

## *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  $\gamma$  resultante de radioactividad natural;

b) aquellos que emplean fuentes de rayos  $\gamma$  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 rayos gamma

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

### Perfiles de densidad

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

### Perfiles neutrónicos

## 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.

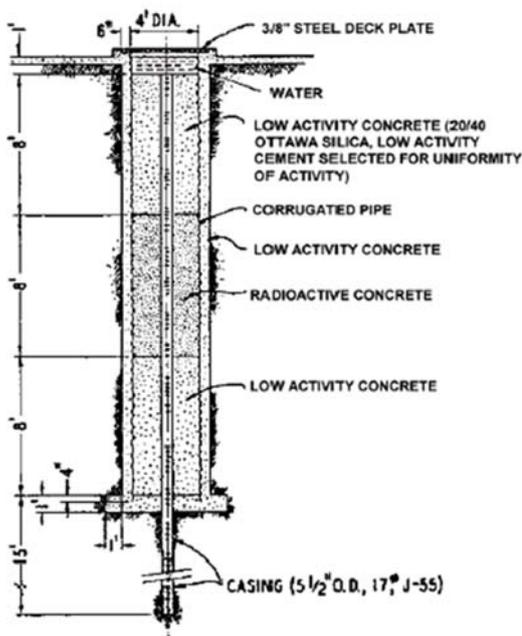
## Detectores de radiación

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

1, 2, y 3 se basan en el principio de la ionización de gases causada por la incidencia de rayos gamma. Mientras que 4) utiliza la capacidad de los rayos gamma de producir pequeños destellos de luz a medida que se van consumiendo dentro de ciertos cristales. Estos destellos o centelleos son luego convertidos en pulsos eléctricos.

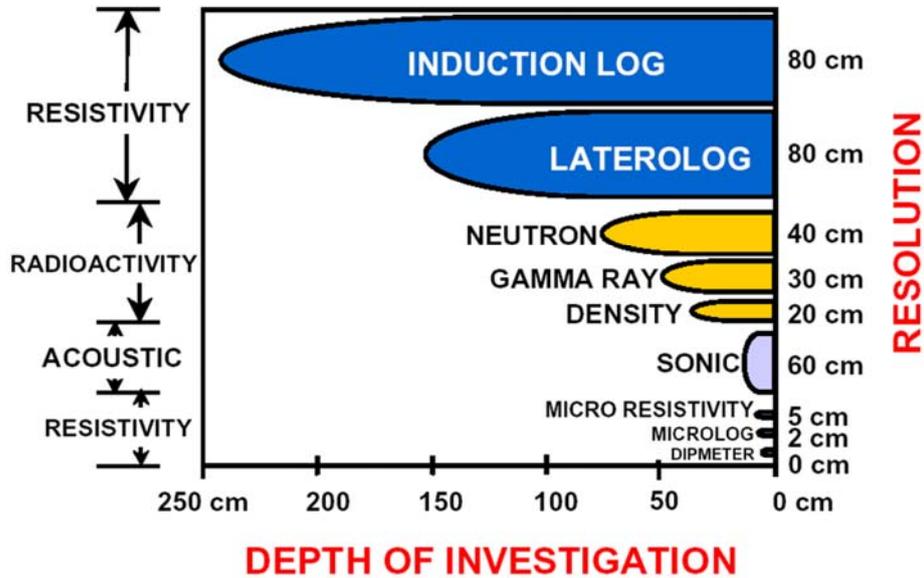
El primer tipo de detector ya no se usa. En el caso de 2) y 3) solo se usan en herramientas miniaturizadas; en cambio los detectores de centelleo son los que se utilizan normalmente en perfilaje de pozo, pero no en pozos de pequeño diámetro por problemas de protección del detector.

## Calibración del detector de rayos gamma



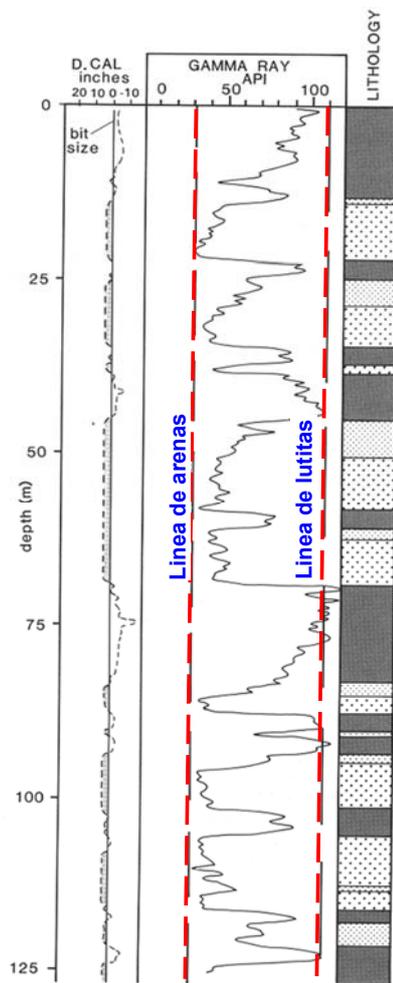
Profundidad de investigación y resolución vertical.

Logging Tools



Encabezado típico del perfil de rayos gamma

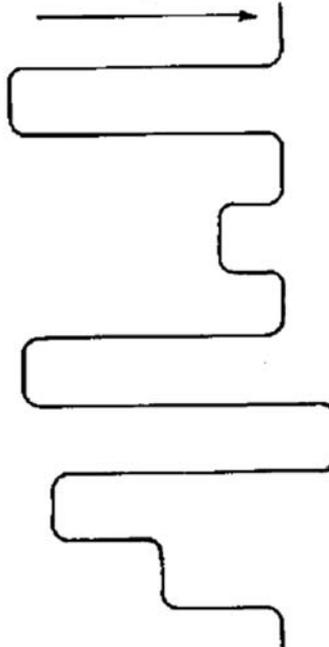
other logs (SP, caliper etc.) GAMMA RAY (API)	depths (m)	other logs (resistivity, sonic, density neutron etc.)
0.0 100.0		
gamma-ray log (reading about 70 API)	1400	



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

Shale

Salt or Anhydrite

Shale

Sandy Shale

Shale

Limestone

Black Marine Shale

Sandstone

Shaly Sand

Shale

## Aplicaciones del perfil de rayos gamma

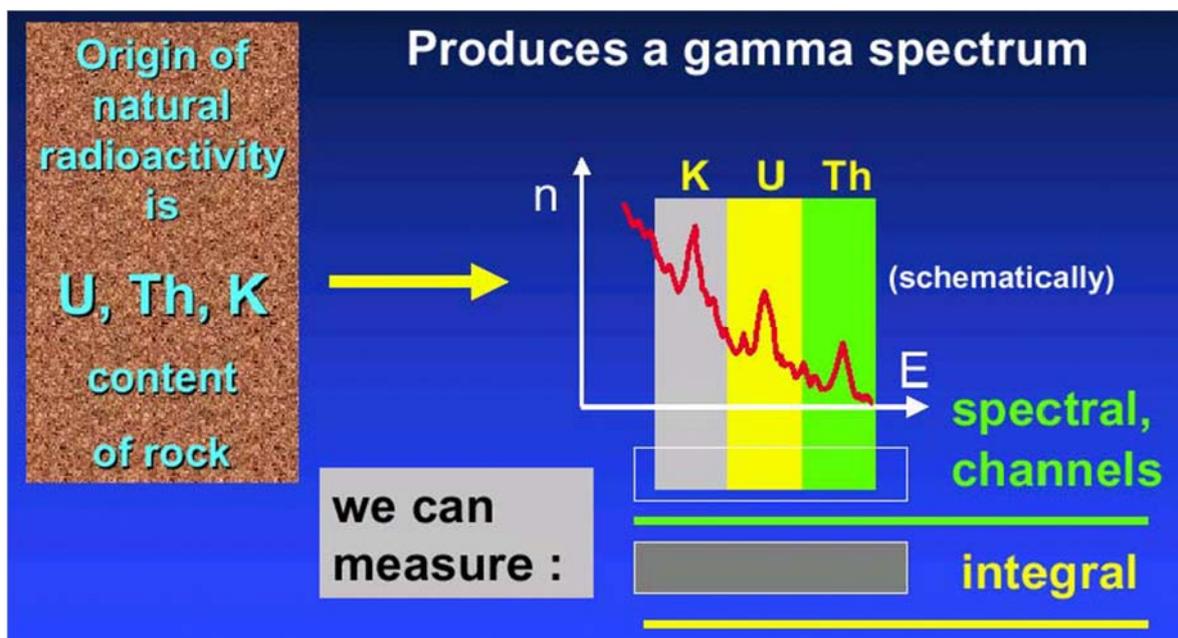
- 1) Identificación de litologías
- 2) Identificación de estratos potencialmente productivos
- 3) Da información sobre espesores de capas
- 4) Da información sobre el índice de permeabilidad
- 5) Usándose para obtener registros a través de cañerías, y en combinación con un registro de cuplas, permite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

## Principales usos del perfil de rayos gamma

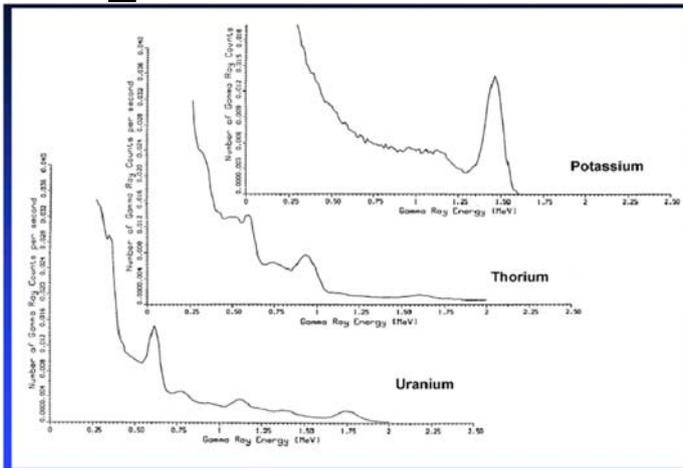
	Discipline	Used for	Knowing
Quantitative	Petrophysics	Shale volume ( <i>V<sub>sh</sub></i> )	gamma ray (max) gamma ray (min)
Qualitative	Geology	Shale (shaliness)	gamma ray (max) gamma ray (min)
		Lithology	typical radioactivity values
		Mineral identification	Mineral radioactivity
	Sedimentology	Facies	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

