



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE MONAGAS
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO
MATURÍN/MONAGAS/VENEZUELA**

Unidad II

Método Volumétrico para Yacimientos de Gas Seco

Profesora: Ing. Yuleisy Cristina Cañizares

Cátedra: Yacimiento I (063-3123)

Complemento a la clase presencial (período II-2017)

Noviembre de 2017



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Introducción

En la última clase presencial se explicaron a detalle las siguientes ecuaciones:

$$GOES = \frac{43560 \times \phi \times Vb \times (1 - Swi)}{Bgi}$$

$$Bg = \frac{0,02829 \times Z \times T}{P}$$

Porosidad promedio ponderada (ϕ):

Aritmético:

$$\phi = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{n}$$

Por espesor:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Por área:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Por volumen:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \times h_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n h_i \times A_i}$$

Saturación de agua promedio ponderada (Sw):

Aritmético:

$$Sw = \sum_{i=1}^n \frac{Sw_i}{n}$$

Por espesor:

$$Sw = \frac{\sum_{i=1}^n Sw_i \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Por área:

$$Sw = \frac{\sum_{i=1}^n Sw_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Por volumen:

$$Sw = \frac{\sum_{i=1}^n Sw_i \times h_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n h_i \times A_i}$$

Estas ecuaciones están enmarcadas en lo que se llamó ecuaciones generales (aplican tanto para yacimientos volumétricos como para no volumétricos). A continuación las últimas ecuaciones generales:



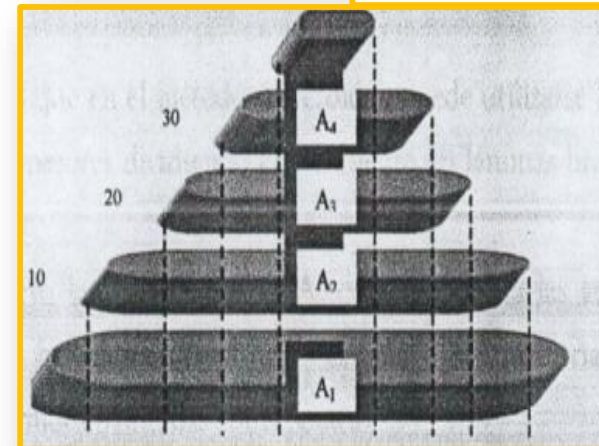
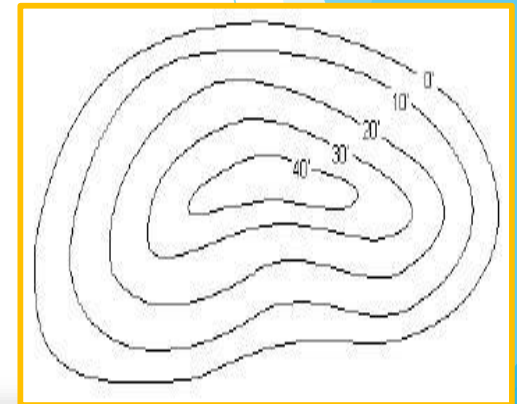
UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Volumen bruto

Para el cálculo del volumen bruto (V_b) se aplicará el método tabular:

MÉTODO TABULAR:

Consiste en tomar el volumen de la roca contenedora y asociarlo al volumen de un cuerpo irregular tridimensional, al cual por medio de herramientas matemáticas, se le podría calcular el volumen que posee y dicho volumen será un aproximado al volumen de roca que se está estudiando. El cuerpo irregular tridimensional asignado dependerá del método empleado: método piramidal o método trapezoidal.





UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Volumen bruto

La aplicación del método trapezoidal o piramidal dependerá de la razón de áreas A_i/A_{i+1} :

MÉTODO TRAPEZOIDAL:

Consiste en dividir el yacimiento en capas horizontales y cada capa corresponde al volumen de un trapezoide.

Método Trapezoidal: (si $\frac{A_i}{A_{i+1}} \geq 0,5$)

$$\Delta V b_i = \frac{H}{2} \times (A_i + A_{i+1})$$

MÉTODO PIRAMIDAL:

Consiste en dividir el yacimiento en capas horizontales y cada capa corresponde al volumen de una pirámide truncada.

