

# EFICIENCIA AREAL DE BARRIDO

Teoría del Avance frontal



Flujo lineal



el agua contacta el 100%  
del volumen poral

- estructuras elongadas
- punzado todo el espesor neto del inyector y productor
- arreglos (pattern) simétricos. La distancia productor-inyector es la mas corta y de mayor gradiente de presión

**Eficiencia de barrido en el pattern:**

$E_p$ , o

**Eficiencia de barrido areal:  $E_A$**

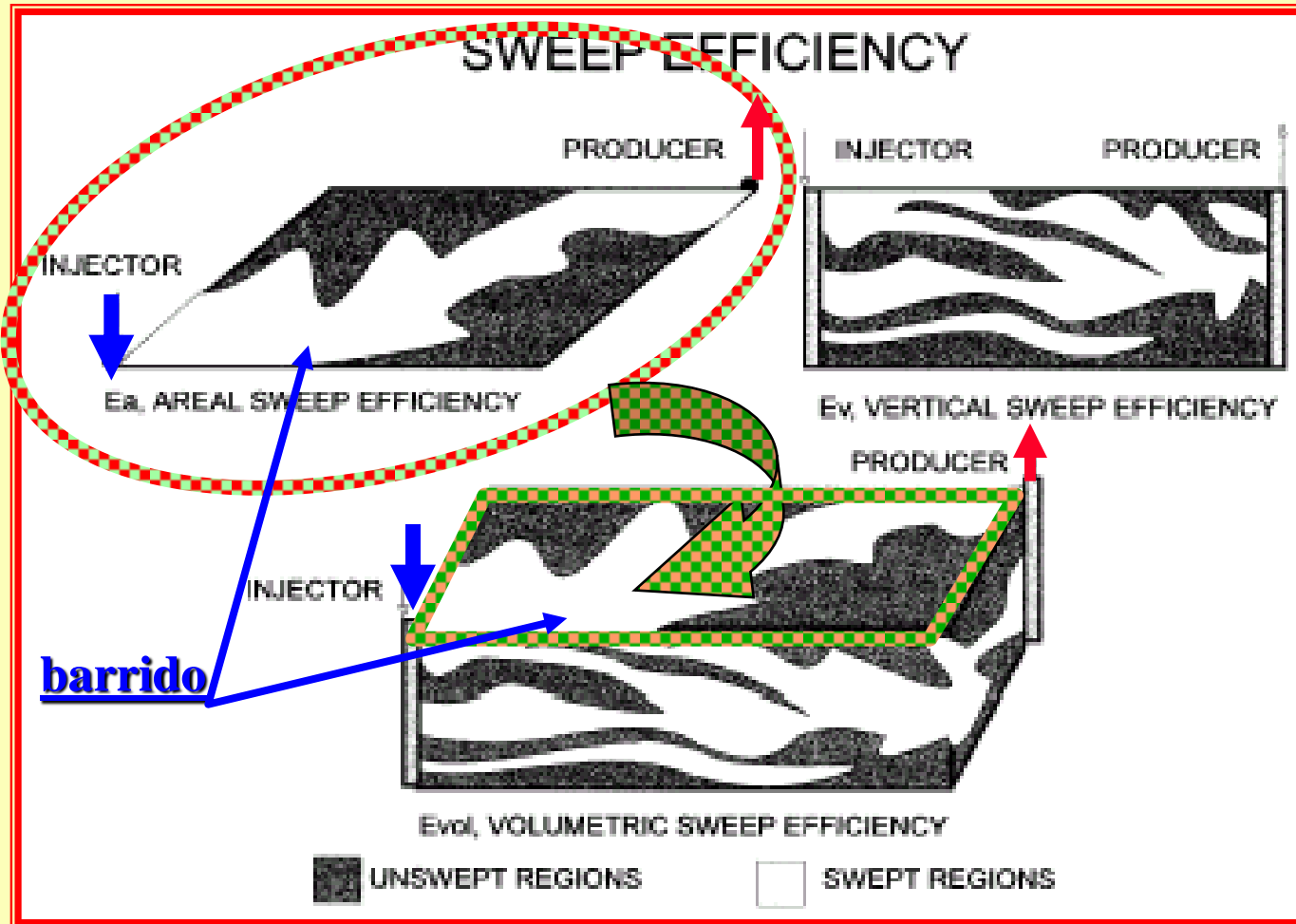
**Fracción del arreglo  
contactada por el agua en  
un momento dado**