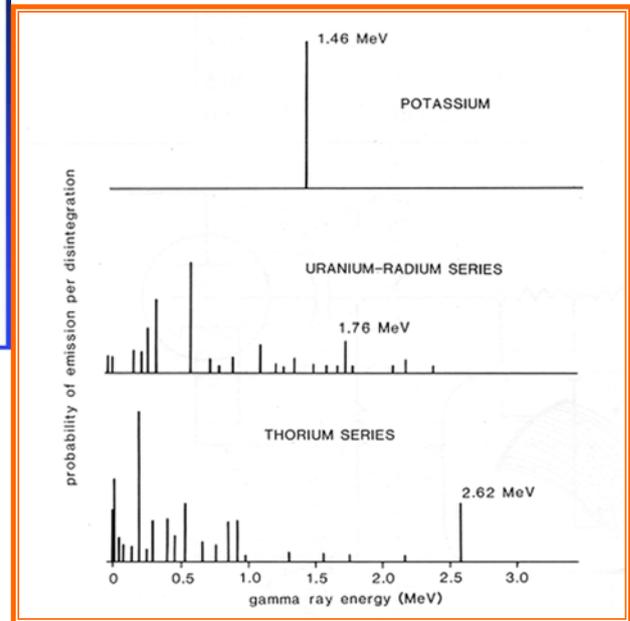


## Espectros de emisión del U, Th y K



Espectros de emisión de rayos gamma de minerales radiactivos naturales

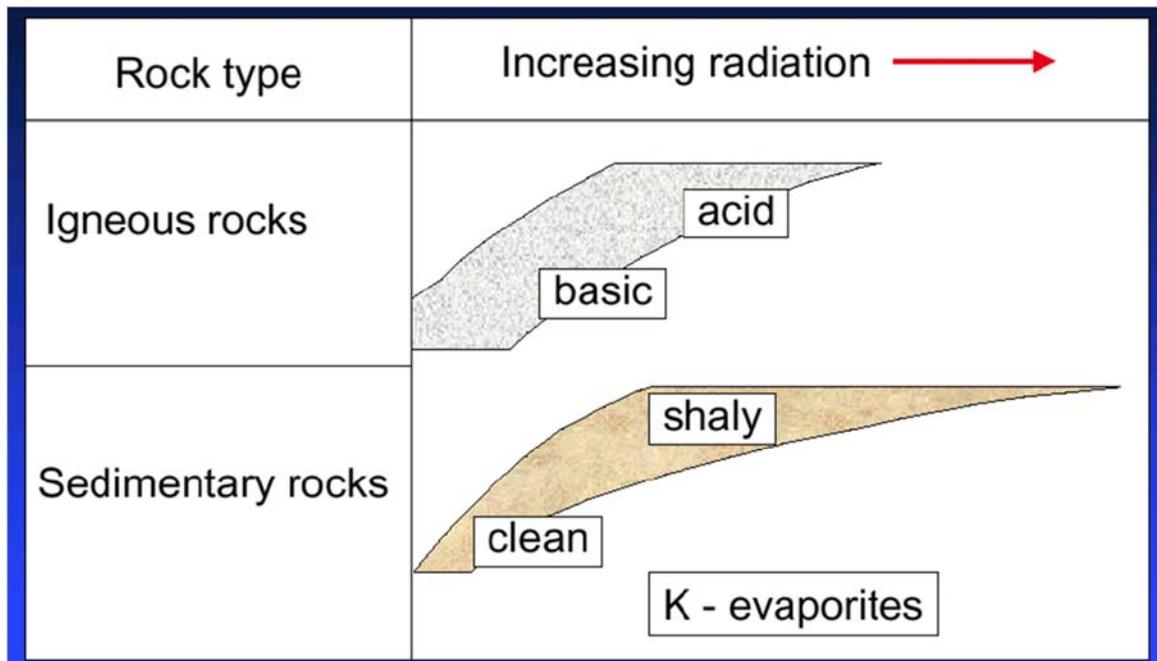
Principales picos usados para identificar cada fuente de emisión.



## Emisión de rayos gamma de algunos minerales

Mineral	$\gamma$ - 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

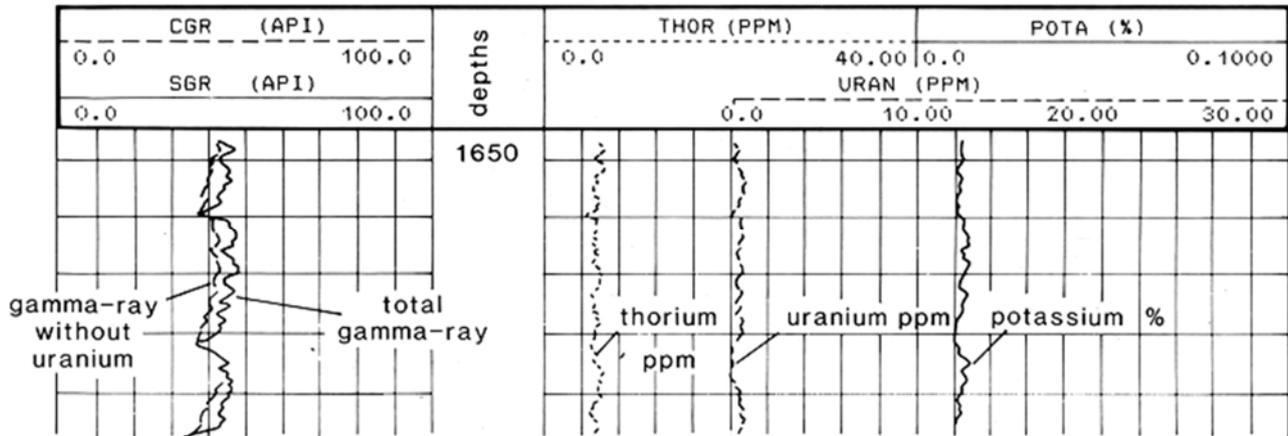
2) Rayos Gamma emitidos por:

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

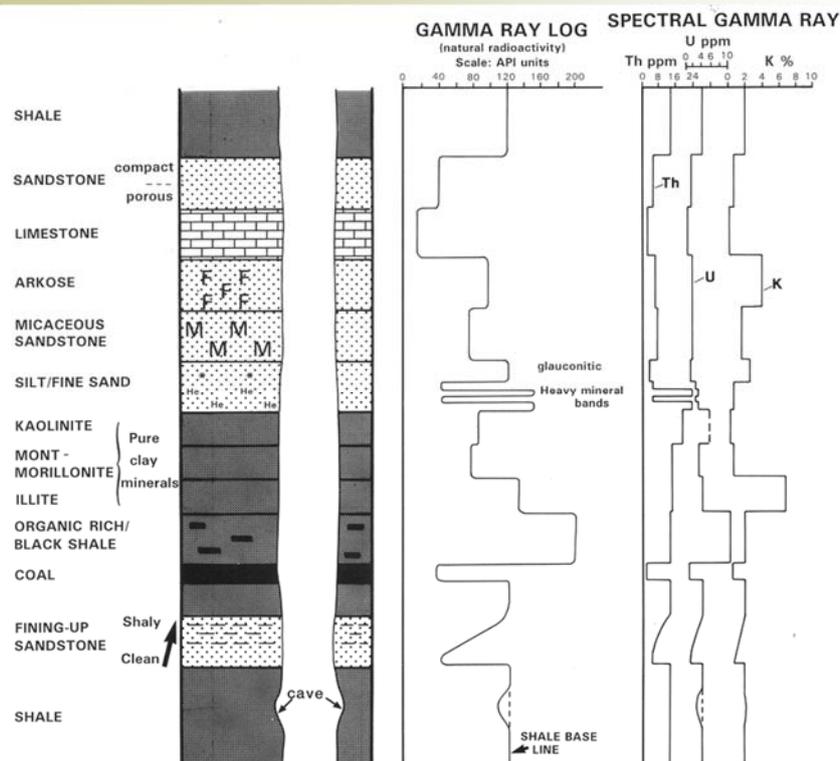
b) Torio a través de su nucleótido Talio ( $Tl^{208}$ ) a 2,614 Mev.

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

## Encabezado típico del perfil de espectroscopía de rayos gamma

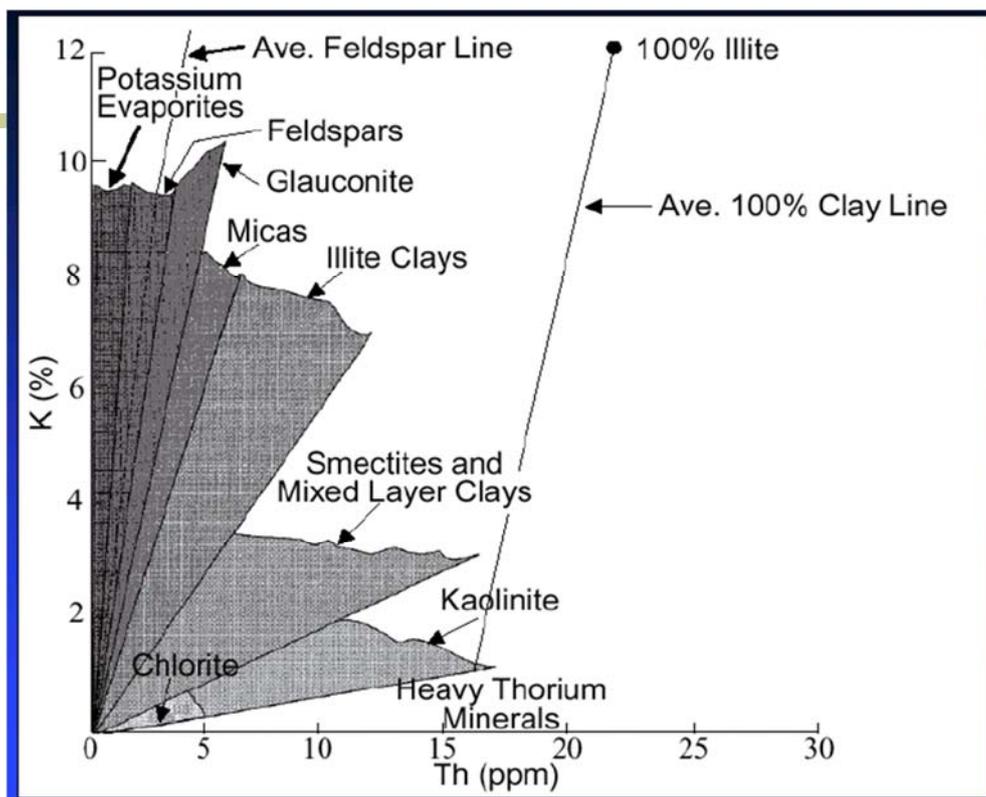


## Algunas respuestas típicas de los perfiles de rayos gamma y de espectroscopía de rayos gamma



## 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

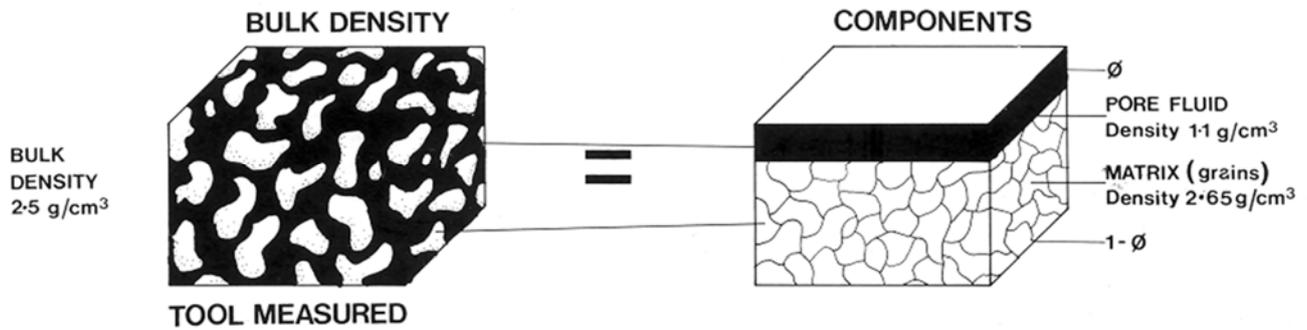
$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Unidades:  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{kg/m}^3$

Hay que distinguir entre:

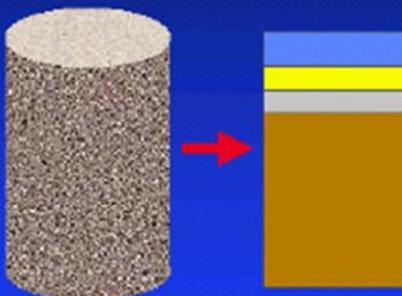
- Densidad de la roca, densidad total (ej. Arenisca)
- Densidad del material sólido de la matrix (ej. Cuarzo)
- Densidad de los fluidos en los poros (ej. Agua)

