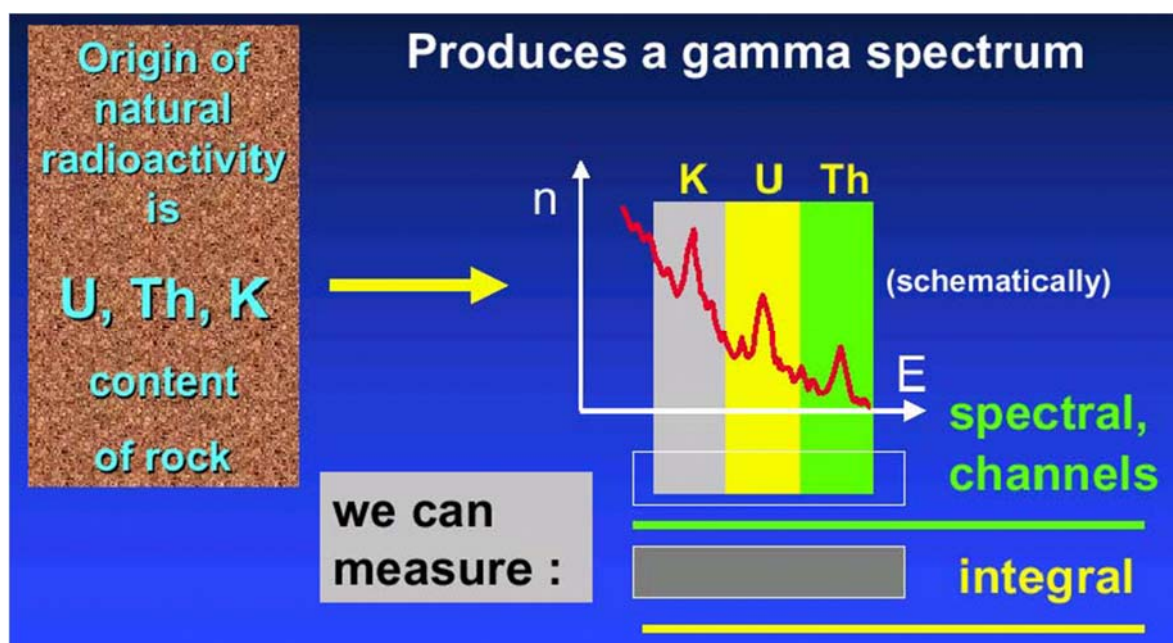
- 1) Identificación de litologías
- 2) Identificación de estratos potencialmente productivos
- 3) Da información sobre espesores de capas
- 4) Da información sobre el índice de permeabilidad
- 5) Usándoselo para obtener registros a través de cañerías, y en combinación con un registro de cuplas, permite correlaciones directas de profundidad con perfiles de pozo abierto.

Principales usos del perfil de rayos gamma

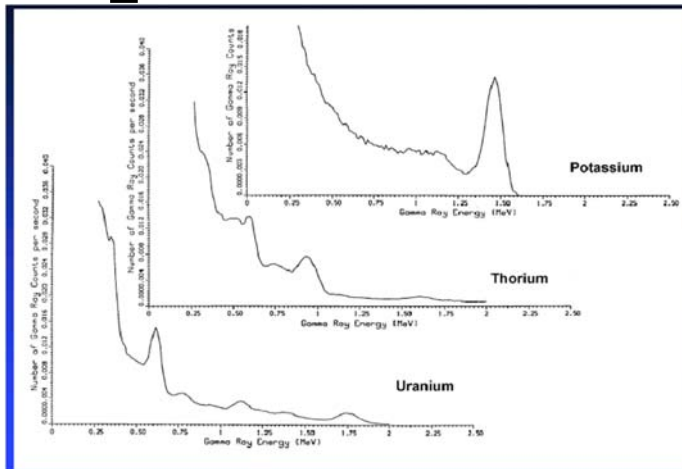
	Discipline	Used for	Knowing
Quantitative	Petrophysics	Shale volume (V_{sh})	gamma ray (max) gamma ray (min)
Qualitative	Geology	Shale (shaliness)	gamma ray (max) gamma ray (min)
		Lithology	typical radioactivity values
		Mineral identification	Mineral radioactivity
	Sedimentology	Facies	Clay/grain size relationship
	Sequence Stratigraphy	Parasequence & condensed sequence identification	Clay/grain size & organic matter/radioactivity relationships
	Stratigraphy	correlation	–
		Unconformity identification	–

Espectroscopía de rayos gamma

Origen de la radiactividad natural

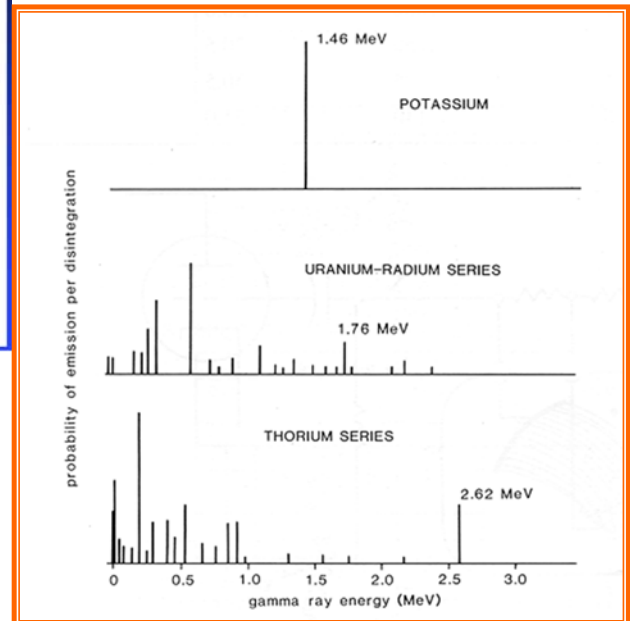


Espectros de emisión del U, Th y K



Espectros de emisión de rayos gamma de minerales radiactivos naturales

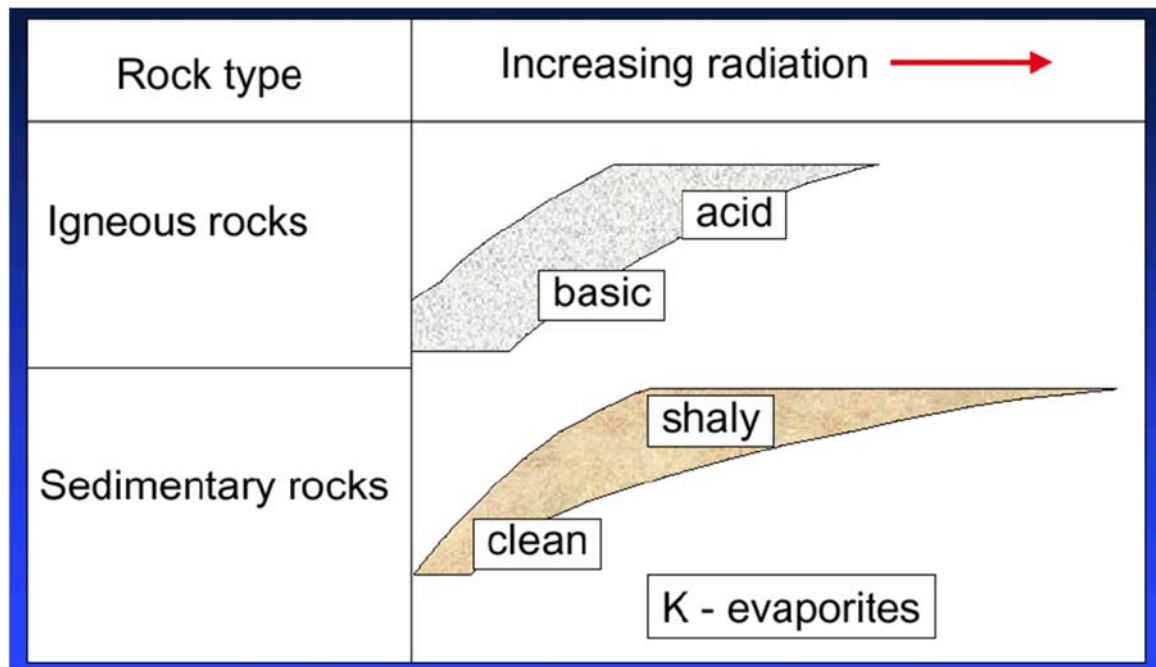
Principales picos usados para identificar cada fuente de emisión.



Emisión de rayos gamma de algunos minerales

Mineral	γ - ray (API)
Quartz, Dolomite, Calcite (clean)	0
Plagioclase (Albite, Anorthite)	0
Alcali feldspar (Orthoclase, Anorthoclase, Microcline)	220
Micas (Muscovite, Biotite)	270
Shale	80 ...150
Kaolinite	80 ...130
Chlorite	180 ... 250
Illite	250 ... 300
Montmorillonite	150 ... 200
Sylvite	500
Carnallite	200

La radiación y los tipos de rocas



Que se mide con el perfil de espectroscopía de rayos gamma

La herramienta mide: 1) Rayos Gamma totales

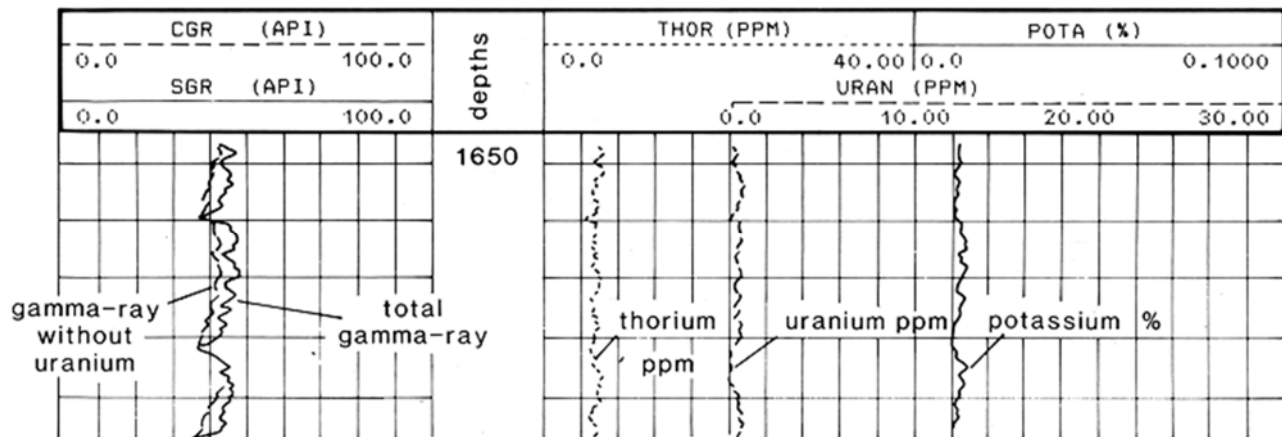
2) Rayos Gamma emitidos por:

a) Potasio (K^{40}) a 1,46 Mev.

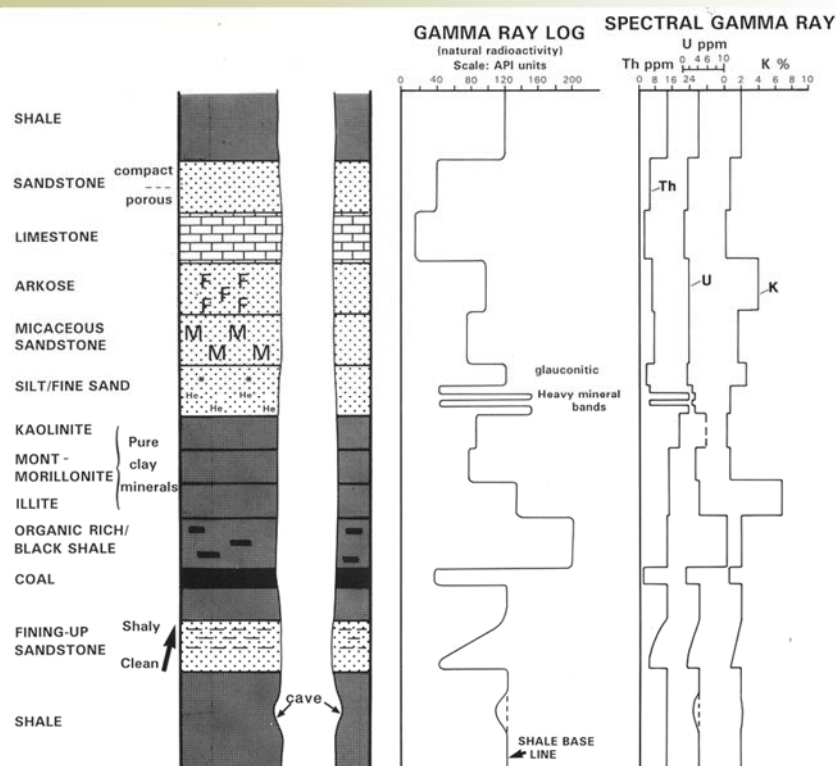
b) Torio a través de su nucleótido
Talio (Tl^{208}) a 2,614 Mev.

c) Uranio a través de su nucleótido
Bismuto (Bi^{214}) a 1.764 Mev.