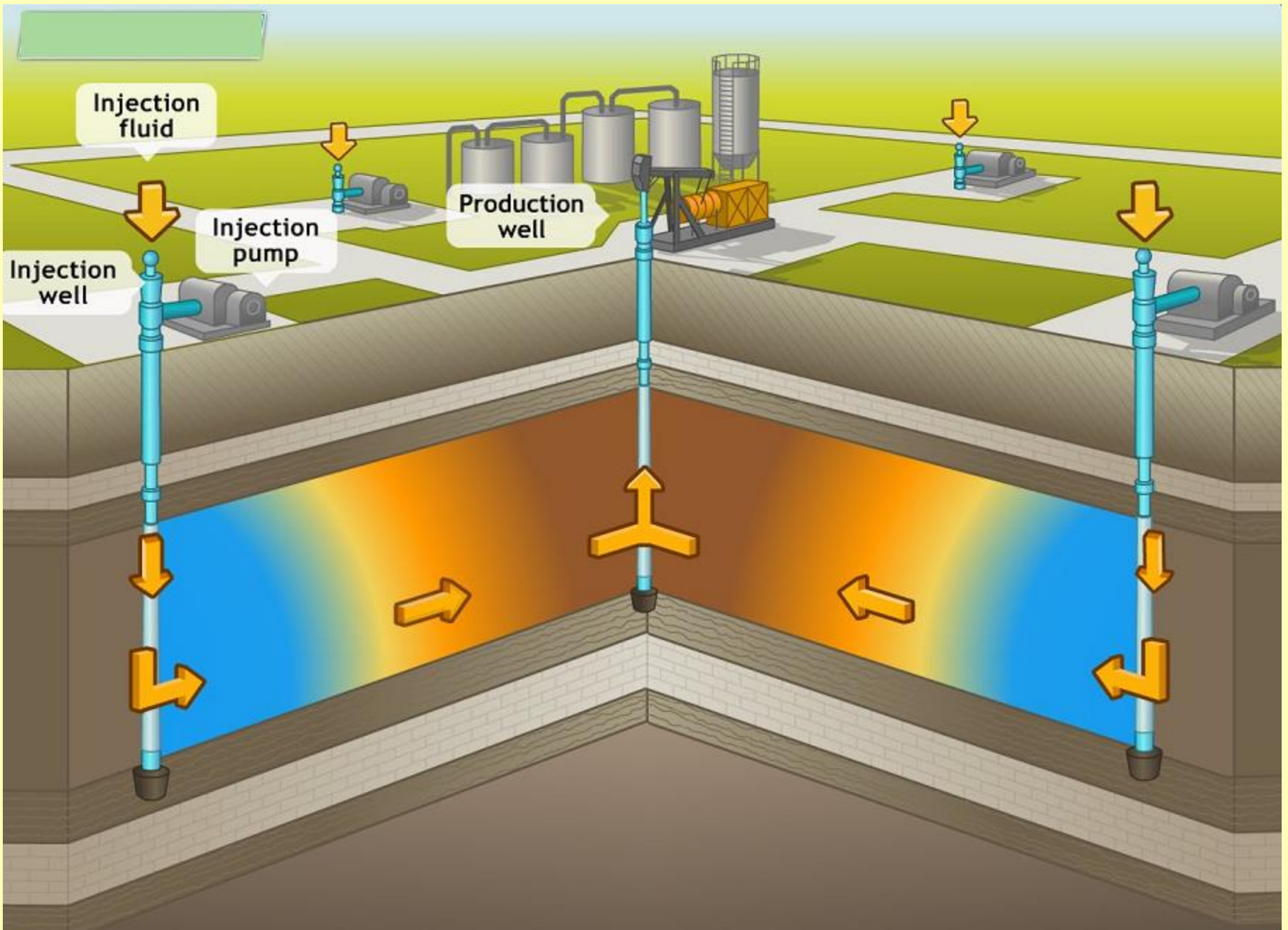
función de:

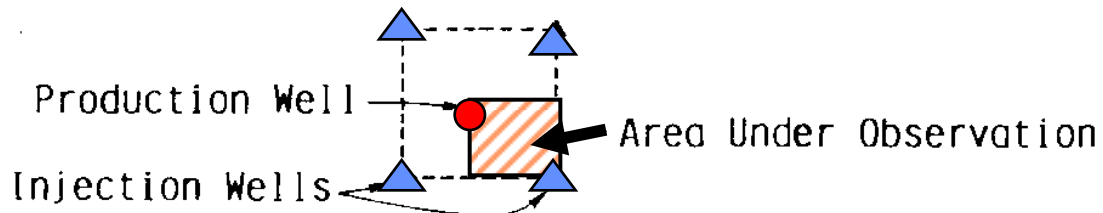
- I.- la relación de movilidades (M), (MLC4-5...)
- II.- la configuración geométrica del arreglo, (MLC4-8...)
- III.- las heterogeneidades del reservorio, (MLC4-26...)
- IV.- la cantidad de agua inyectada

# Eficiencia de barrido en el pattern ( $E_p$ ) o areal ( $E_A$ )

Fracción del arreglo contactada por el agua en un momento dado



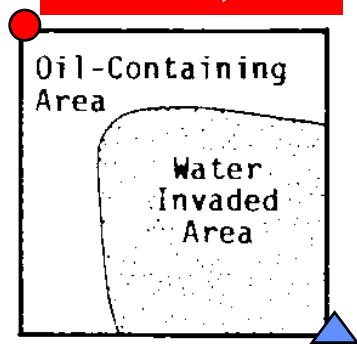




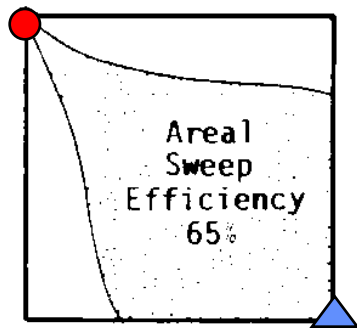
Water Flooding:

$WOR = \text{Instantaneous Producing Water-Oil Ratio}$

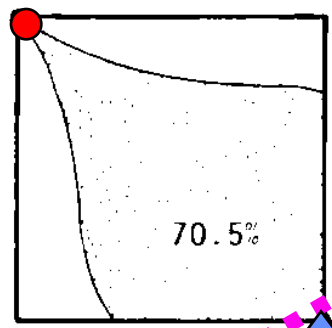
**M = 1,43**



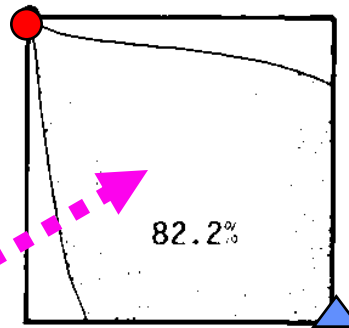
Water Breakthrough



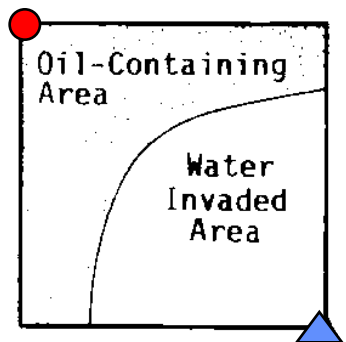
$WOR = 0.5$



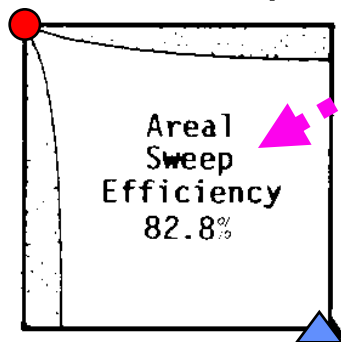
$WOR = 2$



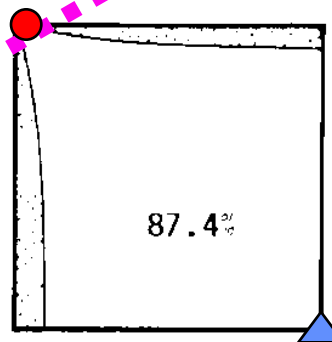
**M = 0,4**



Water Breakthrough



$WOR = 0.6$



$WOR = 4.7$

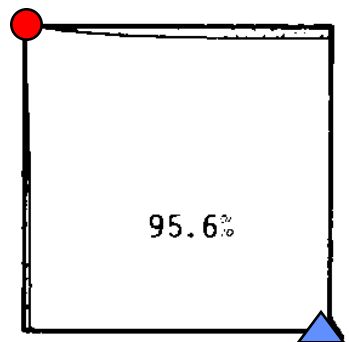


Fig. 4.6—X-ray shadowgraphs of flood progress in scaled five-spot patterns.<sup>11</sup>