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 volumetric  
rock model

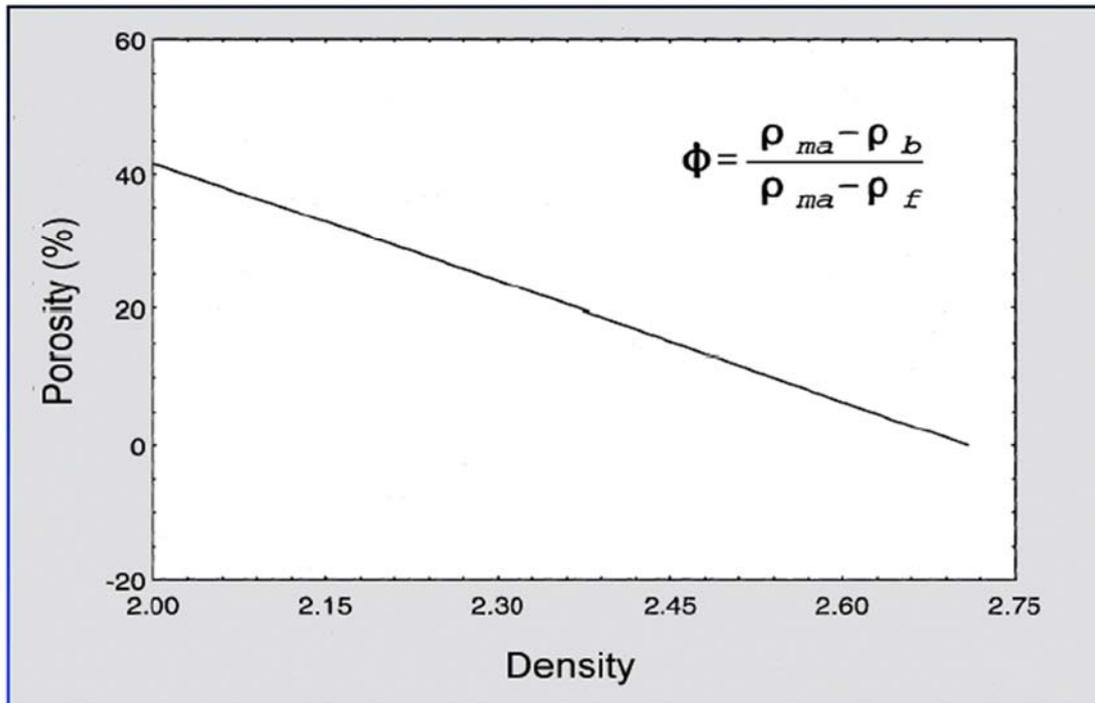


$$\rho_{rock} = (1 - \phi) \cdot \rho_{matrix} + \phi \cdot \rho_{pore}$$

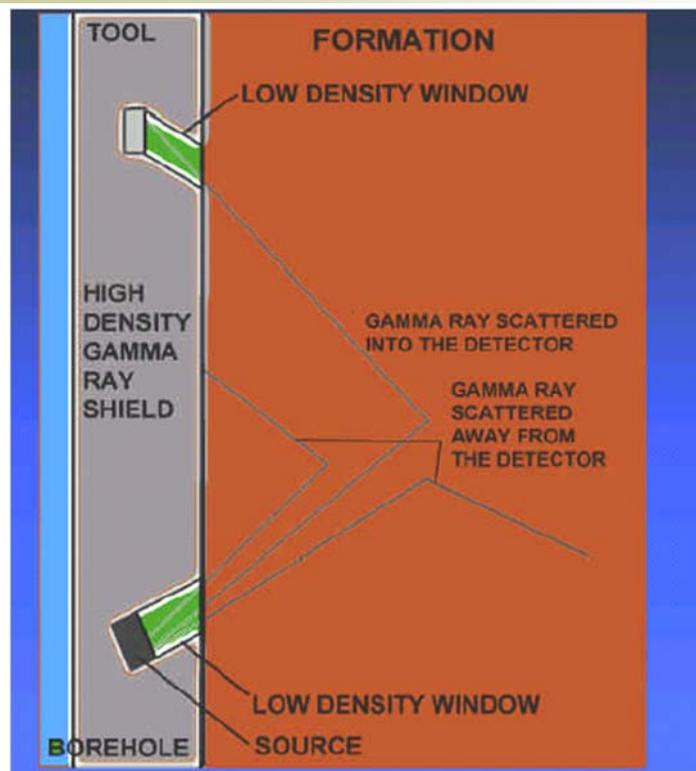
$$\rho_{rock} = (1 - \phi) \cdot \rho_{matrix} + \phi \cdot (S_{water} \cdot \rho_{water} + S_{oil} \cdot \rho_{oil} + S_{gas} \cdot \rho_{gas})$$

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

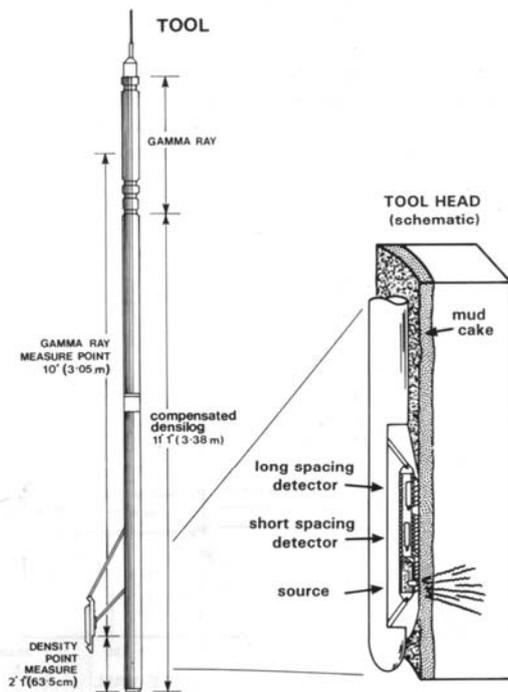
## Relación entre densidad y porosidad



## Mediciones en el pozo



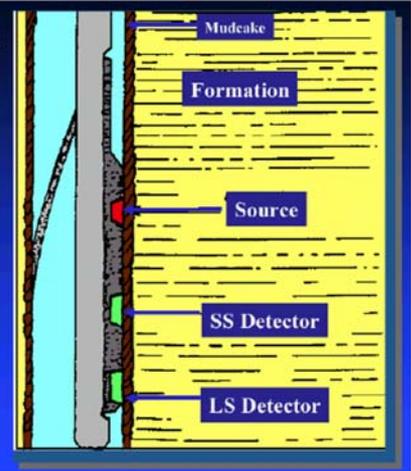
## Típica configuración de la herramienta de densidad



Typical instrument configuration:

NaI detectors

Source  $\text{Cs}^{137}$   
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

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

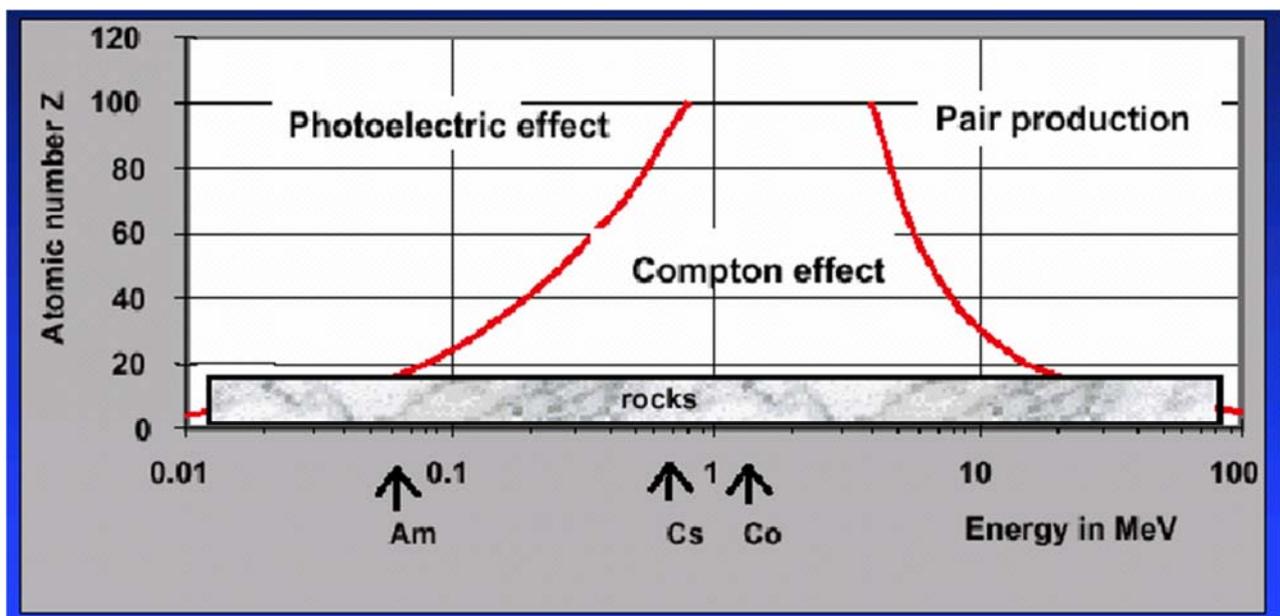
$\sum Z = N^\circ$  de electrones por molécula

$\sum M =$  masa atómica total por molécula

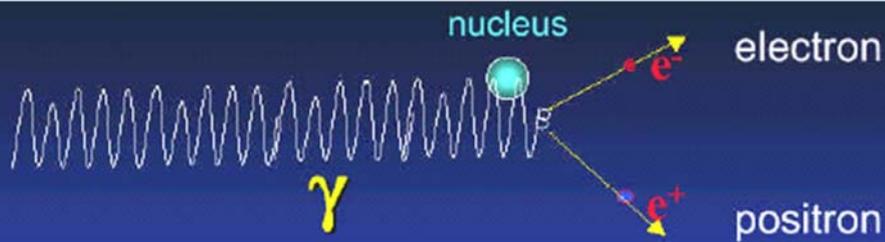
$\rho_e =$  Densidad electrónica

$\rho_b =$  Densidad

## Mecanismo de absorción de rayos gamma



## Producción de pares



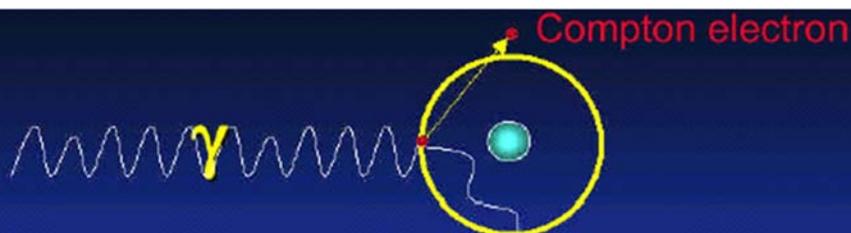
An incident **high-energy** gamma photon (gamma ray energy  $> 1.02 \text{ MeV}$ )<sup>1</sup> can be converted into a electron - positron pair when it is near a nucleus.