Encabezado típico del perfil de espectroscopía de rayos gamma



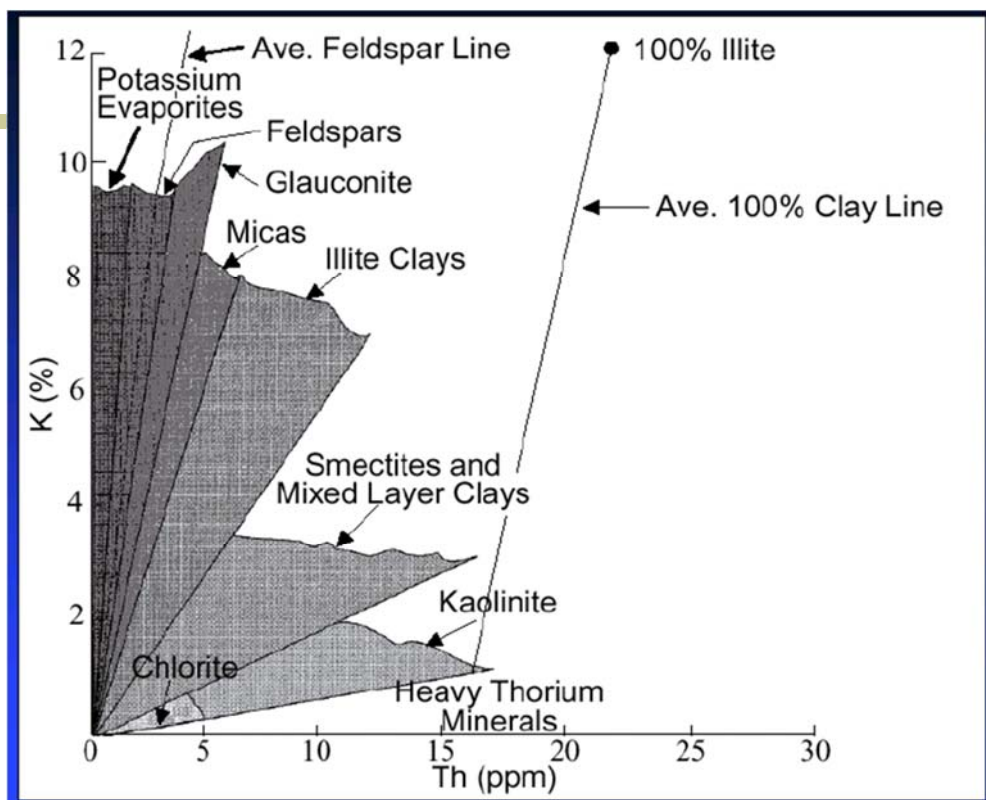
Algunas respuestas típicas de los perfiles de rayos gamma y de espectroscopía de rayos gamma



Rider, 1996

Utilidad de la espectroscopia de rayos gamma

- 1.- Identificación de litologías
- 2.- Correlación de detalle
- 3.- Valores confiables de arcillosidad
- 4.- Se usa para identificar distintos minerales de arcilla
- 5.- Identificación de distintos minerales de arcillas en base a la relación Th/K
- 6.- Es recomendable combinarlo con perfiles que identifiquen otras propiedad, por ejemplo Pe, neutrón, etc.



Principales usos del perfil de espectroscopía de rayos gamma

	Discipline	Used for	Knowing
Quantitative	Petrophysics	Shale volume (V_{sh})	Th (max), Th (min) for pure shale
		Radioactive mineral volume	V_{sh} (Th), K (max), K (min) for shale
Semi-quantitative and qualitative	Geology	Dominant clay material	Th, K, U content of individual clay minerals
		Detrital clay mineral suite	Radioactive content of individual clay minerals
	Sedimentology & Sequence Stratigraphy	Condensed section recognition from excess uranium	Normal U and Th content or Th/U ratio of shales
		Climatic changes?	Th/K ratio changes in shale
	Reservoir geology	Fracture detection	Uranium contribution to radioactivity
	Geochemistry	Marine source rock identification	Uranium content of organic matter

Estimación del volumen de minerales arcillosos

$$I_{GR} = \frac{(GR_{log} - GR_{min})}{(GR_{max} - GR_{min})} \quad \text{Indice de rayos gamma}$$

$$V_{cl} = 0.083[2^{(3.7 \times IGR)} - 1.0] \quad \text{Areniscas no consolidadas}$$

$$V_{cl} = 0.33[2^{(2 \times IGR)} - 1.0] \quad \text{Rocas consolidadas}$$

PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS

■ Apunte 4:

- Perfil de Densidad
- Perfil de Efecto Fotoeléctrico

Densidad

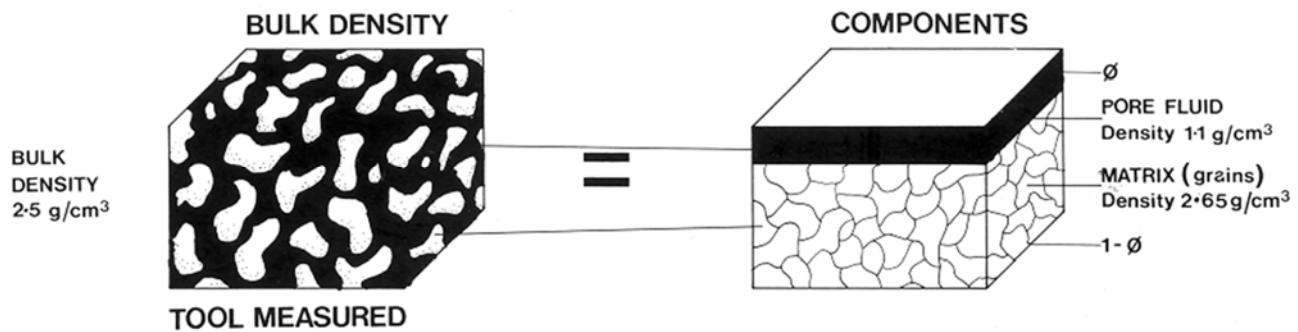
$$densidad = \frac{masa}{volumen}$$

Unidades: **g/cm³** o **kg/m³**

Hay que distinguir entre:

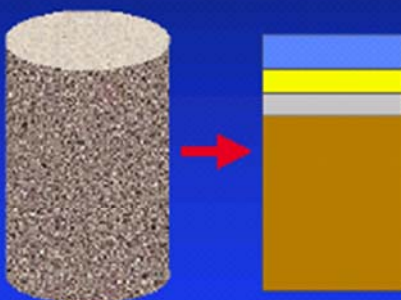
- Densidad de la roca, densidad total (ej. Arenisca)
- Densidad del material sólido de la matrix (ej. Cuarzo)
- Densidad de los fluidos en los poros (ej. Agua)

Densidad total medida por la herramienta y una visualización de la derivación de los componentes de la porosidad



Densidad: influencia de la porosidad y la saturación

porous rock volumetric model

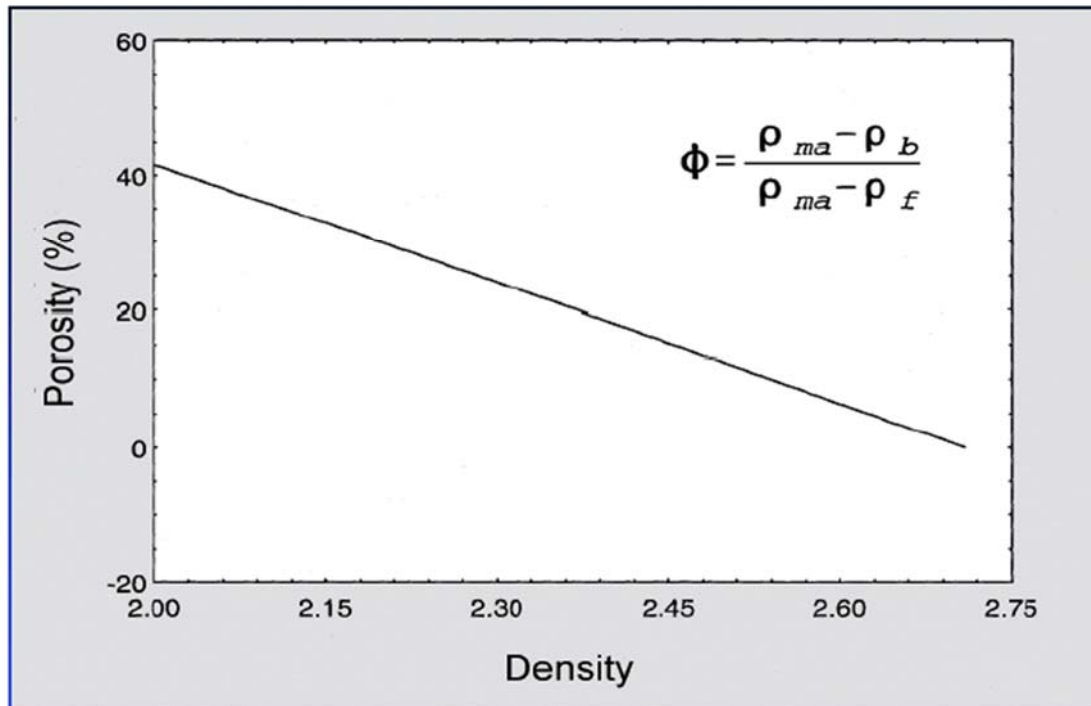


$$\rho_{rock} = (1 - \phi) \cdot \rho_{matrix} + \phi \cdot \rho_{pore}$$

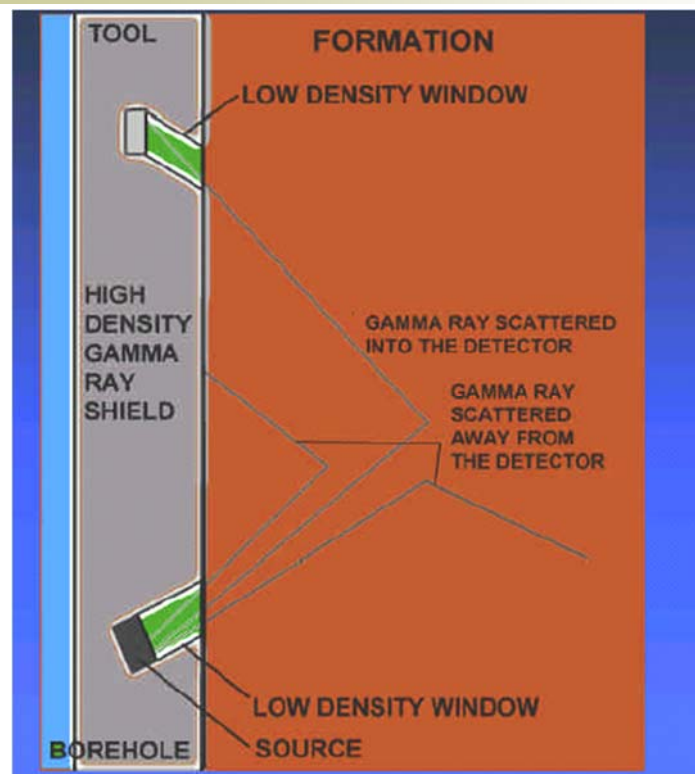
$$\rho_{rock} = (1 - \phi) \cdot \rho_{matrix} + \phi \cdot (S_{water} \cdot \rho_{water} + S_{oil} \cdot \rho_{oil} + S_{gas} \cdot \rho_{gas})$$