Método Piramidal: (si $\frac{A_i}{A_{i+1}} < 0,5$)

$$\Delta V b_i = \frac{H}{3} \times \left(A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i \times A_{i+1}} \right)$$



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Volumen bruto

Las variables involucradas son:

V_b = volumen bruto o total del yacimiento (acre-pie)

ΔV_b = diferencial de volumen (acre-pie)

H = espesor entre dos isópacos consecutivos (pie)

A_i = área encerrada por la línea isópaca inferior (acre)

$A_{(i+1)}$ = área encerrada por la línea isópaca superior (acre)

$A_i / A_{(i+1)}$ = razón de áreas (adimensional)

Para obtener el volumen bruto se suman los ΔV_b :

$$V_b = \sum_{i=1}^n \Delta V_{b_i}$$

Hasta acá las ecuaciones generales, a continuación las ecuaciones específicas según el tipo de yacimiento:



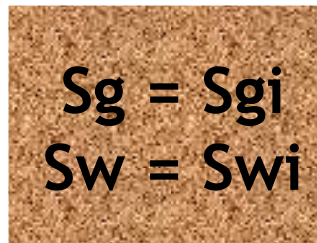
UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Yacimientos volumétricos de gas seco

- Yacimientos volumétricos:
Yacimientos de gas con volumen constante ($We=0$)



$$P = P_i$$



$$P < P_i$$

El espacio dejado por la producción es ocupado por la expansión del gas remanente.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Yacimientos volumétricos de gas seco

GAS REMANENTE (Gr):

Es el gas que queda en el yacimiento a una condición de presión dada. Se determina en PCN.

$$Gr = \frac{43560 \times \emptyset \times Vb \times (1 - Swi)}{Bg}$$

GAS PRODUCIDO (Gp):

Es el gas extraído del yacimiento a una condición de presión dada. Se determina en PCN. Ambas ecuaciones son equivalentes.

$$Gp = GOES - Gr$$

$$Gp = 43560 \times \emptyset \times Vb \times (1 - Swi) \times \left(\frac{1}{Bgi} - \frac{1}{Bg} \right)$$



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Yacimientos volumétricos de gas seco

FACTOR DE RECOBRO (FR):

Fracción del gas original que se recupera del yacimiento a una presión dada. Se determina en fracción, pero al multiplicar el valor por 100 se obtiene en porcentaje (%). Ambas ecuaciones son equivalentes.

$$FR = \frac{G_p}{GOES}$$

$$FR = 1 - \left(\frac{B_{gi}}{B_g} \right)$$

Donde:

GOES (PCN) = gas originalmente en sitio

43560 (PCY/acre-pie) = factor de conversión , 1 acre-pie = 43560 PC

ϕ (fracción) = Porosidad efectiva de la formación

Vb (acre-pie) = volumen bruto o total del yacimiento

Swi (fracción) = saturación de agua connata

Bgi (PCY/PCN) = factor volumétrico inicial del gas

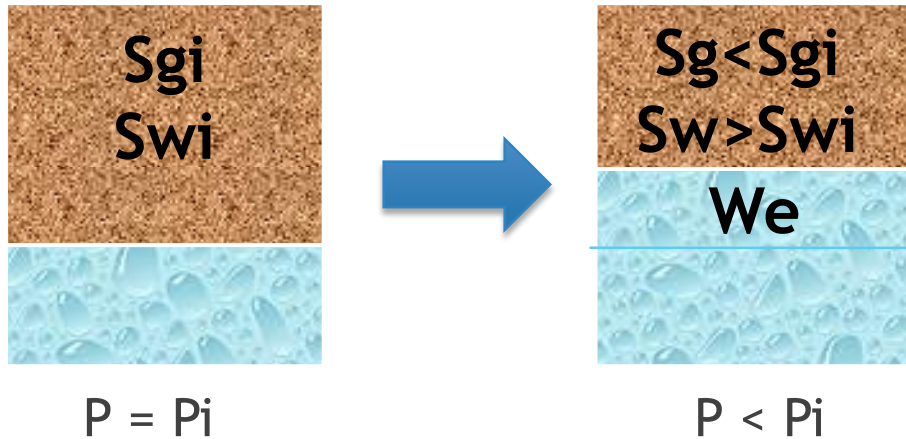
Bgi (PCY/PCN) = factor volumétrico del gas a una presión dada



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Yacimientos no volumétricos de gas seco

- Yacimientos no volumétricos:
Yacimientos de gas con volumen variable ($We > 0$)



El espacio dejado por la producción es ocupado por la intrusión de agua proveniente del acuífero.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Yacimientos no volumétricos de gas seco

GAS REMANENTE (G_r):

Es el gas que queda en el yacimiento a una condición de presión dada. Se determina en PCN.

$$G_r = \frac{43560 \times \emptyset \times V_b \times S_{gr}}{B_g}$$

GAS PRODUCIDO (G_p):