The electron slows down

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

<sup>1</sup> 1.02 MeV is exactly twice the rest mass of an electron ( $mc^2$ )

## Efecto Compton

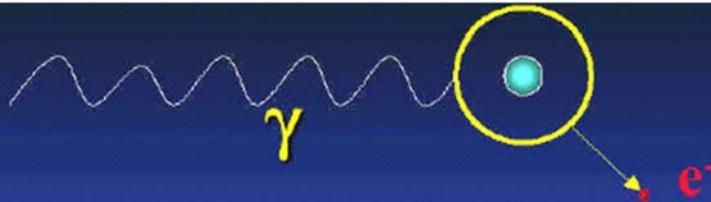


An incident **intermediate-energy** gamma photon (gamma ray) collides with an atom:

- 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  $Z^{3.6}$

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

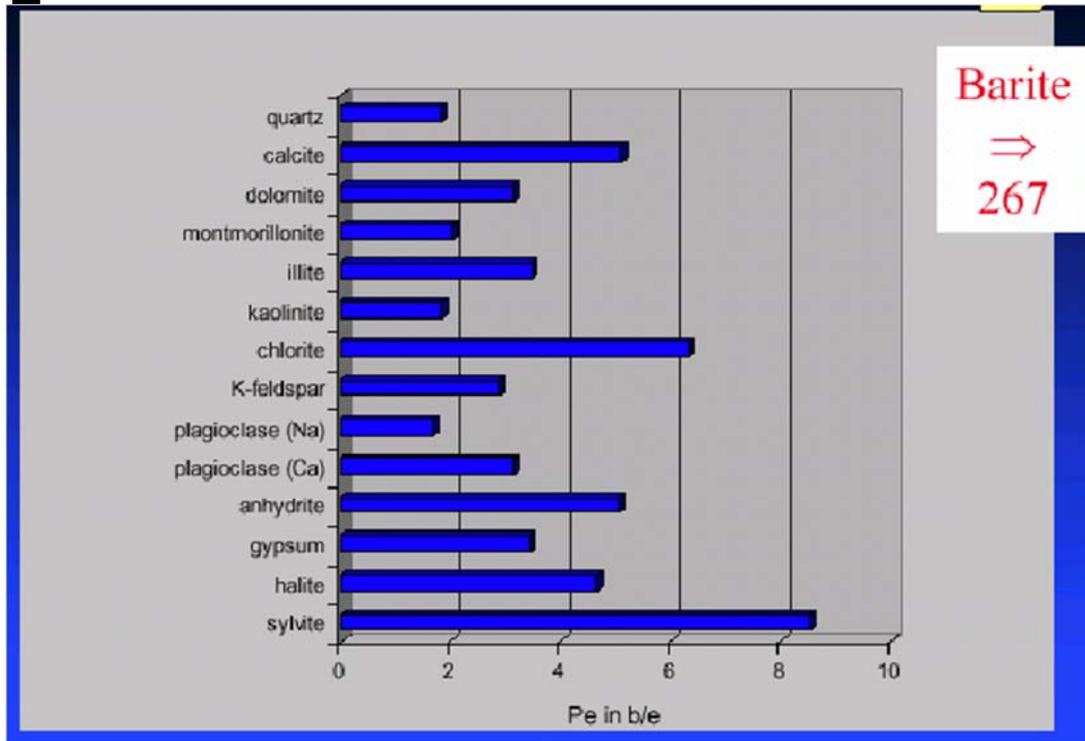
on this basis a effective photoelectric index  $Pe$  (average photoelectric cross section per electron) is defined:

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

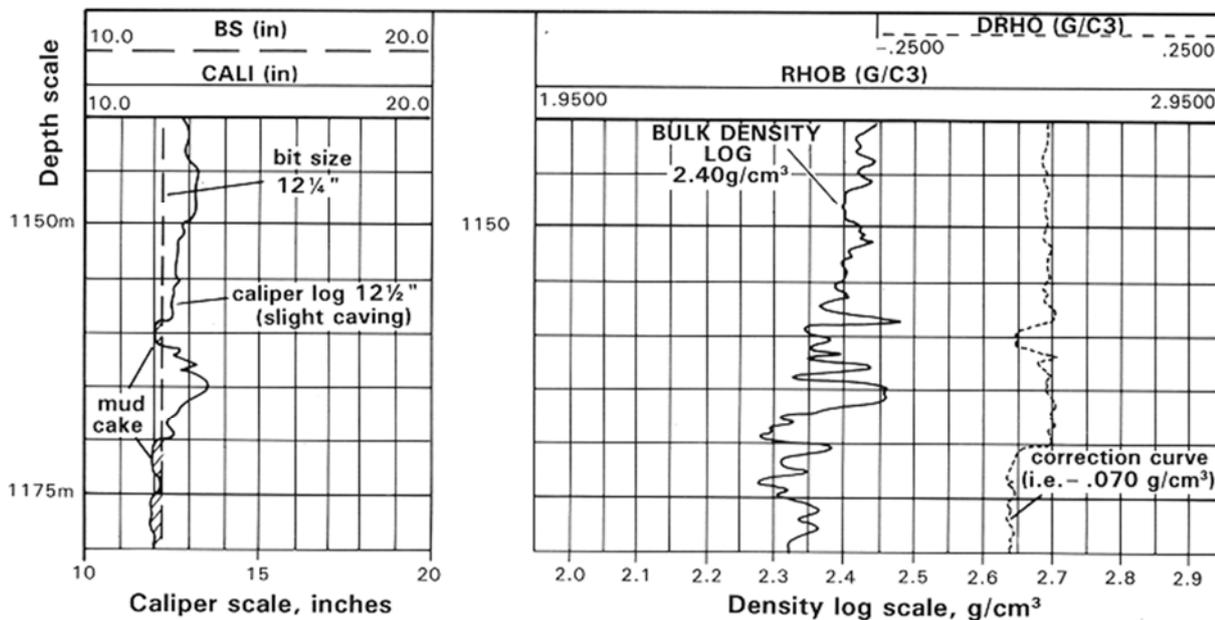
$Pe$  depends on **elemental composition (lithology)** - see table.