# I.- RELACIÓN DE MOVILIDADES: M

facilidad con que el fluido se mueve en el reservorio

$$M = \frac{\lambda_{desplazante}}{\lambda_{desplazado}} = \frac{k_w / \mu_w}{k_o / \mu_o} = \frac{\mu_o k_w}{\mu_w k_o}$$

calculada en la zona barrida  
SPE-1957

calculada en la zona No barrida

$M = f(k_{efectiva}) = f(S_w)$  → detrás del frente hay un gradiente de  $S_w$

¿Qué  $S_w$  usar?

para calcular  $k_{rw}$

para calcular  $k_{ro}$

Se coincide en  $S_{wc}$

- a) **Dake** (F4.9): los extremos son los únicos puntos importantes  $k_{ro}(S_w=S_{wc}) = k'_{ro}$  y  $k_{rw}(S_w=1-S_{or}) = k'_{rw}$
- b) **Craig** (Cap.IV-pág. 25) y **Cobb**: a la rotura  $\bar{S}_{wbt}$

$$M = \frac{\mu_o (k_{rw})_{\bar{S}_{wbt}}}{\mu_w (k_{ro})_{S_{wc}}}$$

hasta la rotura la  $S_w$  es cte →  $M=cte$ ;

luego de la rotura aumentan:  $S_w \Rightarrow k_{rw} \Rightarrow M$

$$M = \frac{\mu_o(k_{rw})\bar{S}_{wbt}}{\mu_w(k_{ro})S_{wc}}$$

**Estimación rápida:**

Dado que  $\mu_w = 0,4$  a  $0,8$   $\rightarrow$   $\mu_w = 0,6$  cp

Tomando valores típicos  $k_{ro} = 1$  y  $k_{rw} = 0,2$

**$M = 0,333 \mu_o$**

Y  
 $0,1 < \mu_o < 1$  cp

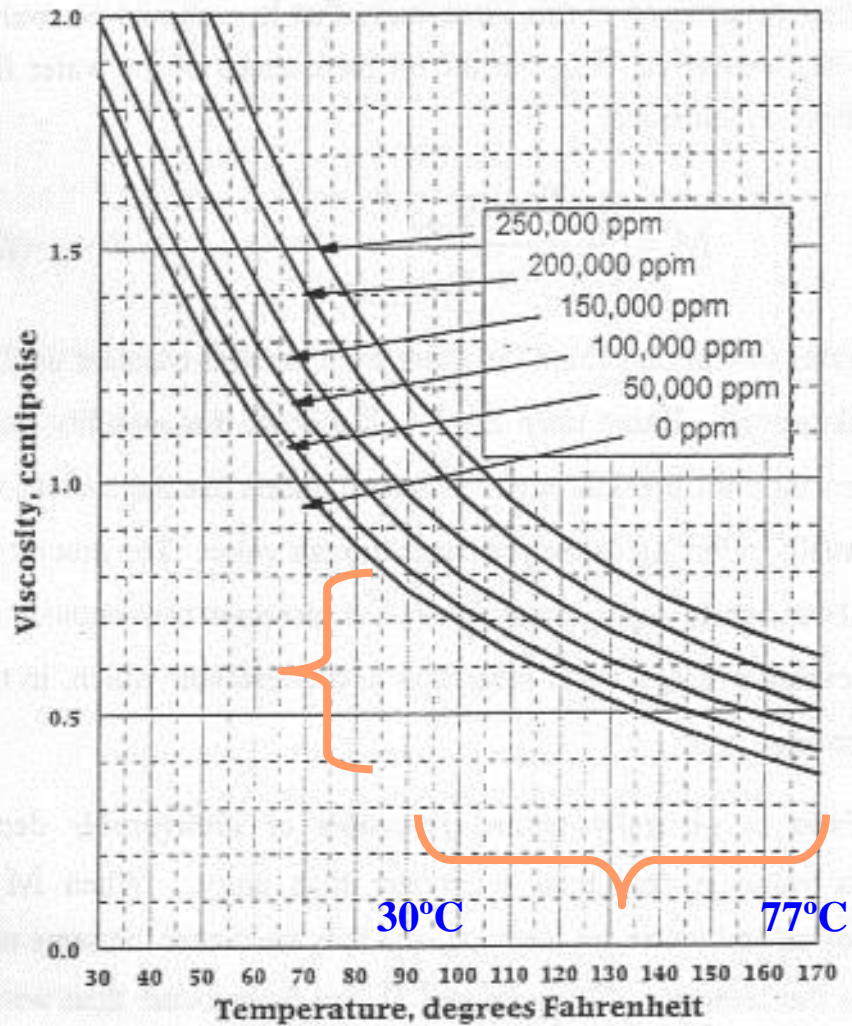
**Según Craig:**

<b>MOJADA POR AGUA:</b>	<b><math>0,024 &lt; M &lt; 3,5</math></b>