$$S_{water} + S_{oil} + S_{gas} = 1$$

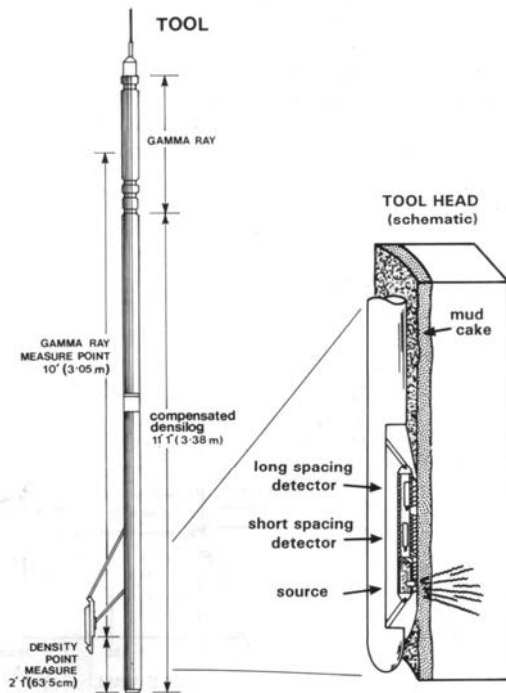
Relación entre densidad y porosidad



Mediciones en el pozo



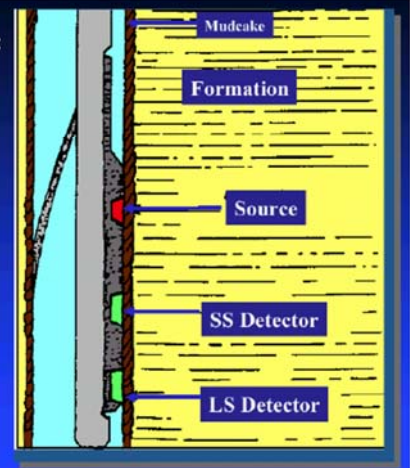
Típica configuración de la herramienta de densidad



Typical instrument configuration:

Nal detectors

Source Cs^{137}
Strength 2 curie
GR Energy 662 keV



Mediciones de densidad: interacciones de rayos gamma activos

Existen tres efectos de interacción que llevan a la pérdida de energía de los rayos gamma

- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Producción de pares

La probabilidad depende de:

- ✓ La energía de la radiación
- ✓ El número atómico del material

Densidad total y densidad electrónica

$$\frac{\sum Z}{\sum M} \approx 1/2,$$
$$\rho_e = 2 \frac{\sum Z}{\sum M} \cdot \rho_b$$

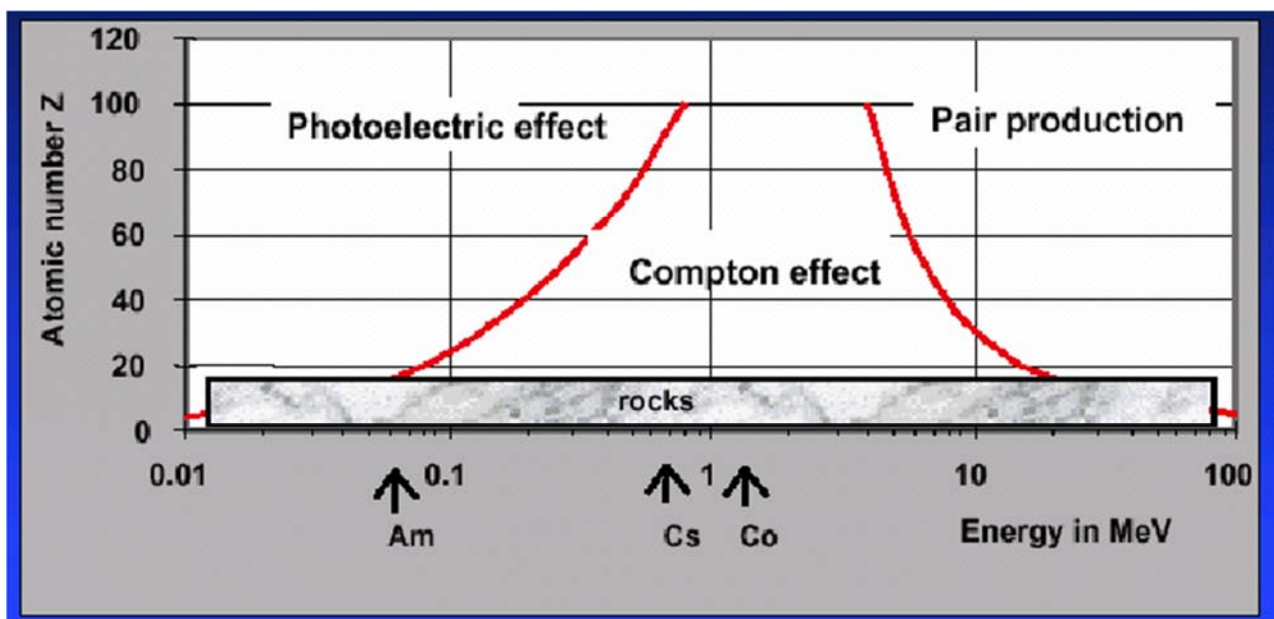
$\sum Z$ = N° de electrones por molécula

$\sum M$ = masa atómica total por molécula

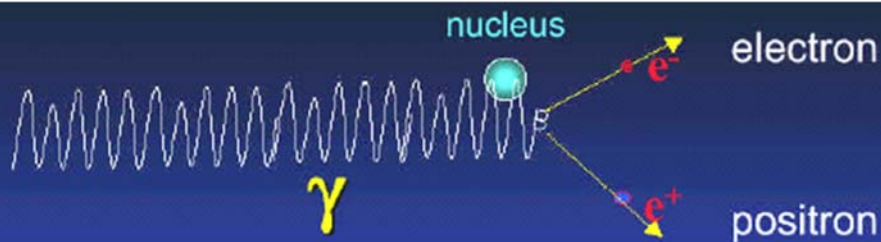
ρ_e = Densidad electrónica

ρ_b = Densidad

Mecanismo de absorción de rayos gamma



Producción de pares



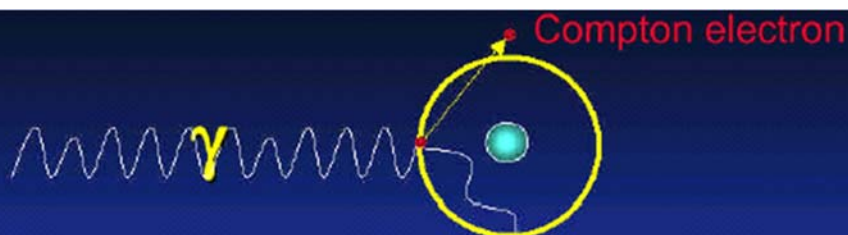
An incident **high-energy** gamma photon (gamma ray energy $> 1.02 \text{ MeV}$)¹ can be converted into a electron - positron pair when it is near a nucleus.

The electron slows down

The positron interacts with an ordinary electron they annihilate one another and produce two gamma-rays.

¹ 1.02 MeV is exactly twice the rest mass of an electron (mc^2)

Efecto Compton

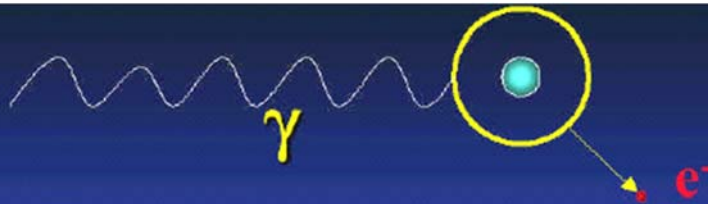


An incident **intermediate-energy** gamma photon (gamma ray) collides with an atom:

- it ejects an electron ("Compton or recoil electron") from an outer shell and leaves with a lower energy;
- the scattered gamma energy is a function of the angle of scattering.

The effect can be described as elastic collision between two masses.

Efecto Fotoeléctrico



An incident **low-energy** gamma photon (< 0.2 MeV) collides with an atom

If the energy of the gamma photon equals or exceeds the "binding energy" of an orbital electron, then

- the gamma photon gives up all of its energy
- the electron leaves its orbit,
- and has a kinetic energy

$$E_{kin} = \text{gamma ray energy} - \text{electron binding energy}$$

Efecto fotoeléctrico

For many elements the photoelectric cross section shows the proportionality to atomic number $Z^{3.6}$

$$\sigma_{pe} \propto Z^{3.6}$$

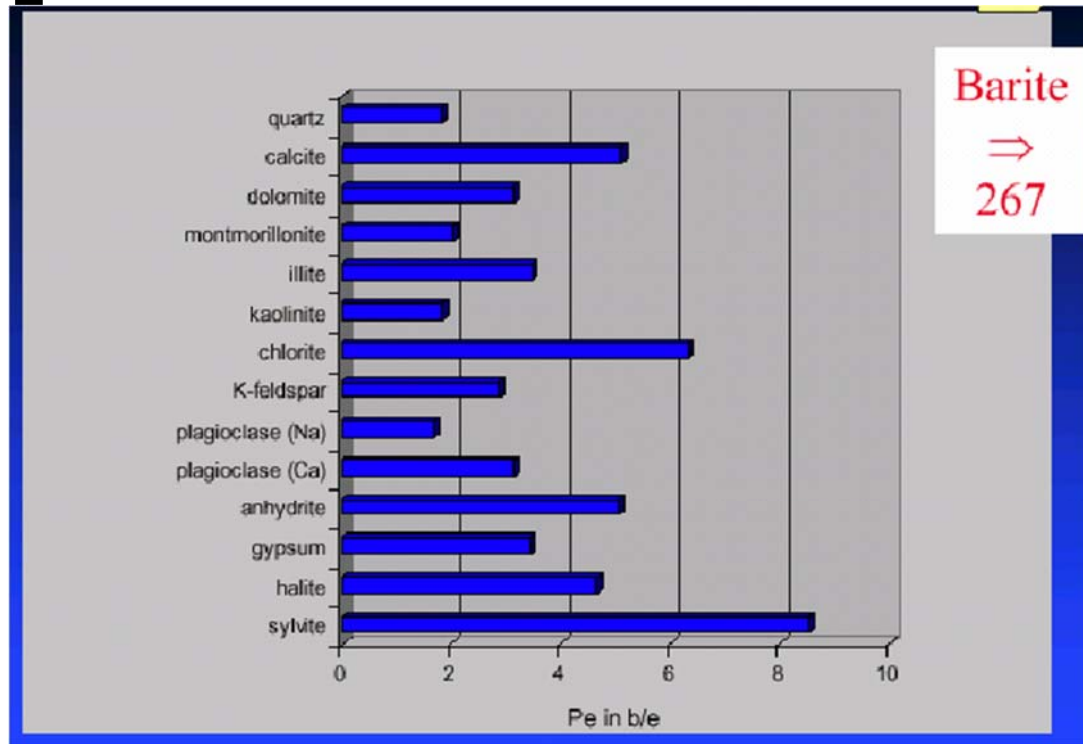
on this basis a effective photoelectric index Pe (average photoelectric cross section per electron) is defined:

$$Pe = (Z/10)^{3.6}$$

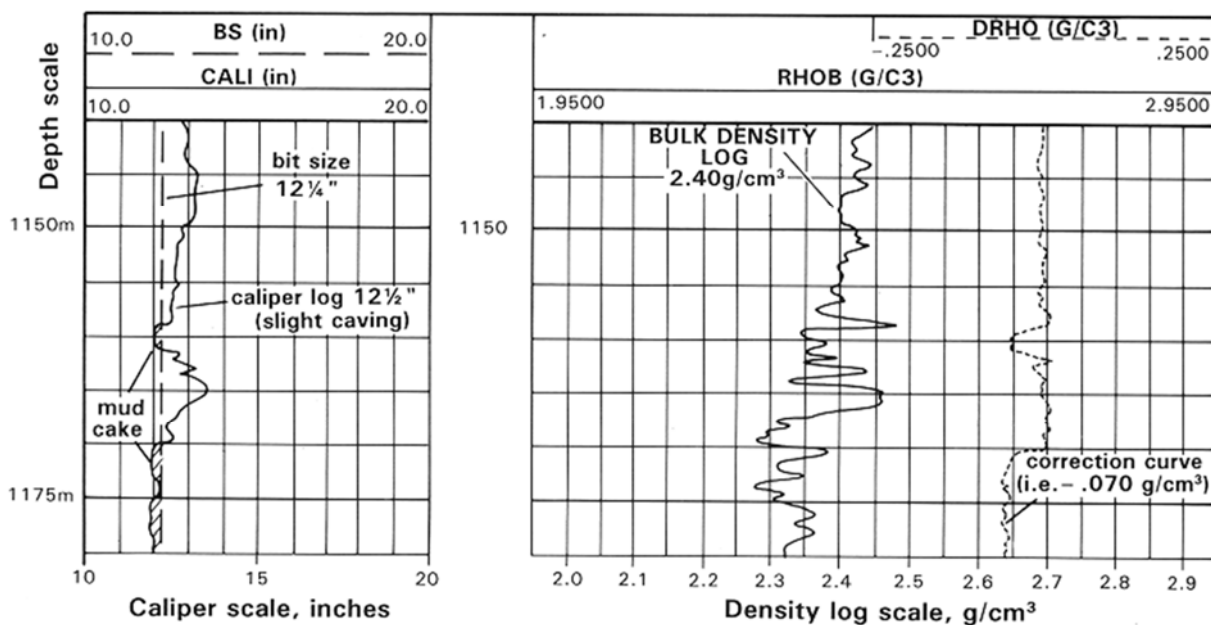
Pe depends on **elemental composition (lithology)** - see table.