Es el gas extraído del yacimiento a una condición de presión dada. Se determina en PCN. Ambas ecuaciones son equivalentes.

$$G_p = GOES - G_r$$

$$G_p = 43560 \times \emptyset \times V_b \times \left(\frac{1 - S_{wi}}{B_{gi}} - \frac{S_{gr}}{B_g} \right)$$



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Yacimientos volumétricos de gas seco

FACTOR DE RECOBRO (FR):

Fracción del gas original que se recupera del yacimiento a una presión dada. Se determina en fracción, pero al multiplicar el valor por 100 se obtiene en porcentaje (%).

$$FR = \frac{G_p}{GOES}$$

Para empuje hidráulico parcial (EHP):

$$FR = 1 - \left(\frac{S_{gr} \times B_{gi}}{(1 - S_{wi}) \times B_g} \right)$$

Para empuje hidráulico total (EHT):

$$FR = 1 - \left(\frac{S_{gr}}{1 - S_{wi}} \right)$$

$P = P_i$, presión constante

$B_g = B_{gi}$

Las variables y unidades son las mismas que en yacimientos volumétricos.

S_{gr} : saturación de gas remanente (fracción).

$S_{gr} = 1 - S_w$



UNIDAD I. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

La presión inicial de un yacimiento de gas seco es de 3500 Lpca, temperatura de 200 °F y el factor de compresibilidad del gas es de 0,905. Según datos suministrados por los geólogos las dimensiones del reservorio son: 850 acres de extensión superficial, donde las áreas encerradas por las líneas isopacas de 10, 20, 30, 40 y 47 pies son 741, 540, 420, 150 y 0 acres respectivamente. Además se cuenta con datos petrofísicos de estudios realizados a varios pozos:

POZO	ϕ (%)	S_{wi} (%)	h (pies)
1	19	22	12
2	17	24	10
3	16	21	8
4	17	26	11

Determinar lo siguiente:

- Volumen de gas inicialmente en el yacimiento tanto a condiciones de yacimiento y de superficie.
- En cada caso calcular el gas remanente, gas producido y el factor de recobro:
 - Hay un CGAO en el yacimiento, pero el acuífero no es activo y la presión de abandono es de 700 Lpca ($Z = 0,942$).
 - Hay un CGAO en el yacimiento, pero el acuífero es no muy activo y la presión de abandono es de 2200 Lpca ($Z = 0,919$) y la saturación de agua en el reservorio aumento en un 70%.
 - Hay un CGAO en el yacimiento, el acuífero es muy activo y la saturación de agua en el reservorio aumento en un 90%.
- Comparar los resultados obtenidos y hacer conclusiones al respecto.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

La parte a) del ejercicio solicita estimar el volumen de gas inicial a condiciones de yacimiento (GOES en PCY) y a condiciones de superficie (GOES en PCN). Sin embargo, los datos requeridos no se tienen directamente, deben calcularse primero.

$$GOES = \frac{43560 \times \phi \times Vb \times (1 - Swi)}{Bgi}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi=? \\ Vb=? \\ Swi=? \\ Bgi=? \end{array} \right.$$

Cálculo del factor volumétrico del gas:

$$Bg = \frac{0,02829 \times Z \times T}{P}$$

$$Bgi = \frac{0,02829 \times 0,905 \times (200 + 460)}{3500} = 4,8279 \times 10^{-3} \frac{PCY}{PCN}$$



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

Cálculo de propiedades promedio:

Por espesor:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

$$\phi = \frac{(19 \times 12) + (17 \times 10) + (16 \times 8) + (17 \times 11)}{12 + 10 + 8 + 11} = 17,39 \%$$

$$\phi = 0,1739$$

Por espesor:

$$S_{wi} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{wi} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

$$S_{wi} = \frac{(22 \times 12) + (24 \times 10) + (21 \times 8) + (26 \times 11)}{12 + 10 + 8 + 11} = 23,37 \%$$

$$S_{wi} = 0,2337$$

La porosidad y la saturación de agua se ponderan por espesor (h), por ser la propiedad que se conoce para los cuatro pozos.