<b>MOJADA POR PETRÓLEO:</b>	<b><math>0,150 &lt; M &lt; 4,2</math></b>

**NORMALMENTE**  
 **$0,02 < M < 2$**



### EFFECT OF TEMPERATURE ON VISCOSITY OF SALT WATER



## II.- CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL ARREGLO

Al iniciar la secundaria el yacimiento ya está desarrollado

perforar pozos infill es caro

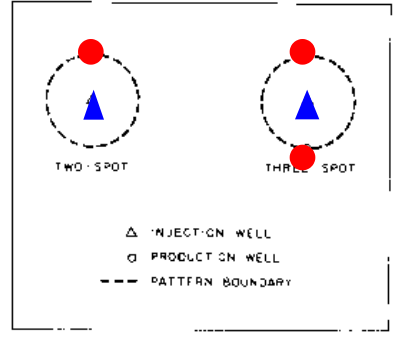
se debe prever desde el desarrollo del yacimiento la secundaria y terciaria

### Principales tipos de mallas:

- I.- línea recta directa
- II.- línea en zigzag (o desplazada)
- III.- five spot
- IV.- nine spot
- V.- seven spot



two spot



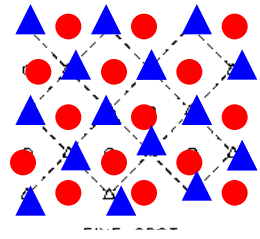
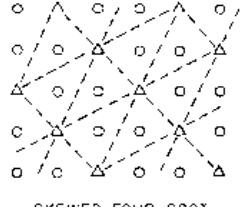
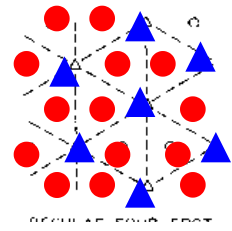
three spot



inyector



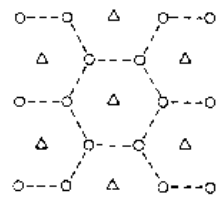
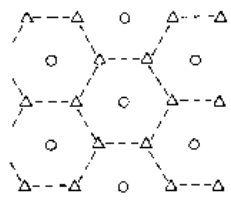
productor



four spot regular

four spot oblicuo

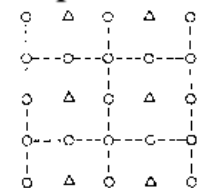
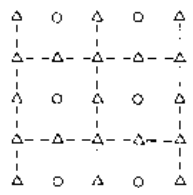
five spot



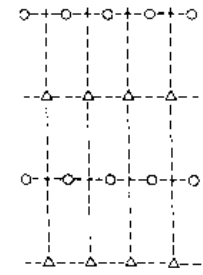
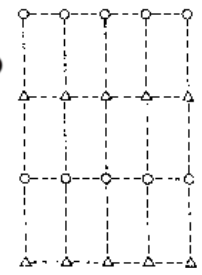
seven spot

seven spot invertido

nine spot invertido



nine spot normal



línea recta directa línea en zigzag

I.- línea recta directa

II.- línea en zigzag (o desplazada)