Pe - unit: b/e barns per electron

Pe para Minerales

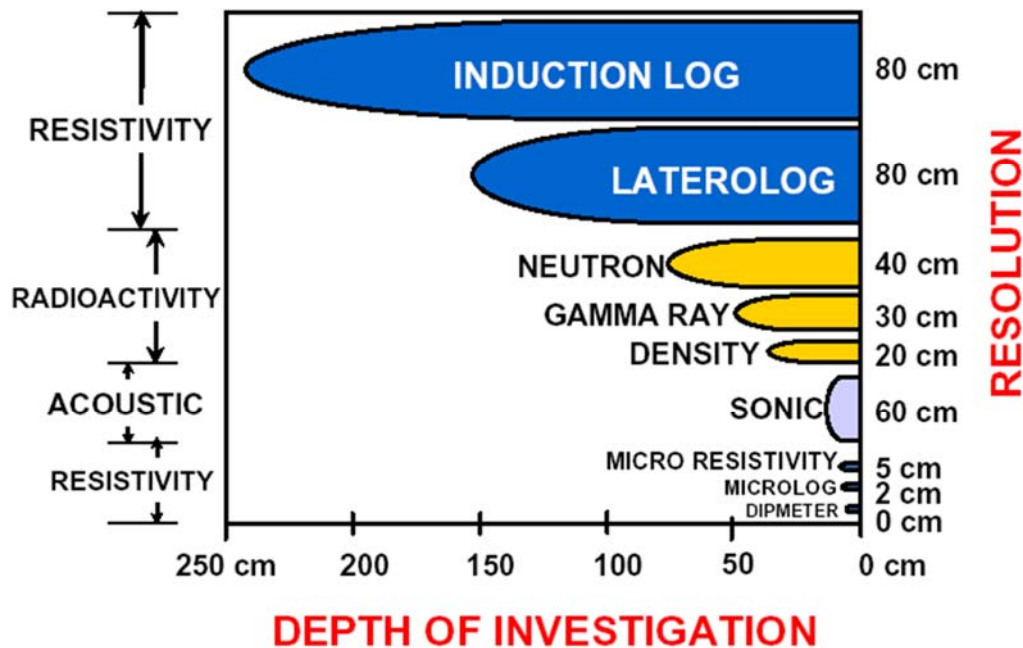


Encabezado de un perfil de densidad



Resolución vertical y profundidad de investigación

Logging Tools



Aplicaciones del perfil de densidad

Mide la densidad de la formación en un pozo abierto, con un mínimo de efecto de pozo.

También permite determinar porosidad.

Se puede calcular la densidad de la formación como:

$$\rho_b = \phi \cdot \rho_f + (1 - \phi) \rho_{ma}$$

donde ρ_b = densidad obtenida del perfil

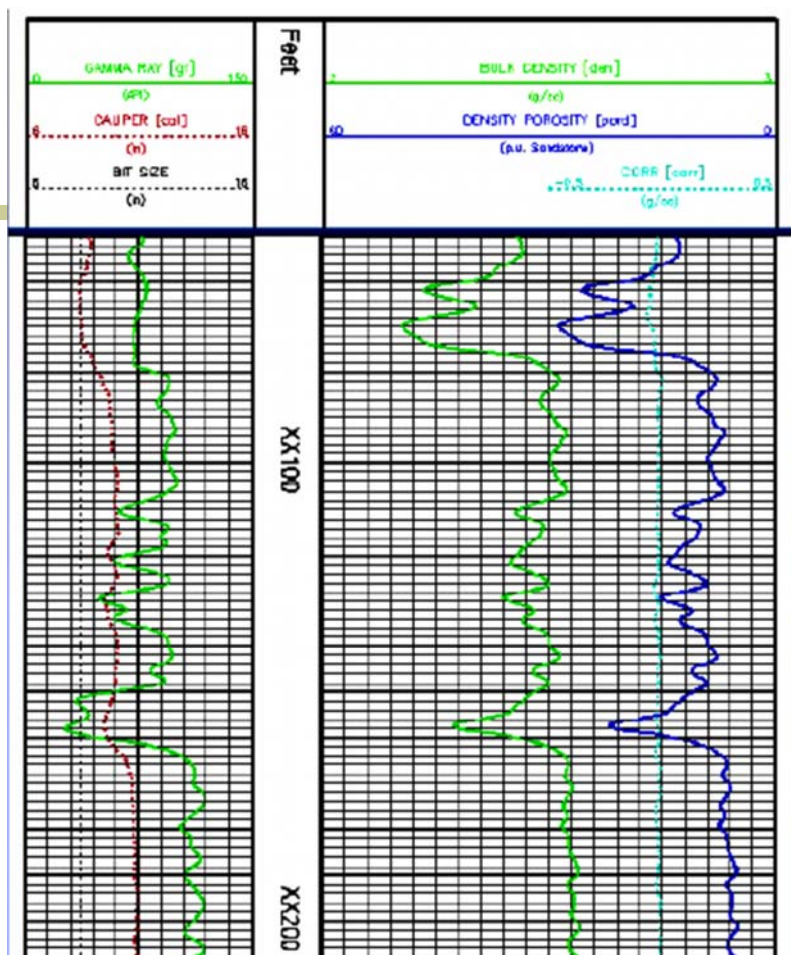
ϕ = porosidad

ρ_f = densidad del fluido poral

ρ_{ma} = densidad de la matriz rocosa

luego $\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}$

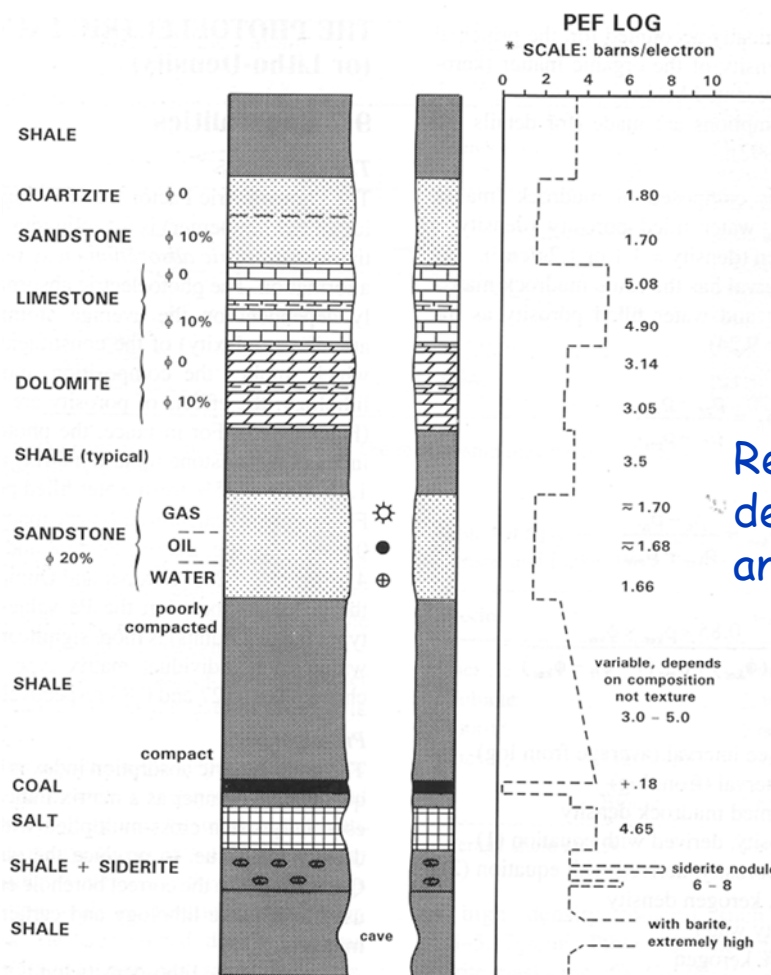
$$\rho_{ma} - \rho_f$$



Perfil de densidad
y porosidad
estimada

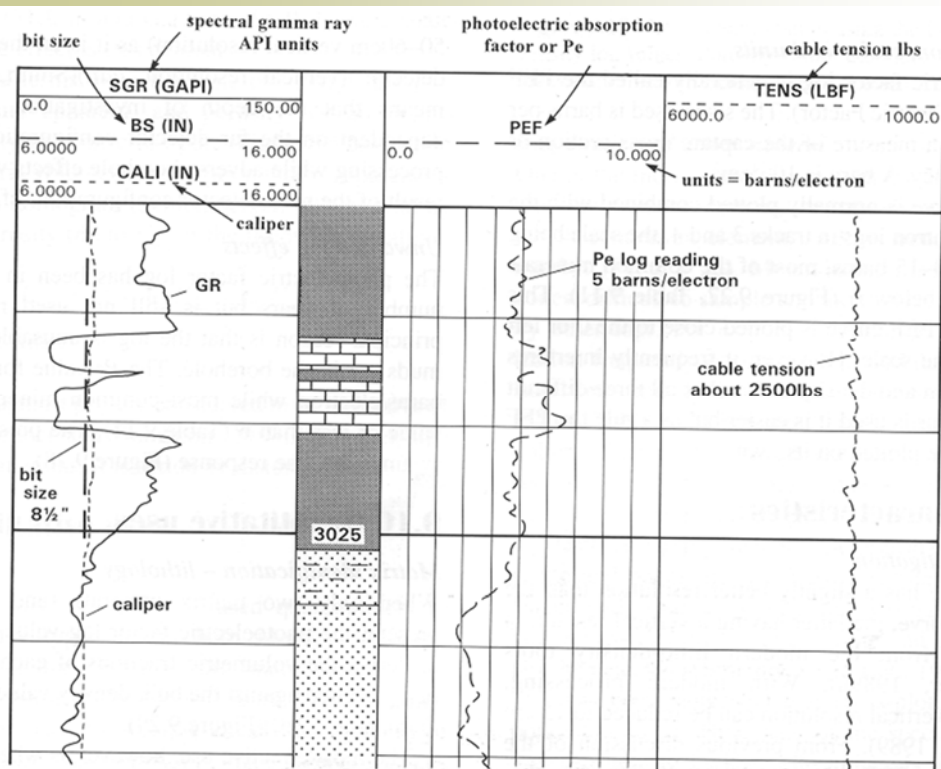
Valores típicos

Substance	ρ (g/cm ³)	ρ_e (g/cm ³)	Z/A	Pe (b/e)
quartz	2.654	2.650	0.499	1.806
calcite	2.710	2.708	0.500	5.084
dolomite	2.870	2.864	0.499	3.142
halite	2.165	2.074	0.479	4.65
gypsum	2.320	2.372	0.511	3.420
anhydrite	2.97	2.96	0.499	5.05
kaolinite	2.44	2.44	0.50	1.83
illite	2.64	2.63	0.499	3.45
barite	4.48	4.09	0.446	266.8
water (fresh)	1.000	1.110	0.555	0.358
oil	0.850	0.948	0.558	0.125