POZO	ϕ (%)	S_{wi} (%)	h (pies)
1	19	22	12
2	17	24	10
3	16	21	8
4	17	26	11



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

Cálculo del volumen bruto del yacimiento:

Línea Isópaca	Área (acres)	Intervalo (pie)	Razón de Áreas	Método	ΔV_b (acre-pie)
0°	850	-	-	-	-
10°	741	10	0,87	Trapezoidal	7955
20°	540	10	0,73	Trapezoidal	6405
30°	420	10	0,78	Trapezoidal	4800
40°	150	10	0,36	Piramidal	2737
47°	0	7	0	Piramidal	350
					$V_b=22247$ acre-pie

Muestras de cálculo

$$\text{Intervalo}_1 = 10 - 0 = 10 \text{ pies}$$

$$\Delta V_{b_1} = \frac{10}{2} \times (741 + 850) = 7955 \text{ acre-pie}$$

$$\text{Razón de Áreas}_1 = \frac{\text{Área menor}}{\text{Área mayor}} = \frac{741}{850} = 0,87$$

$$\Delta V_{b_4} = \frac{10}{3} \times (741 + 850 + \sqrt{(741 \times 850)}) = 2737 \text{ acre-pie}$$



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

Cálculo del gas original en sitio:

$$GOES = \frac{43560 \times 0,1739 \times 22247 \times (1 - 0,2337)}{4,8279 \times 10^{-3}} = 26,75 \times 10^9 PCN$$

$$GOES = 26,75 \text{ MMMPCN}$$

$$GOES = 43560 \times 0,1739 \times 22247 \times (1 - 0,2337) = 0,13 \times 10^9 PCY$$

$$GOES = 0,13 \text{ MMMPCY}$$

Donde:

Nomenclatura	Notación
M (miles)	$\times 10^3$
MM (millones)	$\times 10^6$
MMM (miles de millones)	$\times 10^9$
MMMM (billones)	$\times 10^{12}$



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

❖ Parte b.1)

Si el yacimiento es volumétrico determinar: Gr, Gp y Fr (Pab=700 lpca).

$$Gr_{@700lpca} = \frac{43560 \times \phi \times Vb \times (1 - S_{wi})}{Bg_{@700lpca}} \left\{ \begin{array}{l} Bg_{@700lpca} = ? \\ Bg_{@700lpca} = \frac{0,02829 \times Z_{@700lpca} \times T}{P} \end{array} \right.$$

1º Calcular el factor volumétrico del gas a la presión de abandono (Bg@700lpca):

$$Bg_{@700lpca} = \frac{0,02829 \times 0,942 \times 660}{700} = 25,23 \times 10^{-3} \text{ PCY / PCN}$$

2º Calcular el gas remanente a la presión de abandono (Gr@700lpca):

$$Gr_{@700lpca} = \frac{43560 \times 0,1739 \times 22247 \times (1 - 0,2337)}{25,13 \times 10^{-3}} \rightarrow \text{Gr@700 lpca} = 5,14 \text{ MMMPCN}$$

3º Calcular el gas producido a la presión de abandono (Gp@700lpca):

$$Gp_{@700lpca} = GOES - Gr_{@700lpca}$$
$$Gp_{@700lpca} = 26,75 \times 10^9 - 5,14 \times 10^9 \rightarrow \text{Gp@700 lpca} = 21,61 \text{ MMMPCN}$$

El yacimiento es volumétrico pues nos indican que existe un contacto gas agua original (CGAO), es decir, se tiene un acuífero adyacente pero dicho acuífero NO es activo.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

4º Calcular el factor de recobro a la presión de abandono ($Fr_{@700\text{lpca}}$):

$$Fr_{@700\text{lpca}} = \frac{Gp_{@700\text{lpca}}}{GOES}$$

$$Fr_{@700\text{lpca}} = \frac{21,61 \times 10^9}{26,75 \times 10^9} \times 100\% \rightarrow Fr_{@700\text{lpca}} = 80,79\%$$

Si el yacimiento produce únicamente por el mecanismo de la expansión de los fluidos y reducción del volumen poroso se tienen altos porcentajes de recobro, debido a la baja viscosidad y alta expansibilidad del gas a las condiciones del yacimiento. Solo un 19% del GOES no puede ser recuperado a la presión de abandono.