$Pe$  - unit: b/e barns per electron

## Pe para Minerales

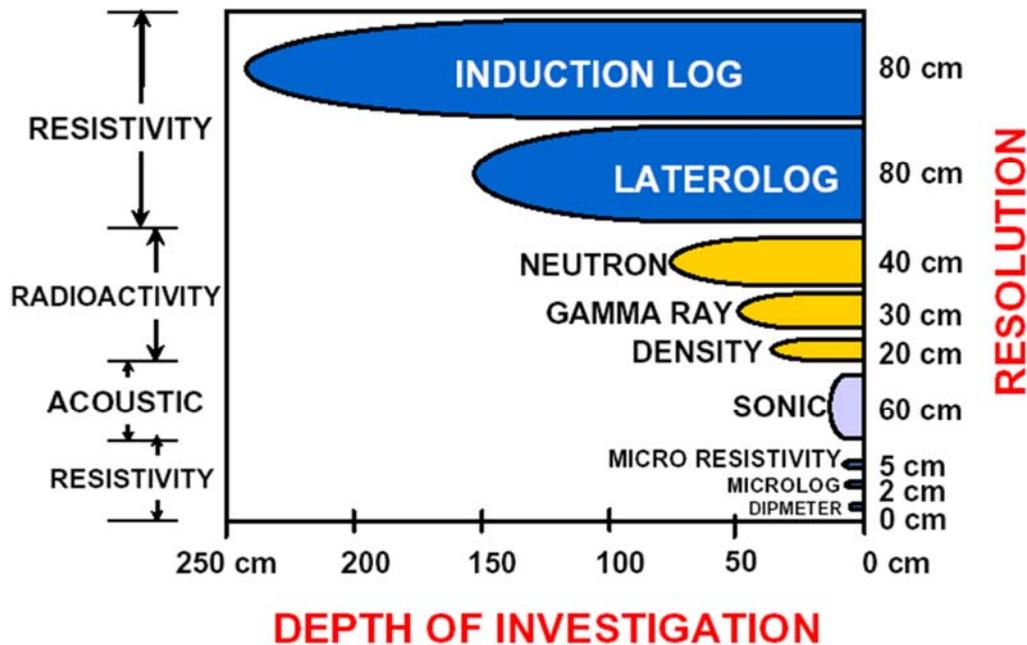


## Encabezado de un perfil de densidad



## 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  $\rho_b$  = densidad obtenida del perfil

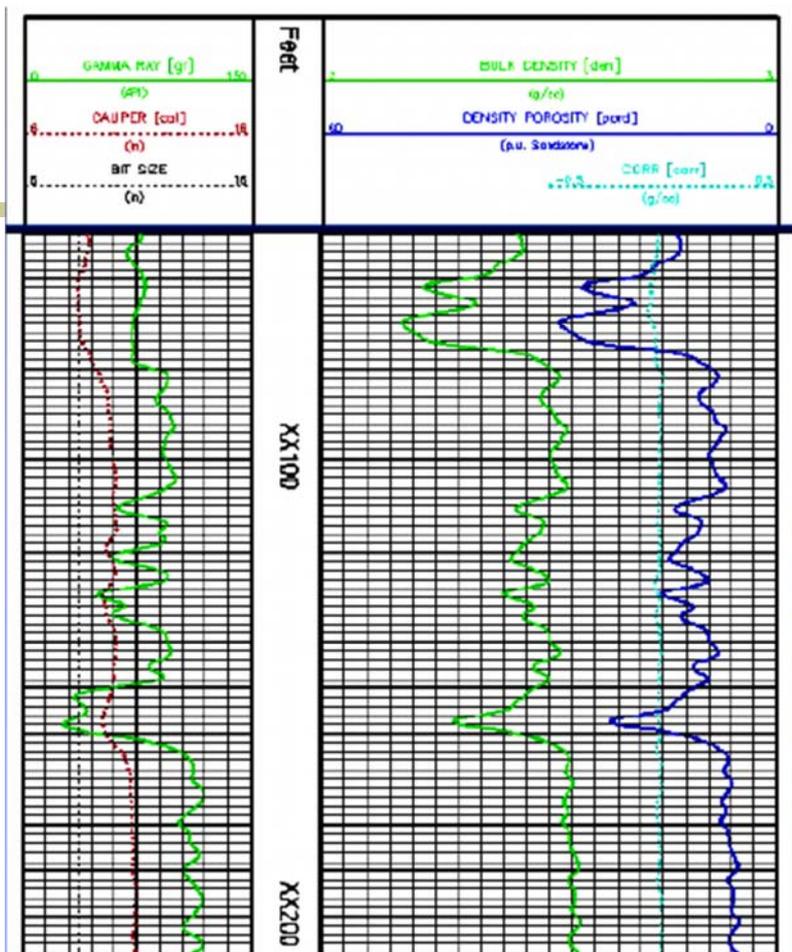
$\phi$  = porosidad

$\rho_f$  = densidad del fluido poral

$\rho_{ma}$  = densidad de la matriz rocosa

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

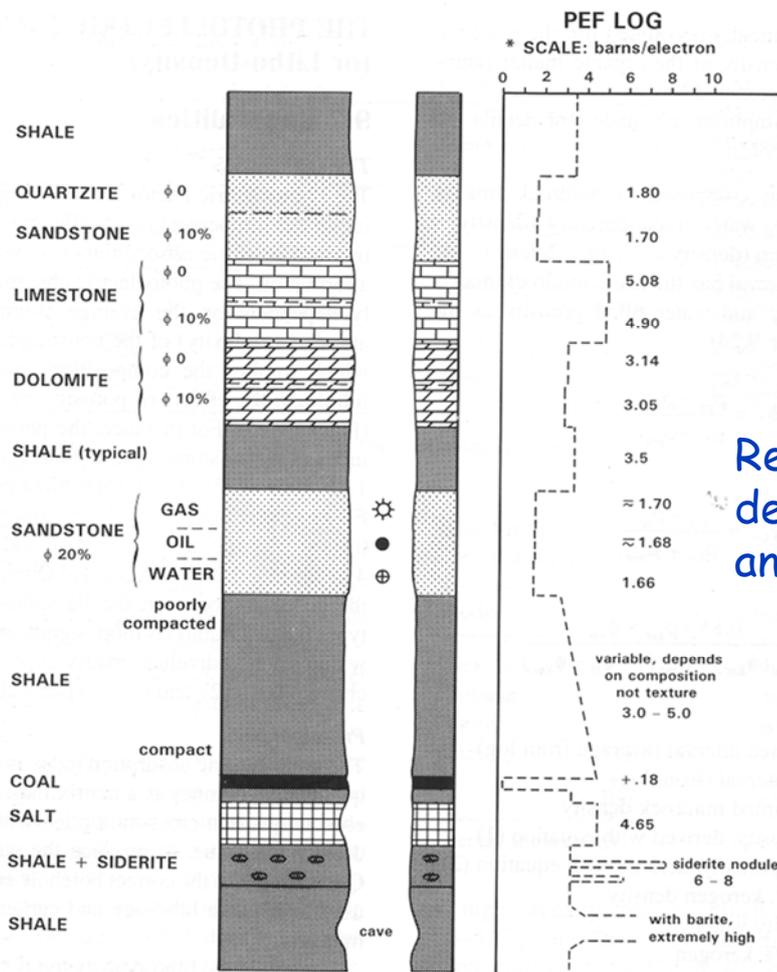
$$\rho_{ma} - \rho_f$$



Perfil de densidad  
y porosidad  
estimada

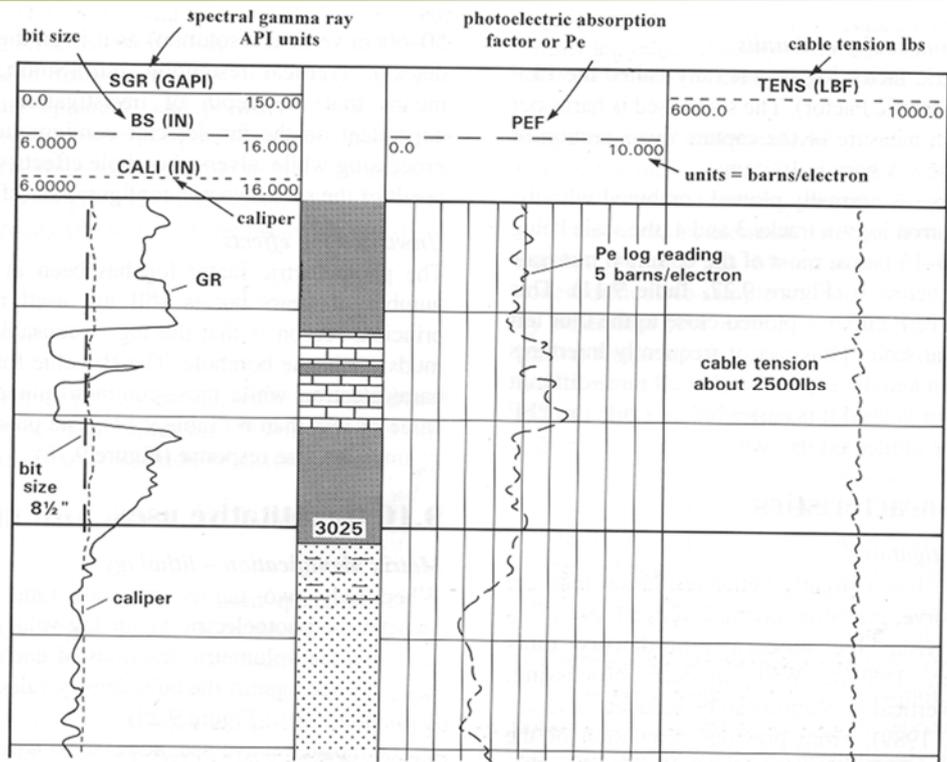
### Valores típicos

Substance	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_e$ (g/cm <sup>3</sup> )	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	<b>266.8</b>
water (fresh)	1.000	1.110	0.555	0.358
oil	0.850	0.948	0.558	0.125

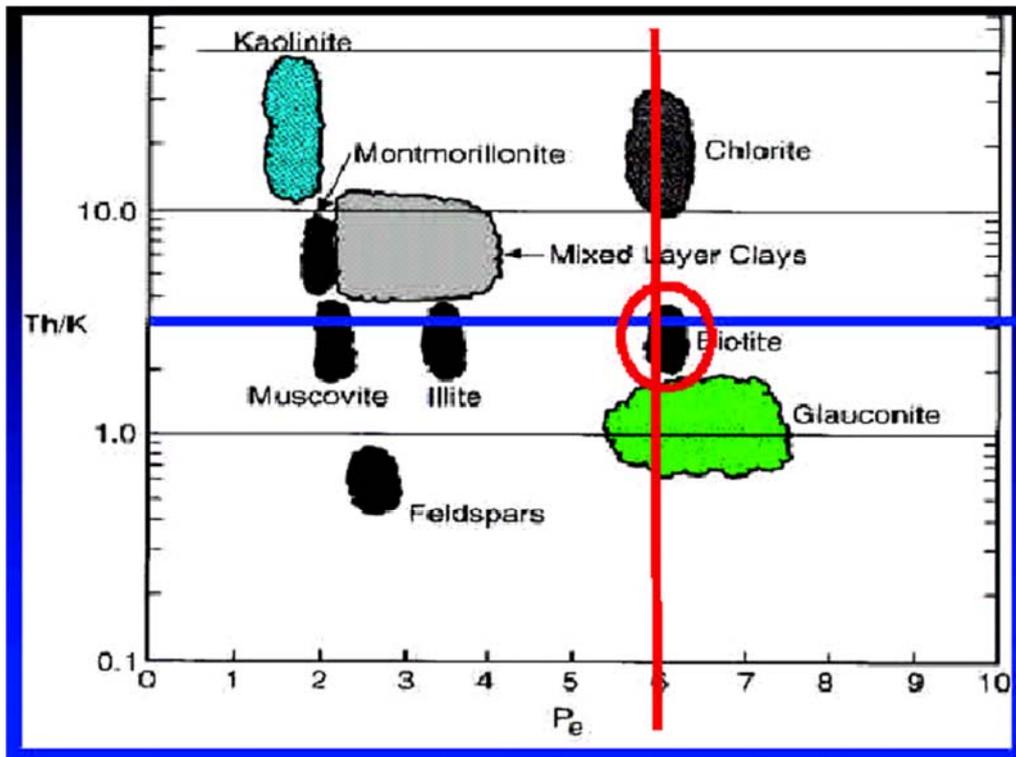


Respuesta típica del perfil de Efecto Fotoeléctrico ante litologías comunes

## Encabezado de un perfil de Índice fotoeléctrico



## Cross-Plot de Th/K-Pe



## PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS

■ Apunte 5:

□ Perfil neutrónico

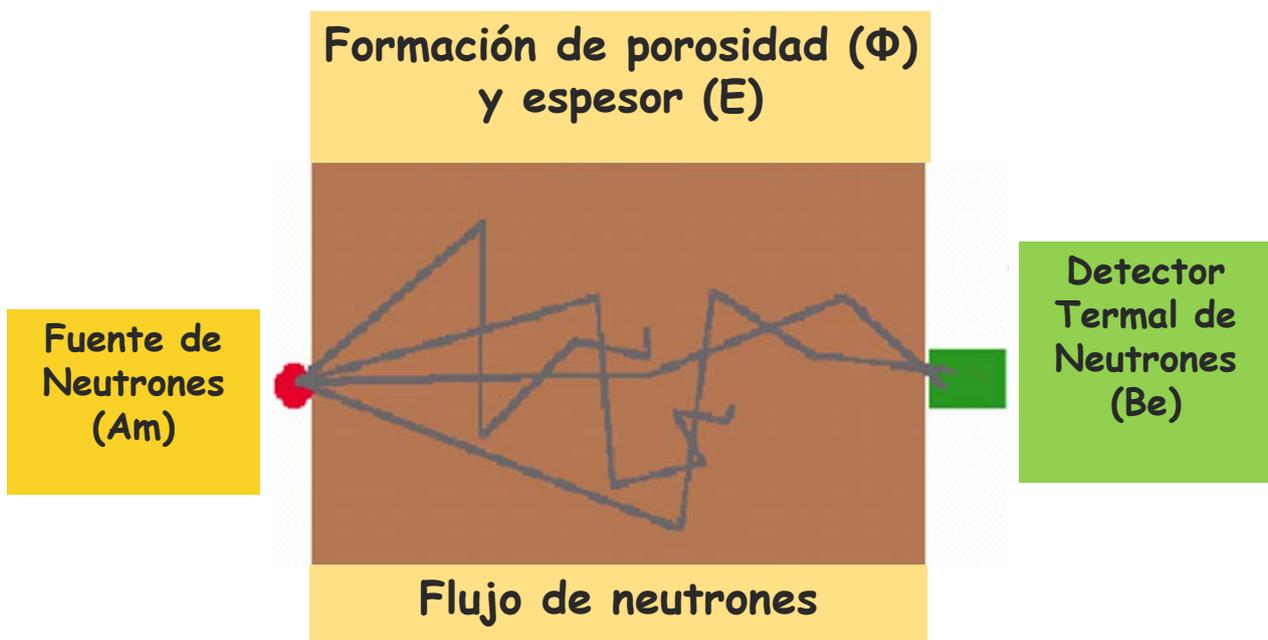
## Las interacciones de neutrones

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:

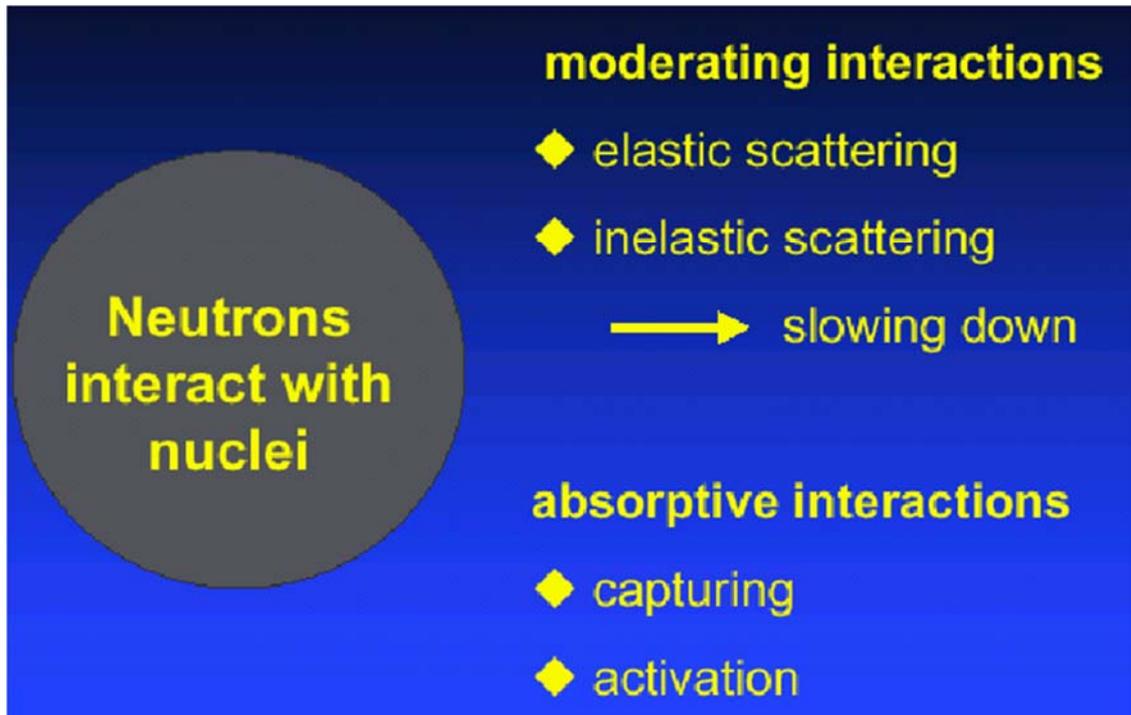
1. rápido = más de 100 Kev.
2. intermedio = de 100 ev a 100 Kev
3. lentos = menos de 100 ev
  - a: epitermales = de 0,1 a 100 ev
  - b: termal  $\approx$  0,025 ev.