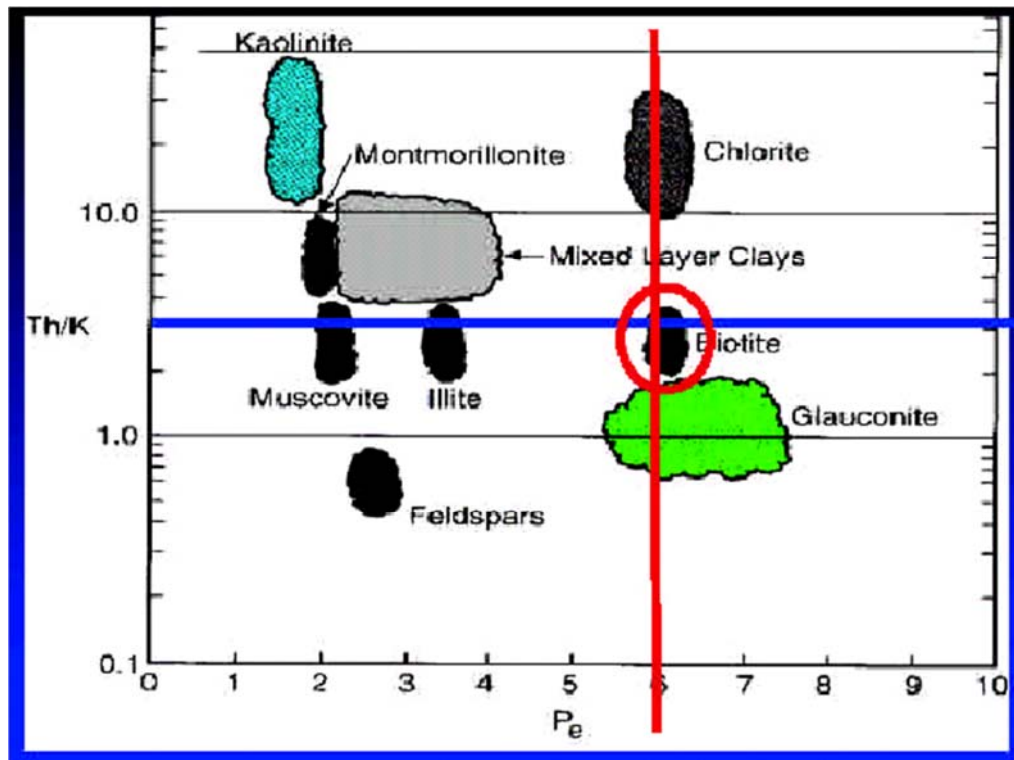


Respuesta típica del perfil de Efecto Fotoeléctrico ante litologías comunes

Encabezado de un perfil de Índice fotoeléctrico



Cross-Plot de Th/K-Pe



PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS

■ Apunte 5:

□ Perfil neutrónico

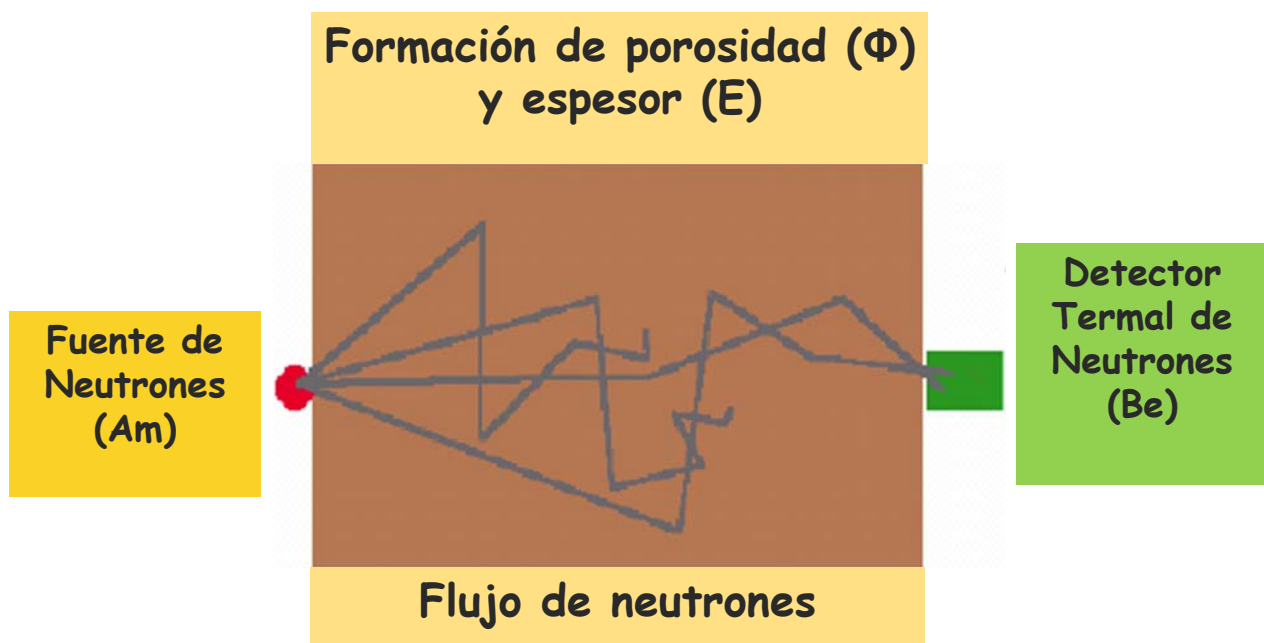
Las interacciones de neutrones

Después de penetrar en el pozo y en las formaciones, los neutrones comienzan a sufrir un proceso continuo de reducción de energía, como resultado del choque de los neutrones con los núcleos de los elementos presentes en el pozo y en la formación; con lo cual el neutrón pierde una parte de su energía cinética total cada vez que sufre una colisión. Como consecuencia de esto los neutrones alcanzan distintos niveles de energía, los cuales se pueden dividir en:

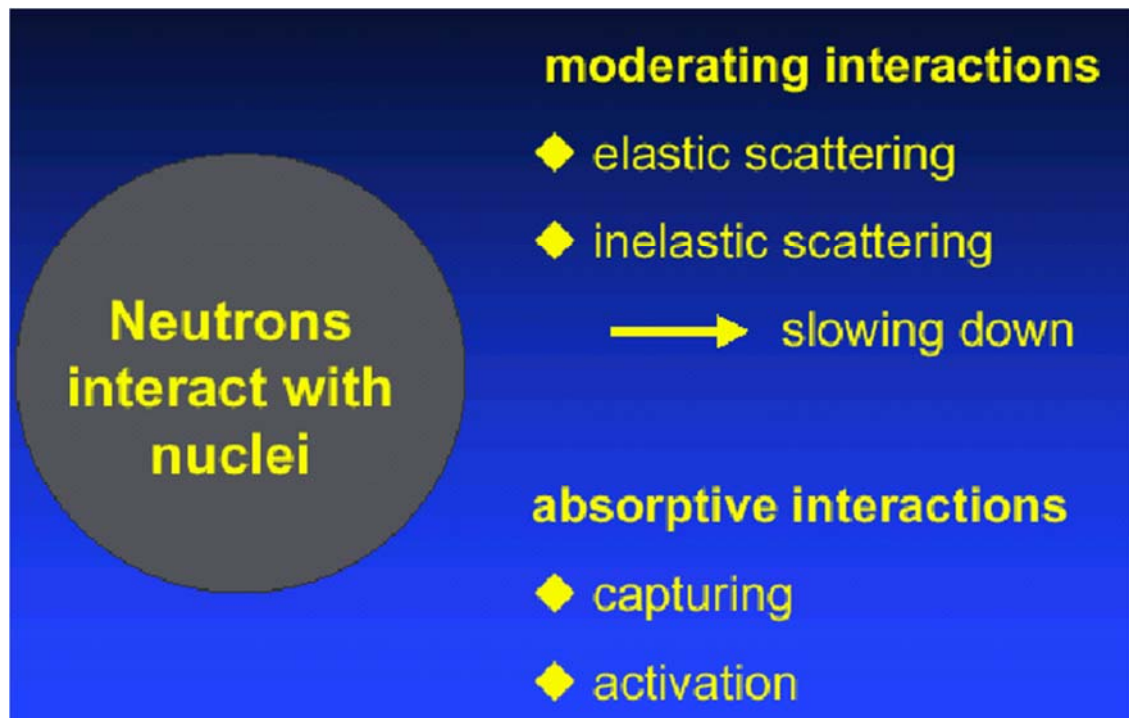
1. rápido = más de 100 Kev.
2. intermedio = de 100 ev a 100 Kev
3. lentos = menos de 100 ev
 - a: epitermales = de 0,1 a 100 ev
 - b: termal \approx 0,025 ev.

La pérdida de energía es una función del ángulo de colisión y la masa relativa del núcleo chocado.

Un experimento simple



Interacciones de los neutrones con la roca



Perdida de energía de los neutrones para algunos elementos

element	maximum energy loss/collision in %	number of collisions for slowing down from fast to thermal energy
hydrogen	100	18
carbon	28	115
oxygen	21	150
silicon	12	261
chlorine	10	316
calcium	8	371

Parámetros que afectan la respuesta de la herramienta neutrónica

Formation	Porosity Matrix Pore Fluid Fluid Salinity Temperature Pressure
Borehole Geometry	Borehole Diameter Borehole Shape Mudcake Thickness Standoff
Borehole Mud	Weight Solids Fluid type Fluid salinity Temperature Pressure

Perfil neutrónico compensado

Typical instrument configuration:

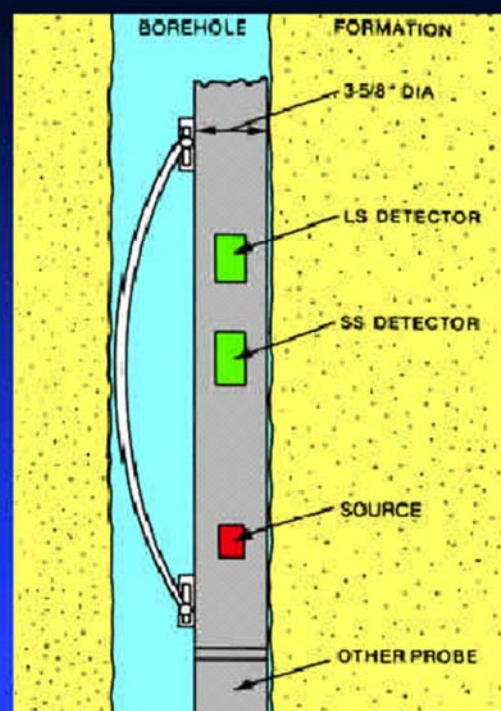
He³ detectors

Source AmBe

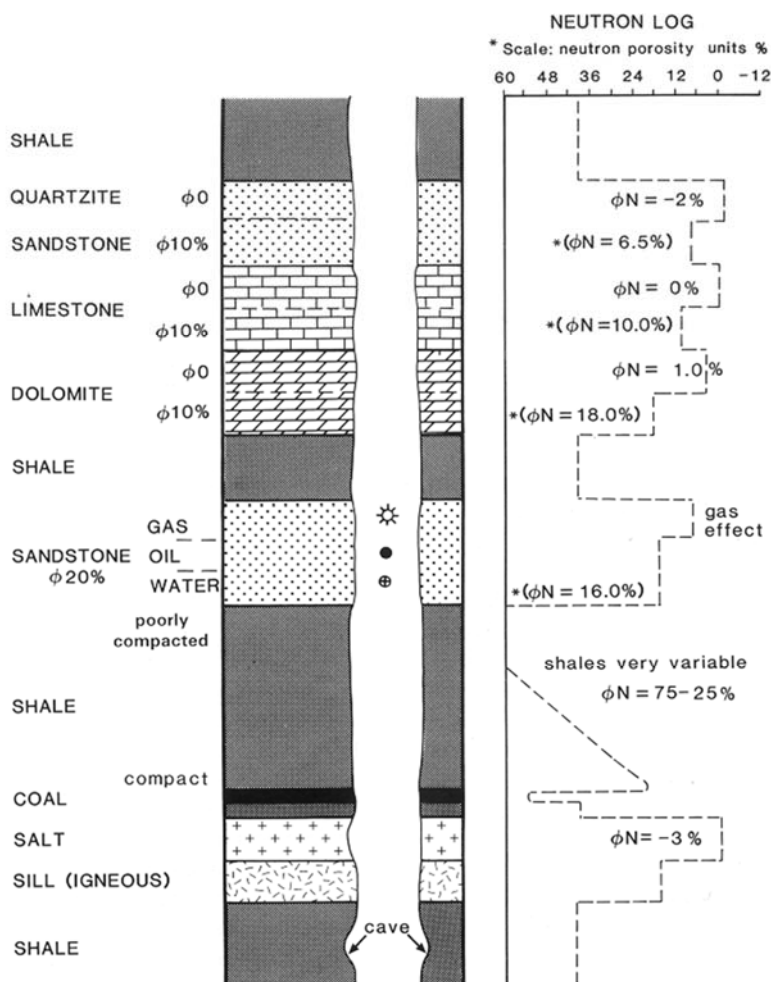
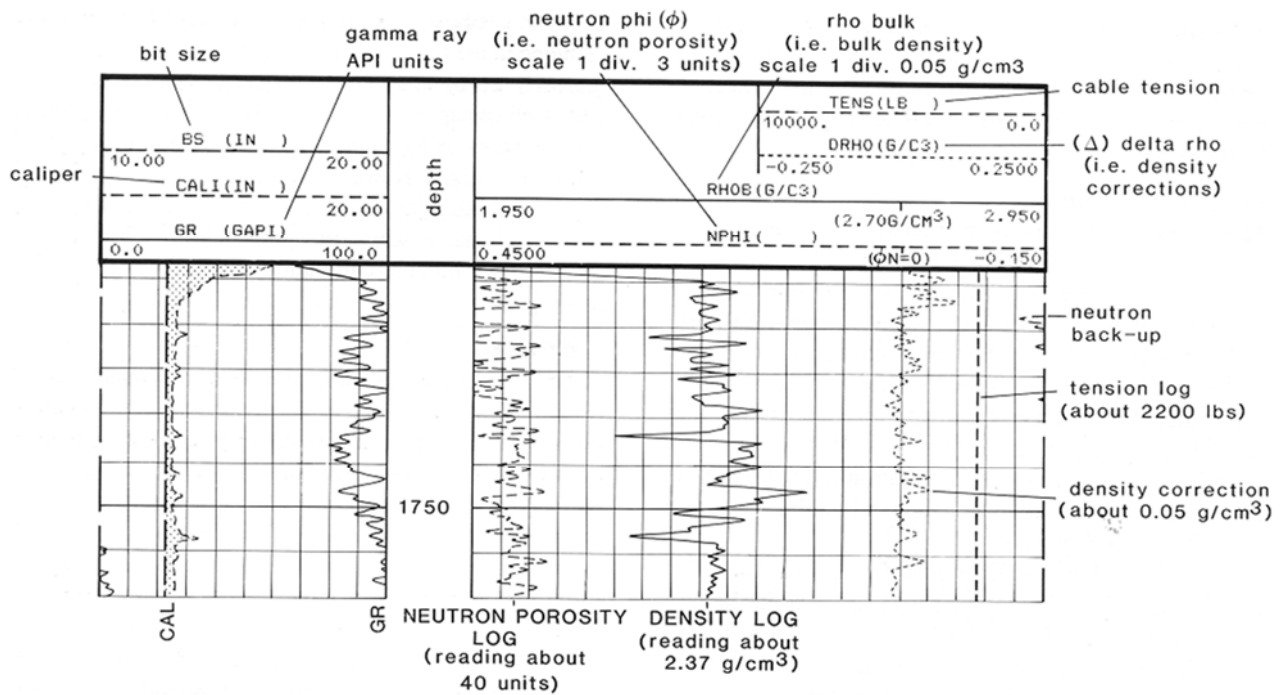
Strength 20 curie

Output 4.5 MeV Neutrons

Rate $\sim 4 \times 10^7$ Neutrons/sec



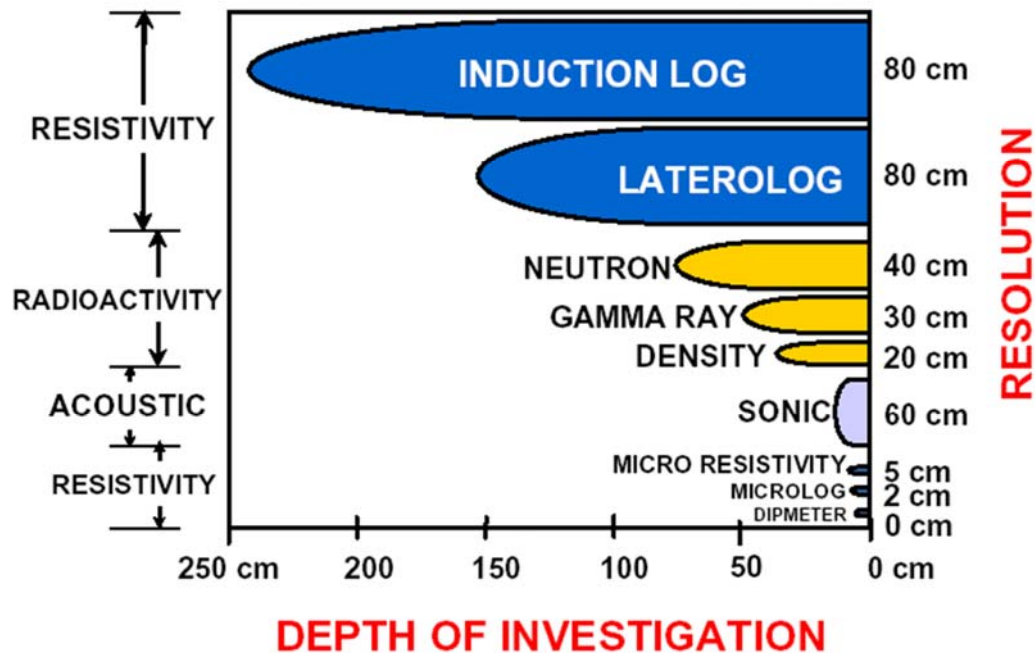
Encabezado típico de un perfil neutrónico



Respuesta del perfil neutrónico frente a algunas litologías comunes

Resolución y profundidad de investigación

Logging Tools



Tipos de perfiles neutrónicos

- 1) perfil neutrón-gamma (N-G).
- 2) perfil Neutrón-Neutrón Termal (N-NT).
- 3) perfil Neutrón-Neutrón Epitermal (N-NE).
- 4) perfil neutrónico epitermal de pared:
- 5) perfil neutrón lifetime:
- 6) perfil de activación neutrónica: incluye los perfiles denominados ACT y GST.

Aplicaciones de los perfiles neutrónicos:

→ Permite medir porosidad (especialmente en rocas calcáreas)

→ Brinda valores de porosidad total razonablemente seguros (excepto en zonas saturadas con gas)

Algunas aplicaciones del perfil neutrónico

	Discipline	Used for	Knowing
Quantitative	Petrophysics	Porosity	Matrix Hydrogen index
Qualitative	Petrophysics	Identification of gas	Lithology
	Geology	Lithology – shales	Gross lithology
		Evaporites	Neutron evaporite values
		Hydrated minerals	
		Volcanic and intrusive rocks	Calibration
		General lithology	Combined with density*

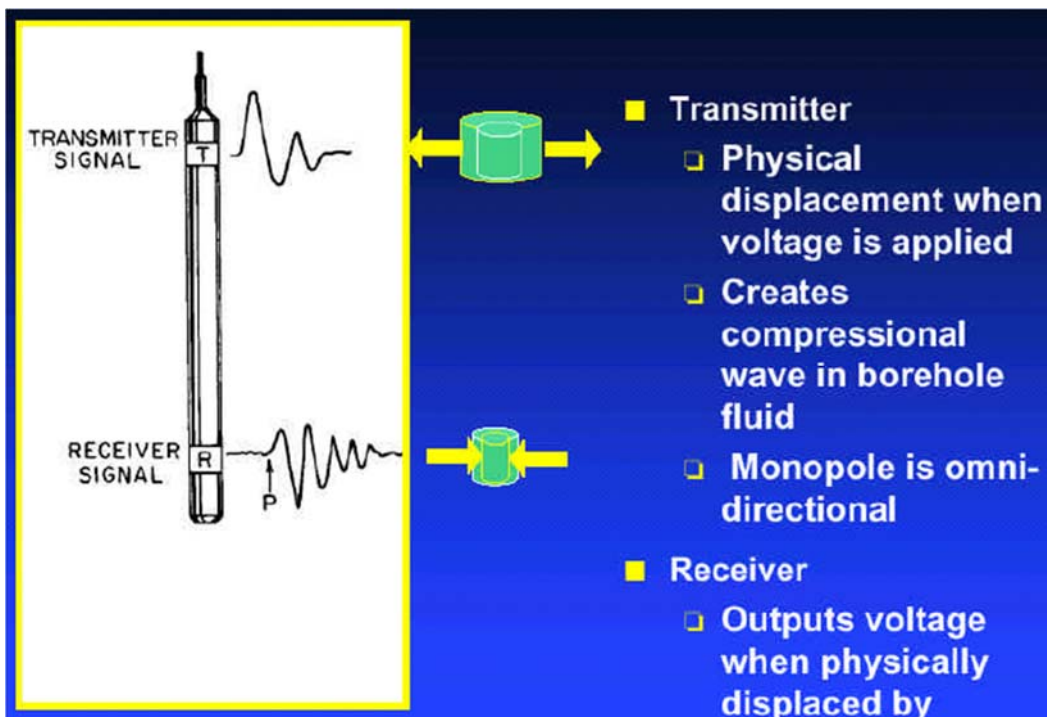
*using neutron log combined with density log on compatible scales.

PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS

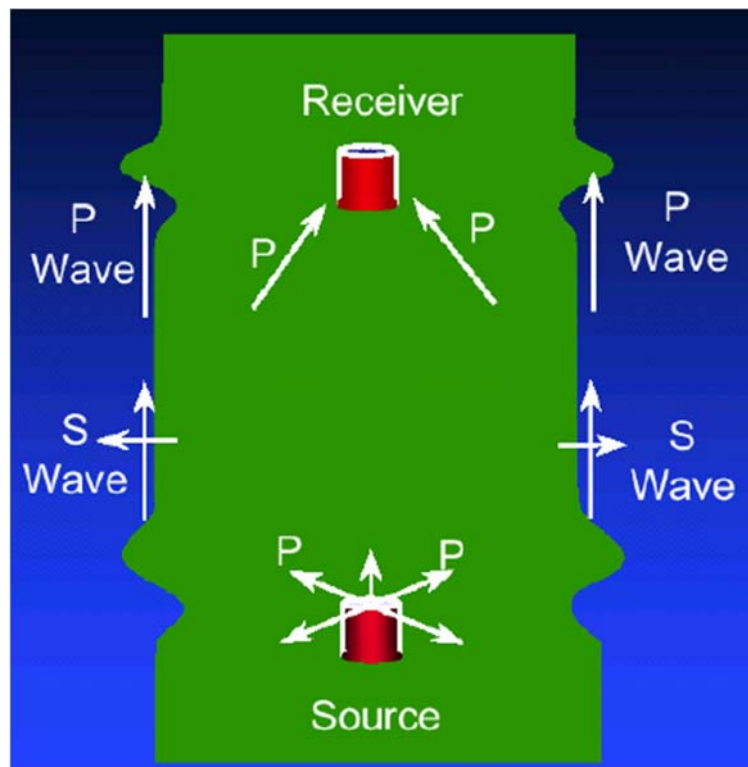
■ Apunte 6:

□ Perfil sónico o acústico

PRINCIPIOS BASICOS



Herramienta monopolo tradicional



Sistemas tradicionales de perfilaje sónico

1) RECEPTOR SIMPLE

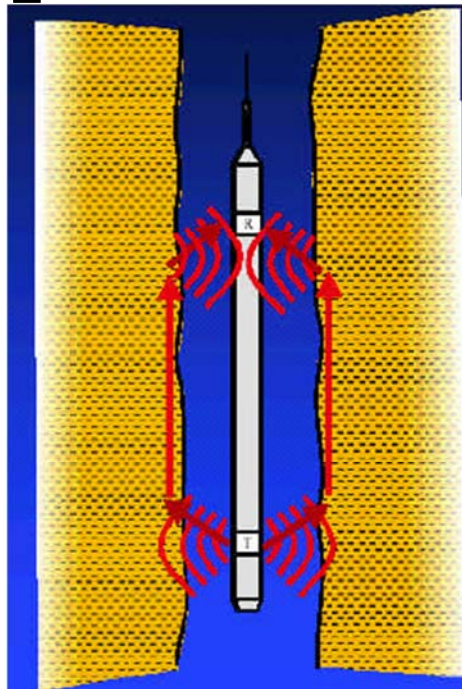
2) RECEPTOR DUAL

3) SISTEMA COMPENSADO

a) Transmisores y Receptores Duales

b) Transmisor Simple y Receptor Dual

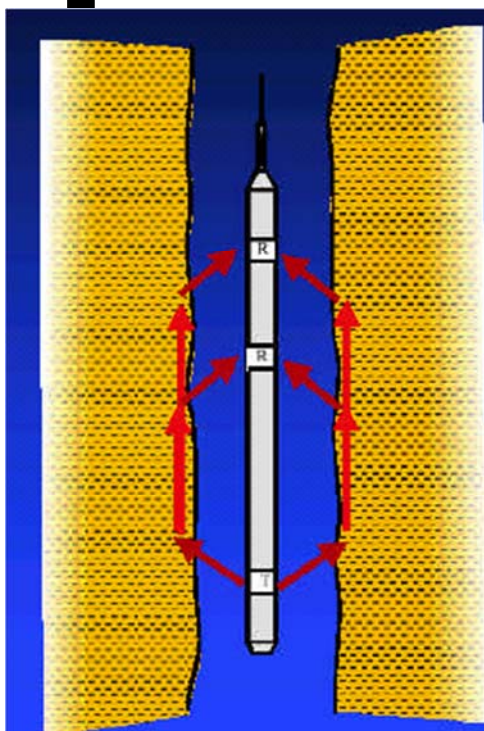
Herramienta de Transmisor simple- Receptor simple



Measured Transit time includes:

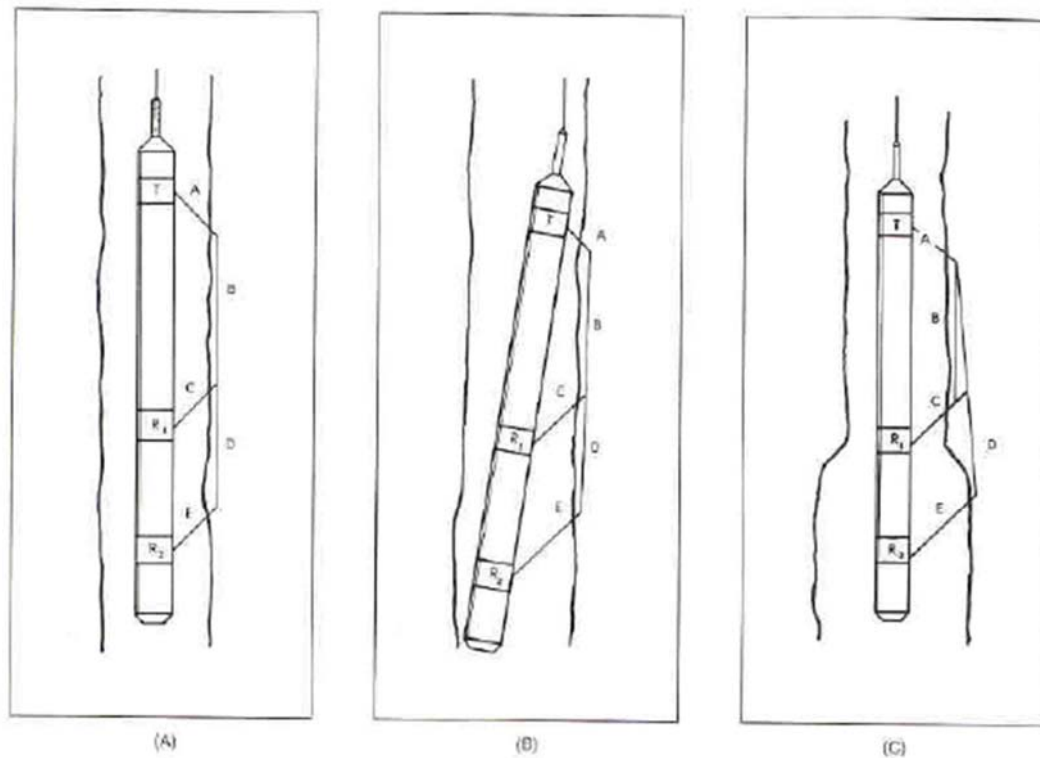
- wave travel through mud from transmitter to formation
- wave travel through formation
- wave travel through mud from formation to receiver

Herramienta de transmisor simple - receptor dual



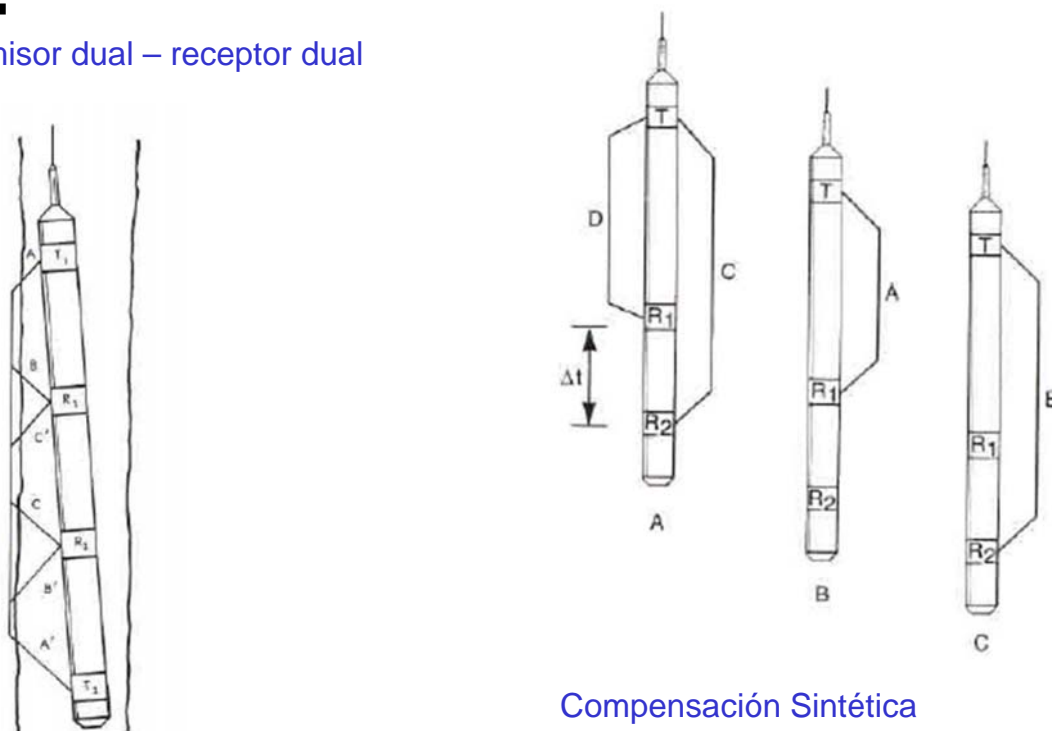
A two receiver tool can compensate for variations in borehole size.

Herramientas antiguas: Transmisor simple - receptor dual

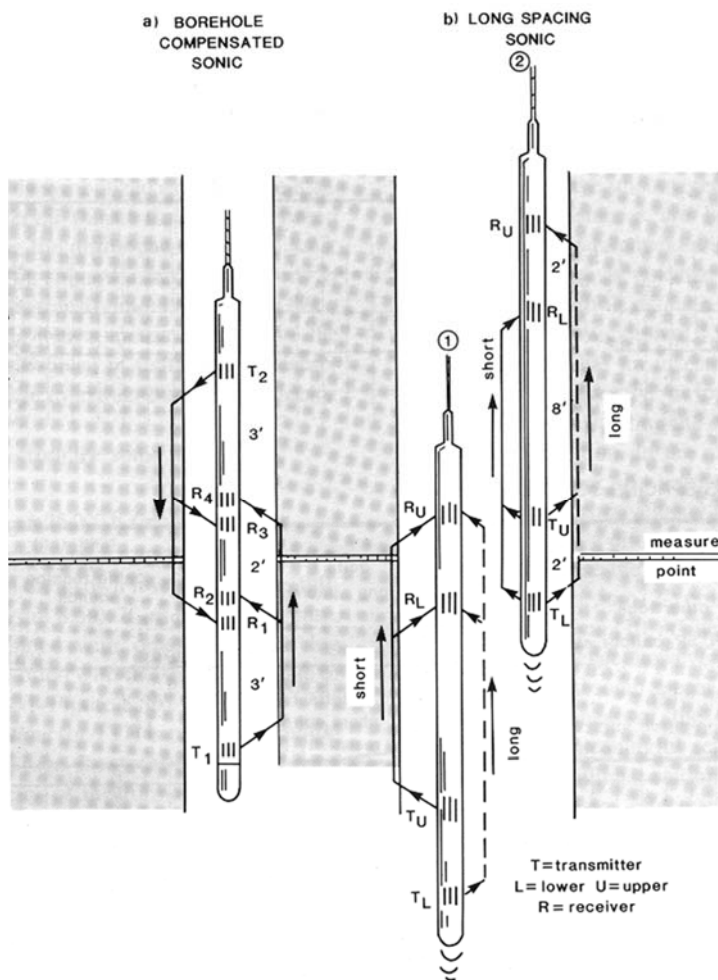


Herramientas antiguas

Transmisor dual – receptor dual



Compensación Sintética



Distintas herramientas de perfilaje sónico

Modelo intuitivo

(Wyllie et al. 1956)

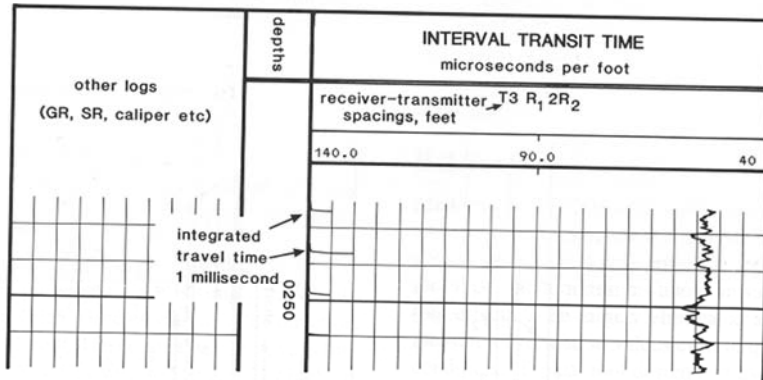


medium	distance	velocity	travel time
matrix	$1 - \phi$	$v_{matrix} = \Delta t_{matrix}^{-1}$	$(1 - \phi) \cdot \Delta t_{matrix}$
fluid	ϕ	$v_{fluid} = \Delta t_{fluid}^{-1}$	$\phi \cdot \Delta t_{fluid}$
rock, model	1	$v = \Delta t^{-1}$	Δt