El yacimiento es volumétrico pues nos indican que existe un contacto gas agua original (CGAO), es decir, se tiene un acuífero adyacente pero dicho acuífero NO es activo.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

❖ Parte b.2)

Si el yacimiento produce por EHP determinar: Gr, Gp y Fr ($P_{ab}=2200$ lpca).

$$Gr_{@2200lpca} = \frac{43560 \times \phi \times Vb \times (1 - Sw_{@2200lpca})}{Bg_{@2200lpca}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Bg_{@2200lpca}=? \\ Sw_{@2200lpca}=? \end{array} \right.$$

1º Calcular el factor volumétrico del gas a la presión de abandono ($Bg_{@2200lpca}$):

$$Bg_{@2200lpca} = \frac{0,02829 \times 0,919 \times 660}{2200} = 7,80 \times 10^{-3} \text{ PCY / PCN}$$

2º Calcular la saturación de agua a la presión de abandono ($Sw_{@2200lpca}$):

$$Sw_{@2200lpca} = Swi + 0,7Swi = 1,7Swi \quad \rightarrow \quad Sw_{@2200lpca} = 1,7 \times 0,2337 = 0,3973$$

3º Calcular el gas remanente a la presión de abandono ($Gr_{@2200lpca}$):

$$Gr_{@2200lpca} = \frac{43560 \times 0,1739 \times 22247 \times (1 - 0,3973)}{7,80 \times 10^{-3}} \quad \rightarrow \quad \boxed{Gr_{@2200lpca} = 13,02 \text{ MMMPCN}}$$

El yacimiento produce por EHP pues nos indican que existe un contacto gas agua original (CGAO), es decir, se tiene un acuífero adyacente, y dicho acuífero es POCO activo.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

❖ Parte b.2)

Si el yacimiento es volumétrico determinar: Gr, Gp y Fr (Pab=2200 lpca).

3º Calcular el gas producido a la presión de abandono (Gp@2200lpca):

$$G_{p@2200lpca} = GOES - G_{r@2200lpca}$$

$$G_{p@2200lpca} = 26,75 \times 10^9 - 13,02 \times 10^9 \rightarrow \boxed{G_{p@2200 lpca} = 13,73 \text{ MMMPCN}}$$

4º Calcular el factor de recobro a la presión de abandono (Fr@2200lpca):

$$Fr_{@2200lpca} = \frac{G_{p@2200lpca}}{GOES}$$

$$Fr_{@2200lpca} = \frac{13,73 \times 10^9}{26,75 \times 10^9} \times 100\% \rightarrow \boxed{Fr@2200 lpca = 51,33\%}$$

Si el yacimiento produce por un EHP se tienen porcentajes de recobro menores, debido a la diferencia de densidades entre el gas y el agua. Un 49% del GOES no puede ser recuperado a la presión de abandono.

El yacimiento produce por EHP pues nos indican que existe un contacto gas agua original (CGAO), es decir, se tiene un acuífero adyacente, y dicho acuífero es POCO activo.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

❖ Parte b.3)

Si el yacimiento produce por EHT determinar: Gr, Gp y Fr. ($P_{ab}=P_i=3500$ lpca)

$$Gr = \frac{43560 \times \phi \times Vb \times (1 - S_w)}{Bg_{@3500lpca}}$$

$S_w = ?$

1º Calcular la saturación de agua a la presión de abandono (S_w):

$$S_w = S_{wi} + 0,9S_{wi} = 1,9S_{wi}$$



$$S_w = 1,9 \times 0,2337 = 0,4440$$

2º Calcular el gas remanente a la presión de abandono (Gr):

$$Gr = \frac{43560 \times 0,1739 \times 22247 \times (1 - 0,4440)}{4,83 \times 10^{-3}}$$



Gr = 19,41 MMMPCN

3º Calcular el gas producido a la presión de abandono (Gp):

$$G_p = GOES - Gr$$

$$G_p = 26,75 \times 10^9 - 19,41 \times 10^9$$



Gp = 7,34 MMMPCN

El yacimiento produce por EHT pues nos indican que existe un contacto gas agua original (CGAO), es decir, se tiene un acuífero adyacente, y dicho acuífero es MUY activo.



UNIDAD II. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Ejercicio N° 3 (Guía de ejercicios propuestos)

❖ Parte : b.3)

Si el yacimiento es volumétrico determinar: Gr, Gp y Fr ($P_{ab}=P_i=3500$ lpca).

4º Calcular el factor de recobro a la presión de abandono (Fr):

$$Fr = \frac{G_p}{GOES}$$

$$Fr = \frac{7,34 \times 10^9}{26,75 \times 10^9} \times 100\%$$



$$Fr = 27,44\%$$

Si el yacimiento produce por un EHT se tienen porcentajes de recobro muy bajos, debido a la diferencia de densidades entre el gas y el agua. Un 73% del GOES no puede ser recuperado a la presión de abandono, confirmando que mientras más activo sea el empuje hidráulico menor será el recobro.

El yacimiento produce por EHT pues nos indican que existe un contacto gas agua original (CGAO), es decir, se tiene un acuífero adyacente, y dicho acuífero es MUY activo.

Gracias por su atención