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:

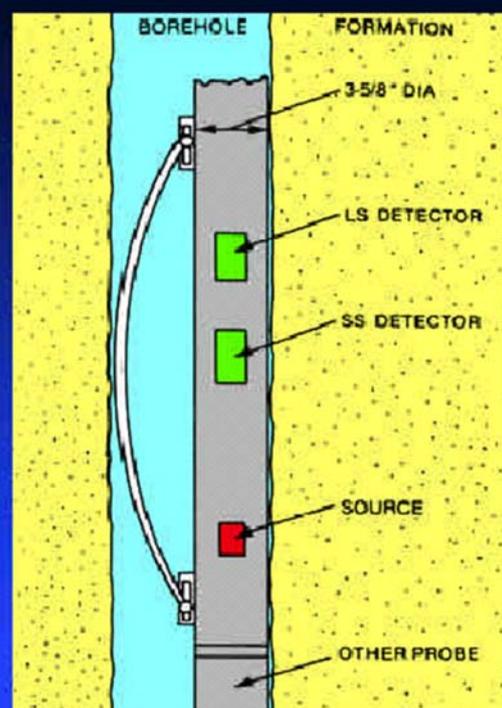
He<sup>3</sup> detectors

Source AmBe

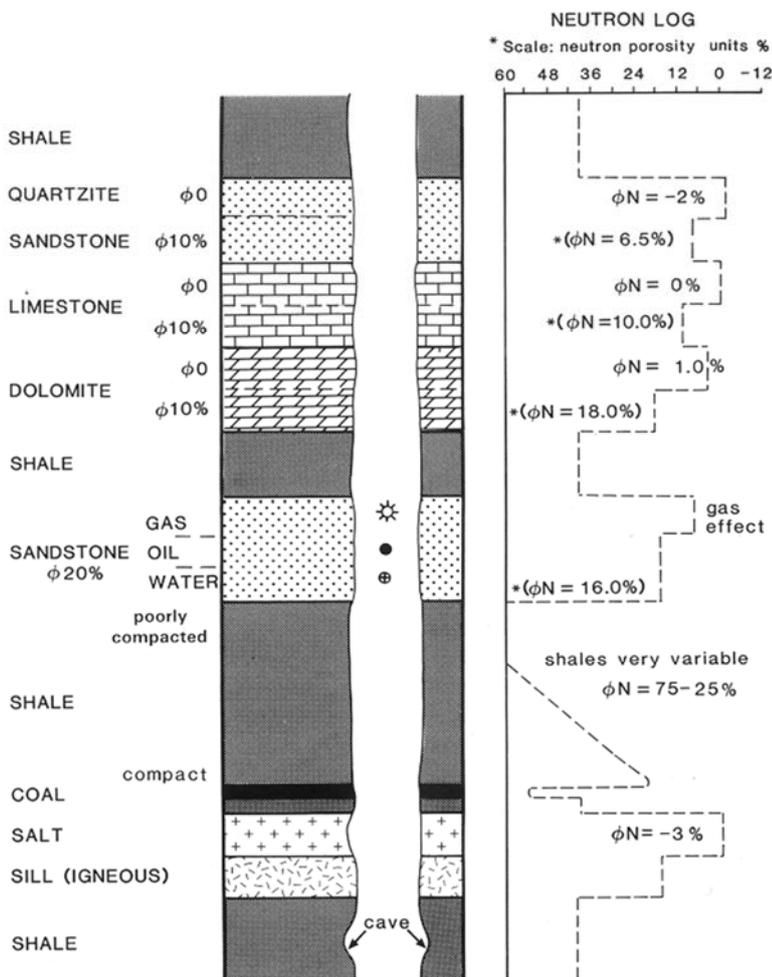
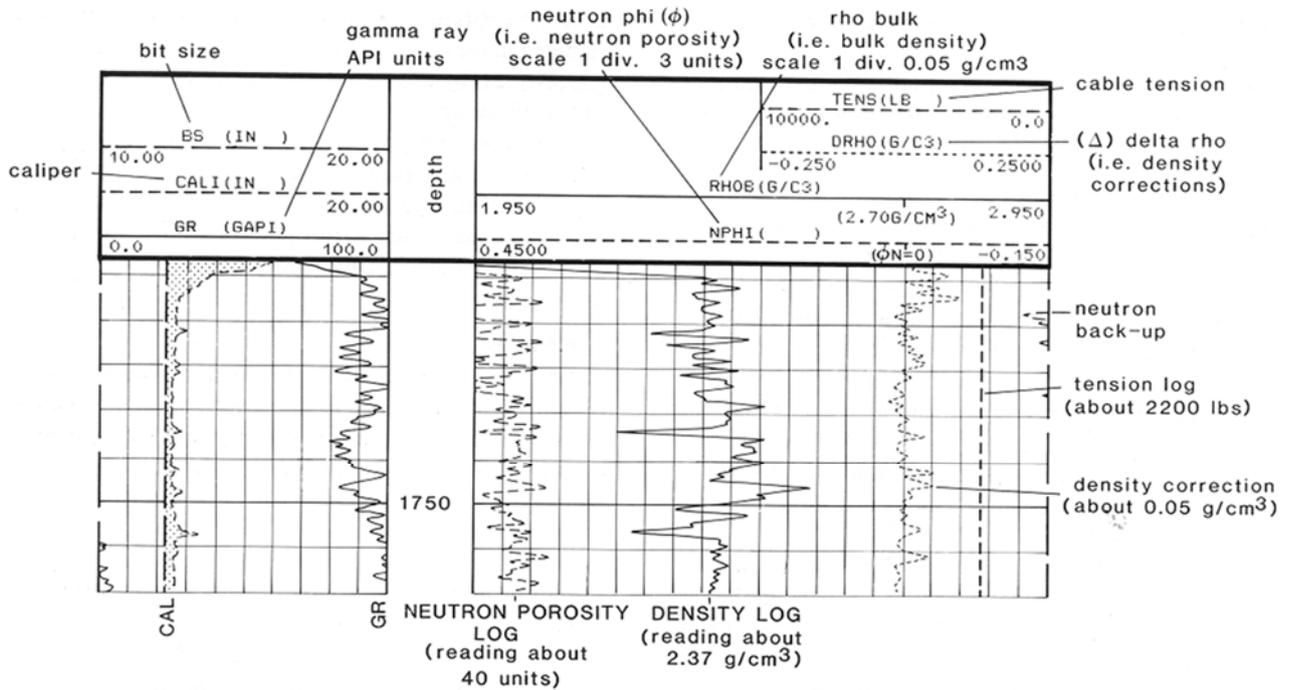
Strength 20 curie

Output 4.5 MeV Neutrons

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



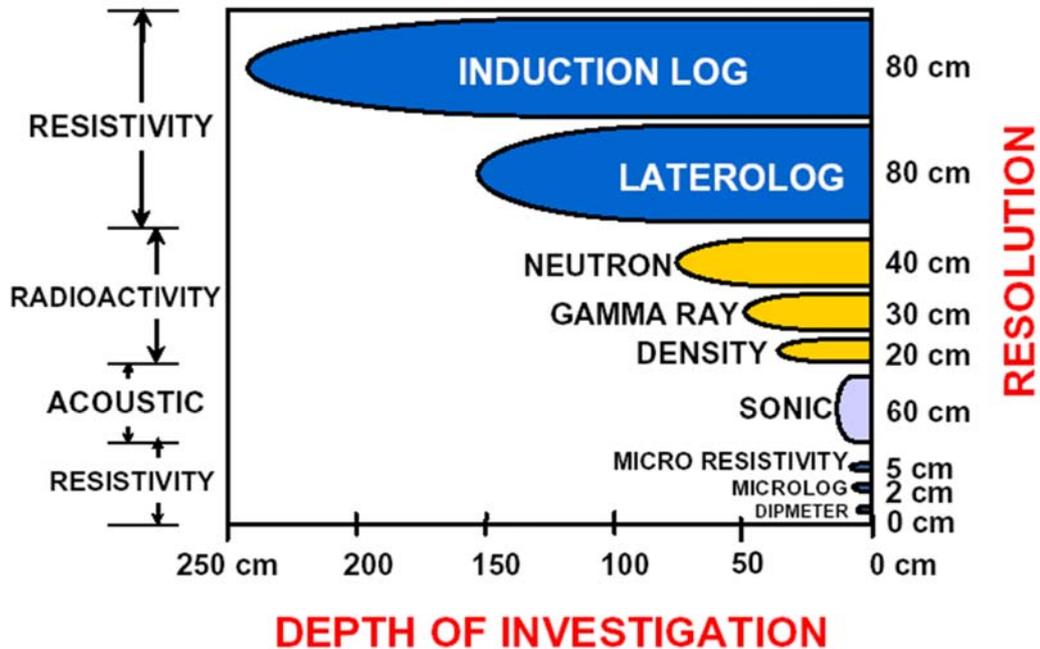
# Encabezado típico de un perfil neutrónico



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

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

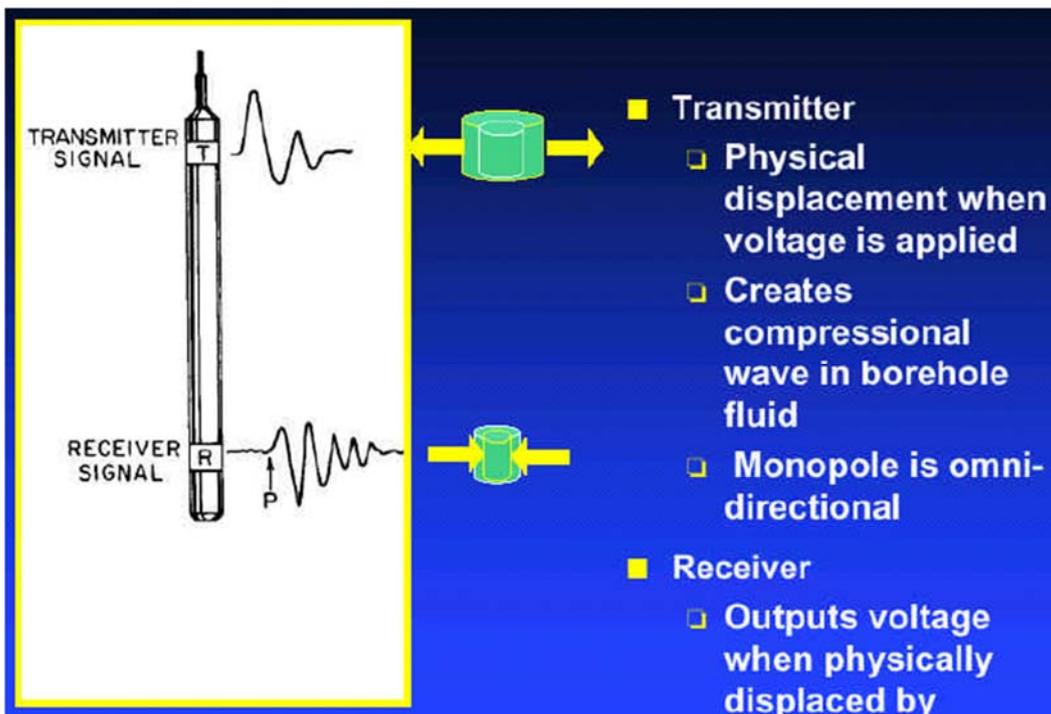
\*using neutron log combined with density log on compatible scales.

## PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS

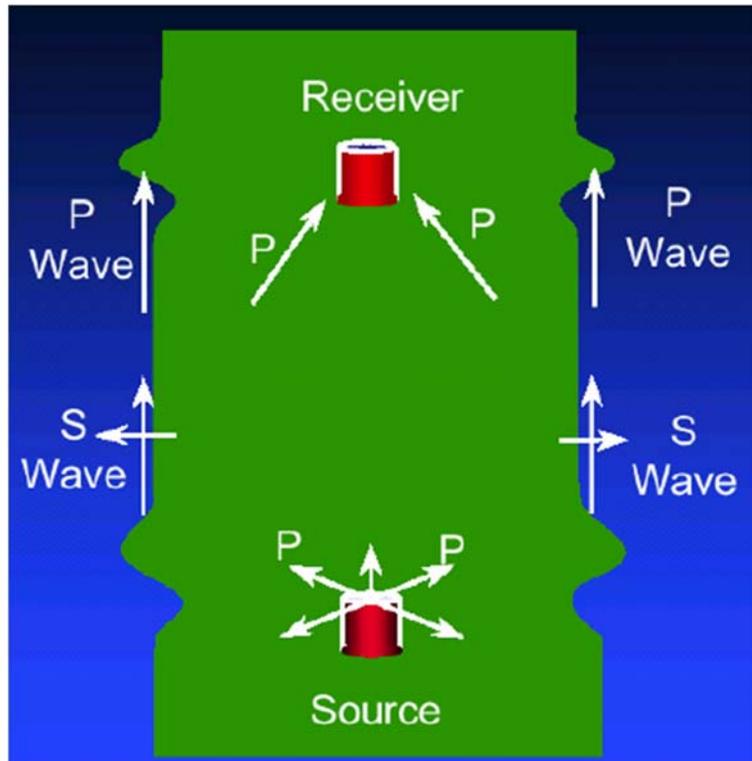
### ■ Apunte 6:

#### □ Perfil sónico o acústico

## PRINCIPIOS BASICOS



## Herramienta monopolo tradicional



## Sistemas tradicionales de perfilaje sónico

1) RECEPTOR SIMPLE

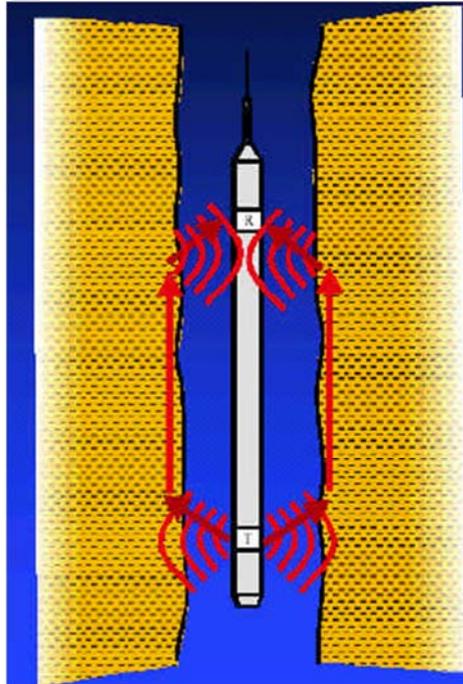
2) RECEPTOR DUAL

3) SISTEMA COMPENSADO

a) Transmisores y Receptores Duales

b) Transmisor Simple y Receptor Dual

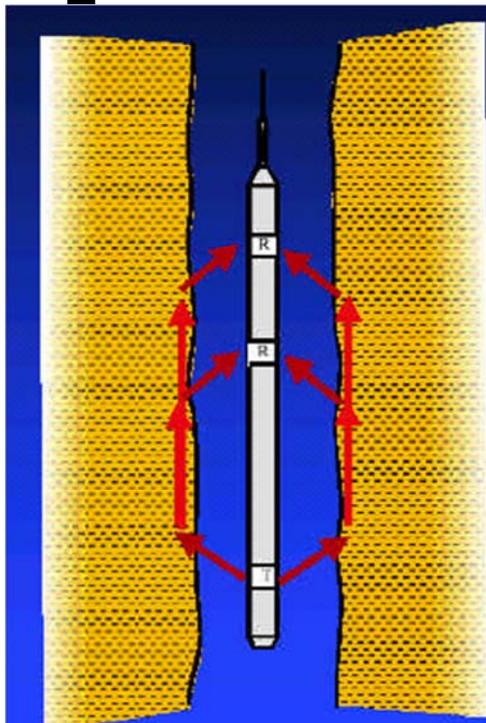
## Herramienta de Transmisor simple- Receptor simple



Measured Transit time includes:

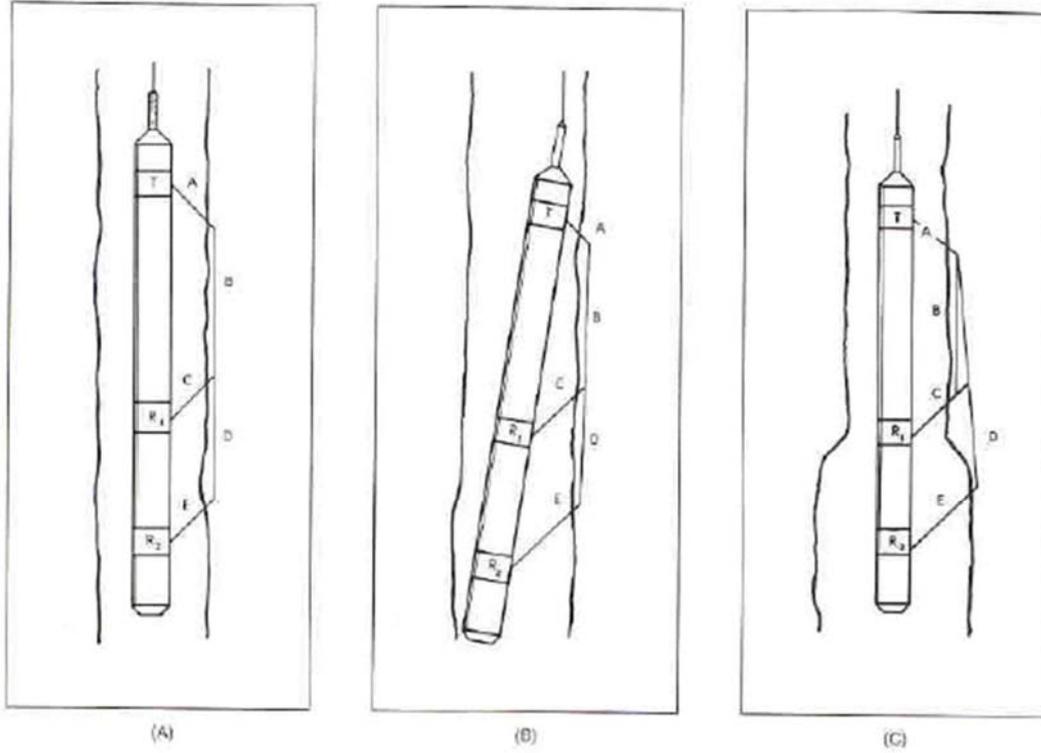
- wave travel through mud from transmitter to formation
- wave travel through formation
- wave travel through mud from formation to receiver

## Herramienta de transmisor simple - receptor dual



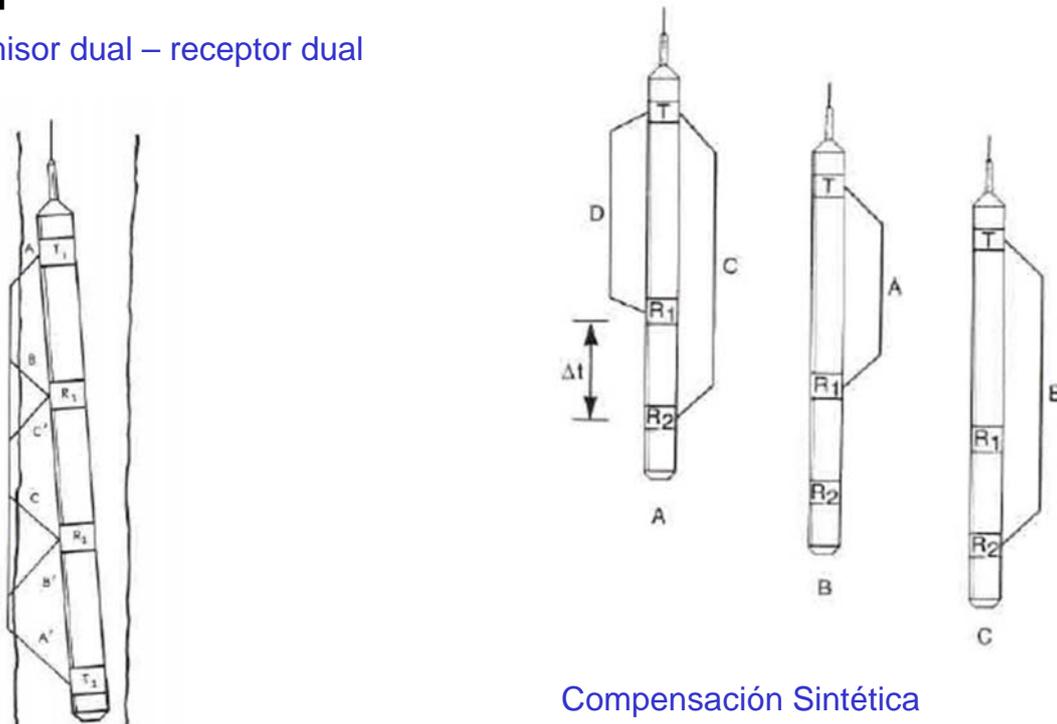
A two receiver tool can compensate for variations in borehole size.