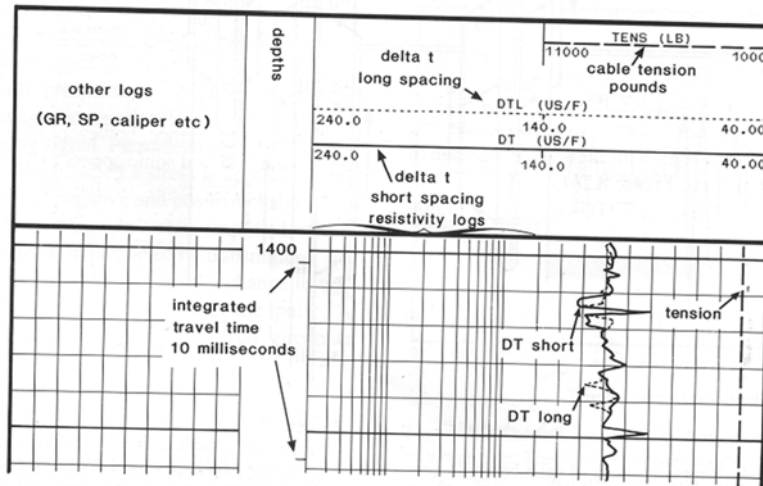
Addition of the partial travel times results in:

$$\Delta t = (1 - \phi) \cdot \Delta t_{matrix} + \phi \cdot \Delta t_{fluid}$$

(a) BOREHOLE COMPENSATED SONIC LOG



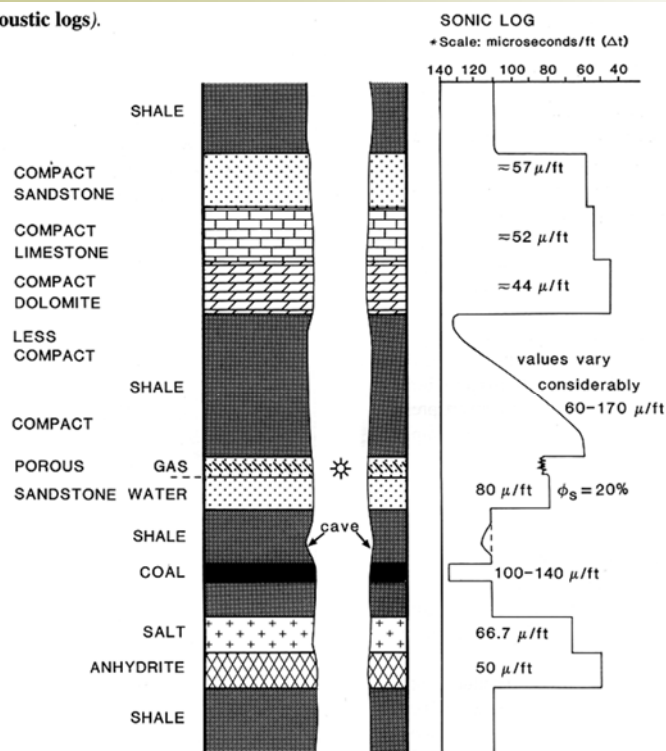
(b) LONG SPACING SONIC LOG



Distintas presentaciones del perfil sónico o acústico

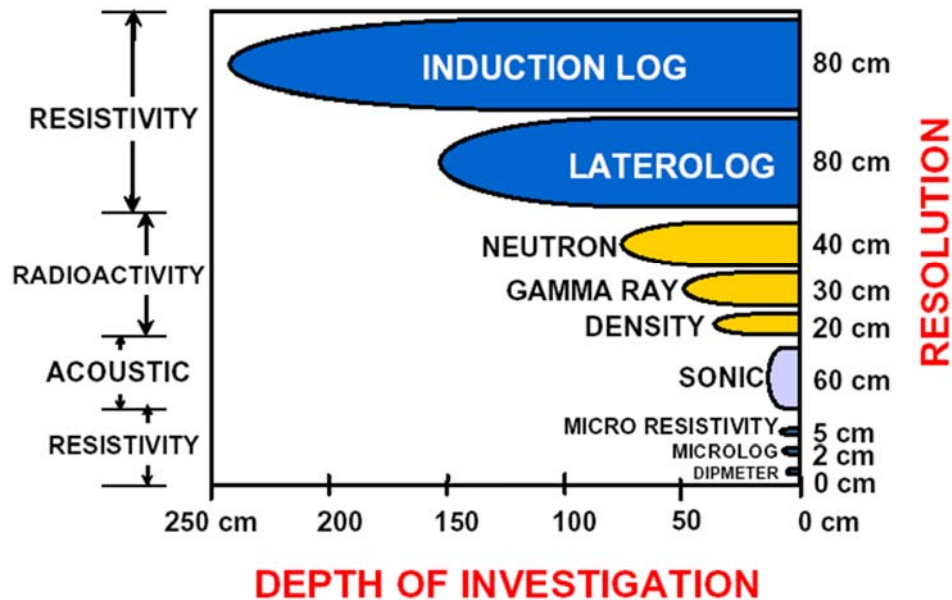
Algunas respuestas típicas del perfil sónico o acústico

(acoustic logs).



Profundidad de investigación y resolución vertical

Logging Tools



Porosidad Sónica

The basic equation for sonic porosity is the Wyllie Time Average Formula (strictly speaking, an empirical formula):

$$\Delta t_{\log} = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_{ma}$$

$$\phi = \frac{\Delta t_{\log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

Porosidad sónica

1. La porosidad del sónico es diferente de aquella de las herramientas de densidad o neutrónica.
2. La porosidad del sónico reacciona a la porosidad primaria solamente, por ejemplo, no “ve” las fracturas u oquedades.
3. La diferencia entre la porosidad sónica y la neutrón-densidad da un Índice de Porosidad Secundaria (SPI) que es una indicación de que muchos tipos de porosidad están en la roca.

Efecto de la compactación

- Gives good average porosity value for consolidated sediments;
- Does not consider influence of pressure differential;
- Needs corrections for unconsolidated sands : “compaction correction”;

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{matrix}}{\Delta t_{fluid} - \Delta t_{matrix}} \times \frac{1}{C_p} \quad C_p \text{ compaction coeff.}$$

- Needs correction for shale influence (laminated or dispersed shale correction).

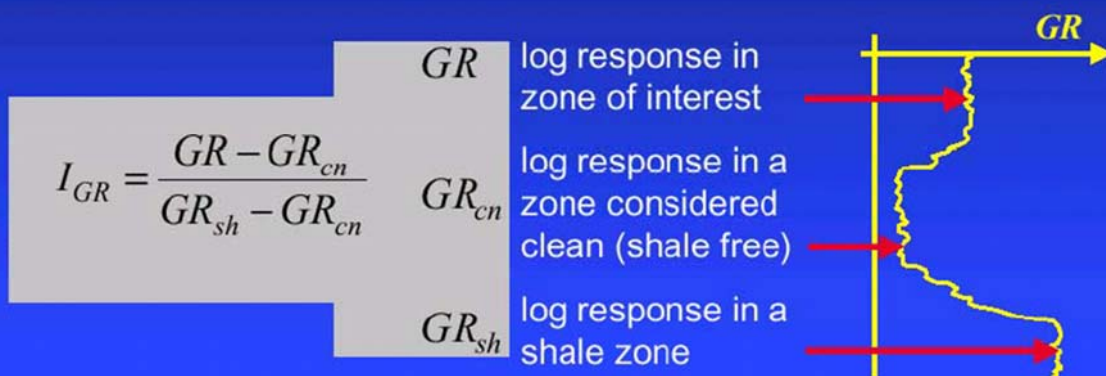
Principales usos del perfil sónico o acústico

	Discipline	Used for	Knowing
Quantitative	Petrophysics	Porosity	Matrix velocity Fluid velocity
	Seismic	Interval velocity	Integrated travel time Seismic markers Check shots
		Seismic calibration Acoustic impedance	Direct use of sonic log
Qualitative and semi-quantitative	Geology	Lithology	Matrix and mineral velocities
		Correlation	
		Texture	
		Fracture identification	Density log porosities
		Compaction and overpressure	Normal compaction trends
	Geochemistry	Source rock evaluation	Resistivity log values

Cálculo del índice de rayos gamma

- **Basis: correlation between shale content and gamma activity**
- **Assumption: only shale and clay are radioactive components in rock, no other radioactive minerals**

First step: Calculation of “gamma ray shale index”



Cálculo del volumen de arcillas

Second step: Select & apply a relationship I_{GR} vs. shaliness V_{sh}

$$V_{sh} = I_{GR}$$

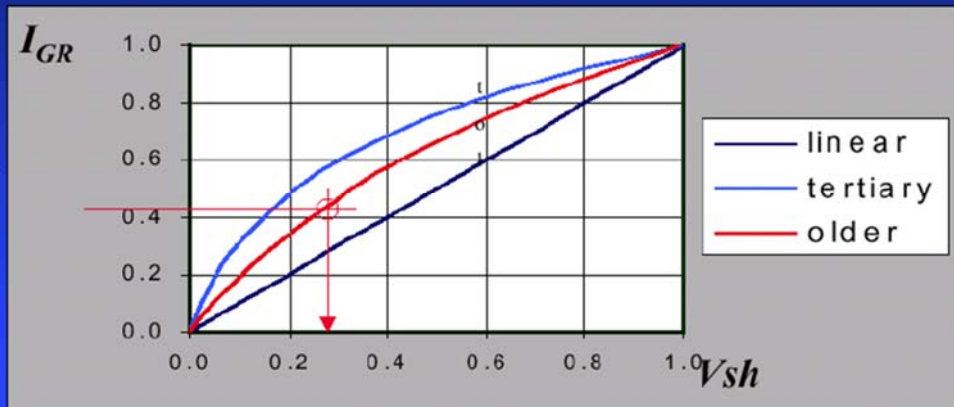
$$V_{sh} = 0.083 \cdot (2^{3.7 \cdot I_{GR}} - 1)$$

$$V_{sh} = 0.33 \cdot (2^{2 \cdot I_{GR}} - 1)$$

Linear relationship (upper limit)

Tertiary clastics (Larionov 1969)

Mesozoic & older rocks (Larionov 1969)



Ecuaciones para corregir la porosidad por el volumen de pelitas

Porosidad corregida del perfil de densidad

$$\Phi_{den} = \left(\frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \right) - V_{sh} \left(\frac{\rho_{ma} - \rho_{sh}}{\rho_{ma} - \rho_f} \right)$$

Porosidad corregida del perfil sónico

$$\Phi_{sonic} = \left(\frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \times \frac{100}{\Delta t_{sh}} \right) - V_{sh} \left(\frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right)$$

Donde:

Φ_{den} = porosidad obtenida del perfil de densidad

Φ_{sonic} = porosidad corregida del perfil sónico

ρ_{ma} = densidad de la matriz

ρ_{log} = densidad del tramo de interés

ρ_{sh} = densidad de las pelitas adyacentes

ρ_f = densidad del fluido

V_{sh} = volumen de las pelitas

Δt_{ma} = tiempo de tránsito de la matriz

Δt_{log} = tiempo de tránsito del intervalo de interés

Δt_f = tiempo de tránsito del fluido

Δt_{sh} = tiempo de tránsito de pelitas adyacentes

Ecuaciones para corregir la porosidad por el volumen de pelitas

$$\Phi_{Dcorr} = \Phi_D - \left[\left(\frac{\Phi_{Nclay}}{0.45} \right) \times 0.13 \times V_{sh} \right]$$

$$\Phi_{Ncorr} = \Phi_N - \left[\left(\frac{\Phi_{Nclay}}{0.45} \right) \times 0.30 \times V_{sh} \right]$$

$$\Phi_{N-D} = \sqrt{\frac{\Phi_{Ncorr}^2 + \Phi_{Dcorr}^2}{2.0}}$$

Donde:

Φ_D = porosidad obtenida del perfil de densidad

Φ_{Dcorr} = porosidad corregida obtenida del perfil de densidad

Φ_N = porosidad obtenida del perfil neutrónico

Φ_{Ncorr} = porosidad corregida obtenida del perfil neutrónico

Φ_{Nclay} = porosidad una arcilla adyacente obtenida del perfil neutrónico

La saturación efectiva en agua corregida por arcillosidad

También se puede determinar la saturación efectiva de agua calculando primero el factor de arcillosidad (q), este factor es igual a:

$$q = (\Phi_s - \Phi_d) / \Phi_s$$

Y con este valor podemos conocer S_{we} :

$$S_{we} = \frac{\left[\sqrt{\frac{0.8}{\Phi^2} \times \left(\frac{R_w}{R_t} \right) + \left(\frac{q}{2} \right)^2} - \left(\frac{q}{2} \right) \right]}{(1-q)}$$

Donde :

S_{we} = saturación efectiva en agua corregida por arcillosidad