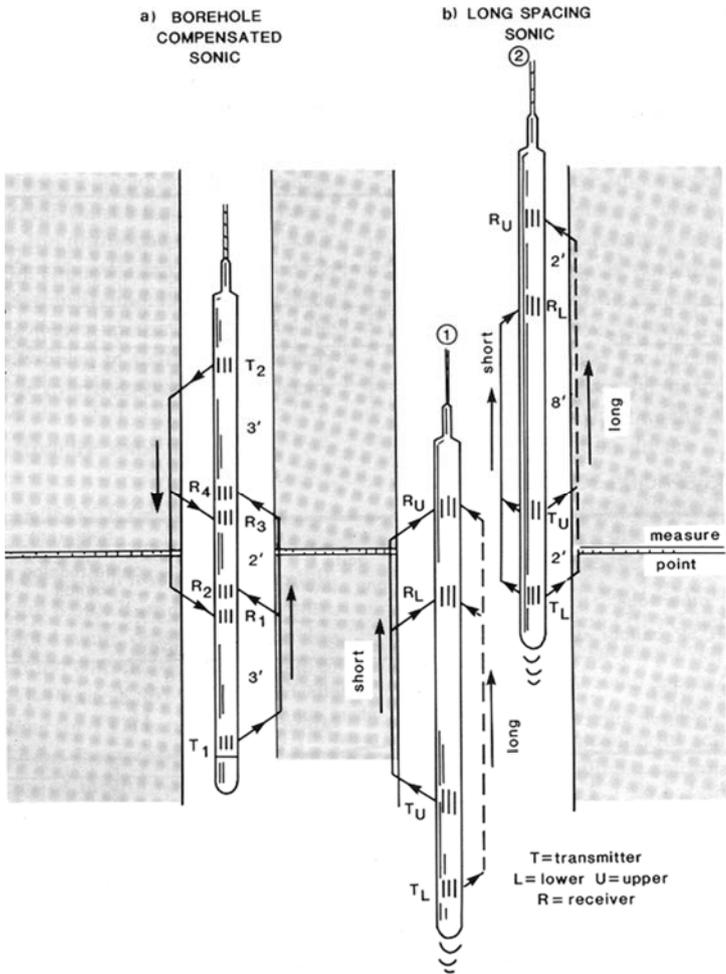
## Herramientas antiguas: Transmisor simple - receptor dual



## Herramientas antiguas

Transmisor dual – receptor dual

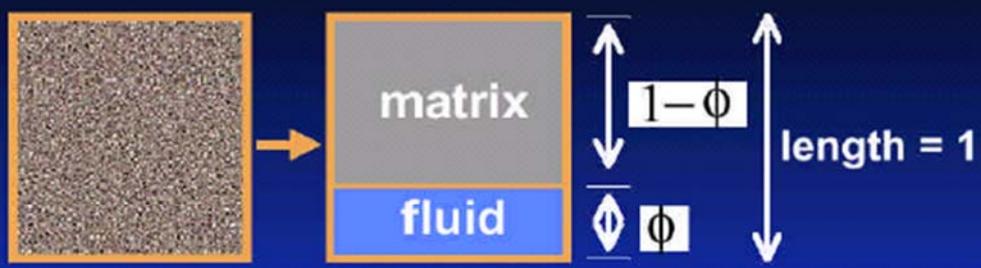




Distintas herramientas de perfilaje sónico

Modelo intuitivo

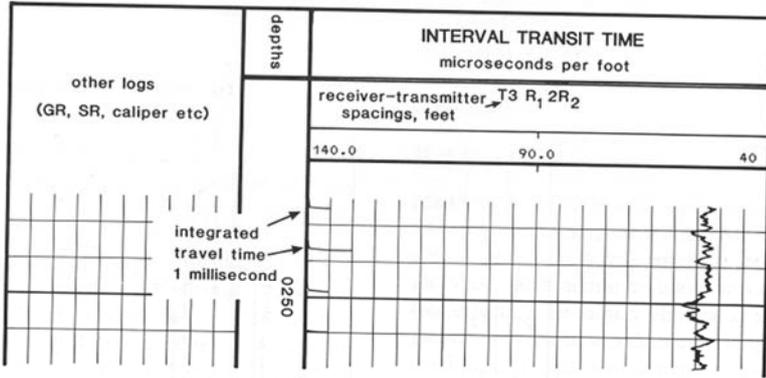
(Wyllie et al. 1956)



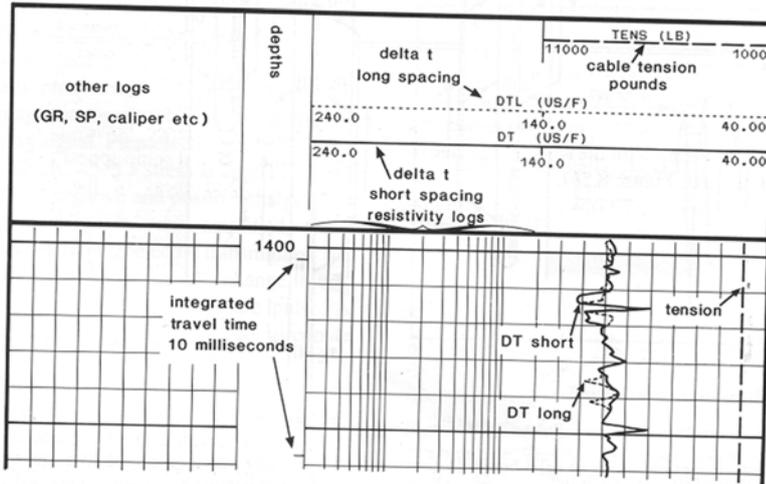
medium	distance	velocity	travel time
matrix	$1 - \phi$	$v_{matrix} = \Delta t_{matrix}^{-1}$	$(1 - \phi) \cdot \Delta t_{matrix}$
fluid	$\phi$	$v_{fluid} = \Delta t_{fluid}^{-1}$	$\phi \cdot \Delta t_{fluid}$
rock, model	1	$v = \Delta t^{-1}$	$\Delta t$

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



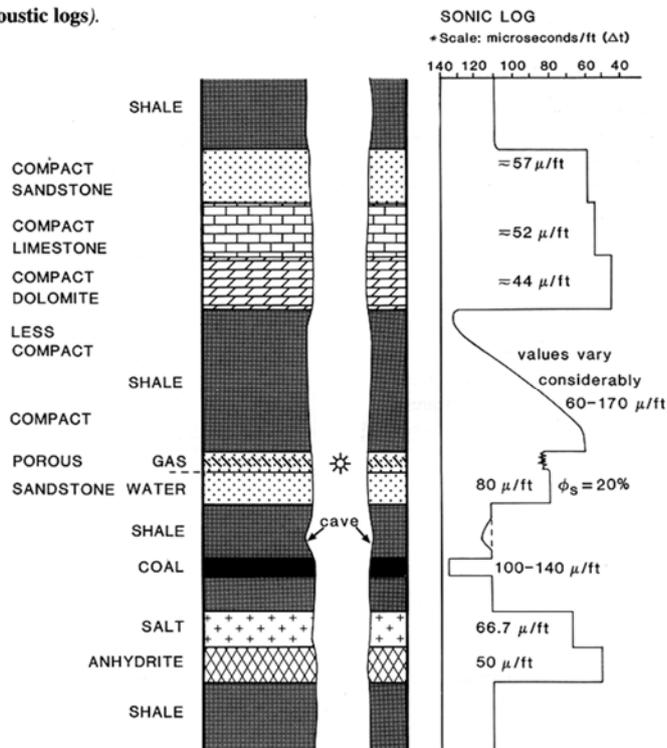
(b) LONG SPACING SONIC LOG



Distintas presentaciones del perfil sónico o acústico

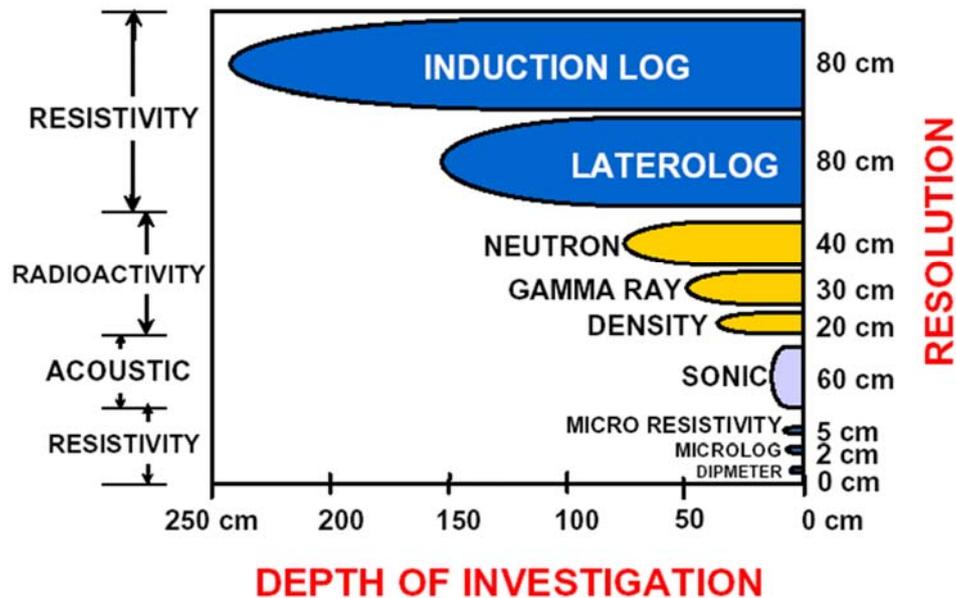
Algunas respuestas típicas del perfil sónico o acústico

( 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 neutrónica 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  Seismic calibration Acoustic impedance	Integrated travel time Seismic markers Check shots Direct use of sonic log
Qualitative and semi-quantitative	Geology	Lithology Correlation Texture Fracture identification Compaction and overpressure	Matrix and mineral velocities  Density log porosities 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”**

$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{cn}}{GR_{sh} - GR_{cn}}$$

$GR$  log response in zone of interest

$GR_{cn}$  log response in a zone considered clean (shale free)

$GR_{sh}$  log response in a shale zone



## Cálculo del volumen de arcillas

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

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

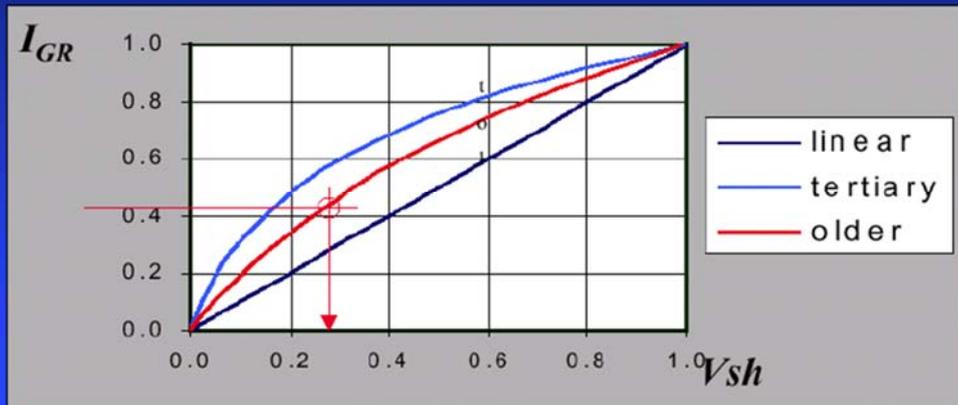
$$V_{sh} = 0.083 \cdot (2^{3.7 \cdot I_{GR}} - 1)$$

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

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:

$\Phi_{den}$  = porosidad obtenida del perfil de densidad

$\Phi_{sonic}$  = porosidad corregida del perfil sónico

$\rho_{ma}$  = densidad de la matriz

$\rho_{log}$  = densidad del tramo de interés

$\rho_{sh}$  = densidad de las pelitas adyacentes

$\rho_f$  = densidad del fluido

$V_{sh}$  = volumen de las pelitas

$\Delta t_{ma}$  = tiempo de tránsito de la matriz

$\Delta t_{log}$  = tiempo de tránsito del intervalo de interés

$\Delta t_f$  = tiempo de tránsito del fluido

$\Delta t_{sh}$  = 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:**

$\Phi_D$  = porosidad obtenida del perfil de densidad

$\Phi_{Dcorr}$  = porosidad corregida obtenida del perfil de densidad

$\Phi_N$  = porosidad obtenida del perfil neutrónico

$\Phi_{Ncorr}$  = porosidad corregida obtenida del perfil neutrónico

$\Phi_{Nclay}$  = 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