III.- five spot

IV.- nine spot

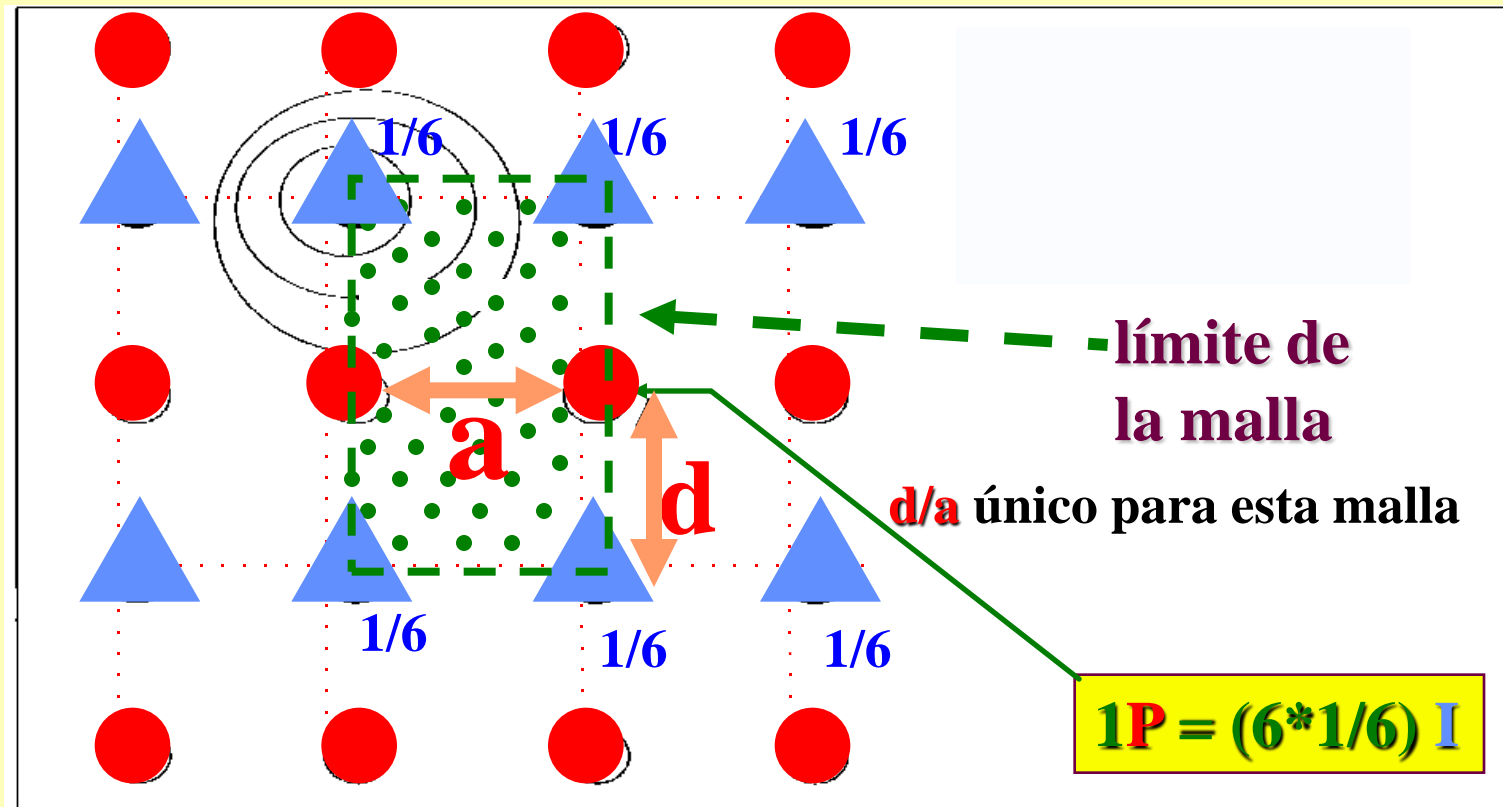
## II.I.- Empuje en línea recta directa

El aumento de la  $E_A$  se logra con el **aumento de  $d/a$**  es decir si los productores e inyectores están desplazados ( $>d$ ).

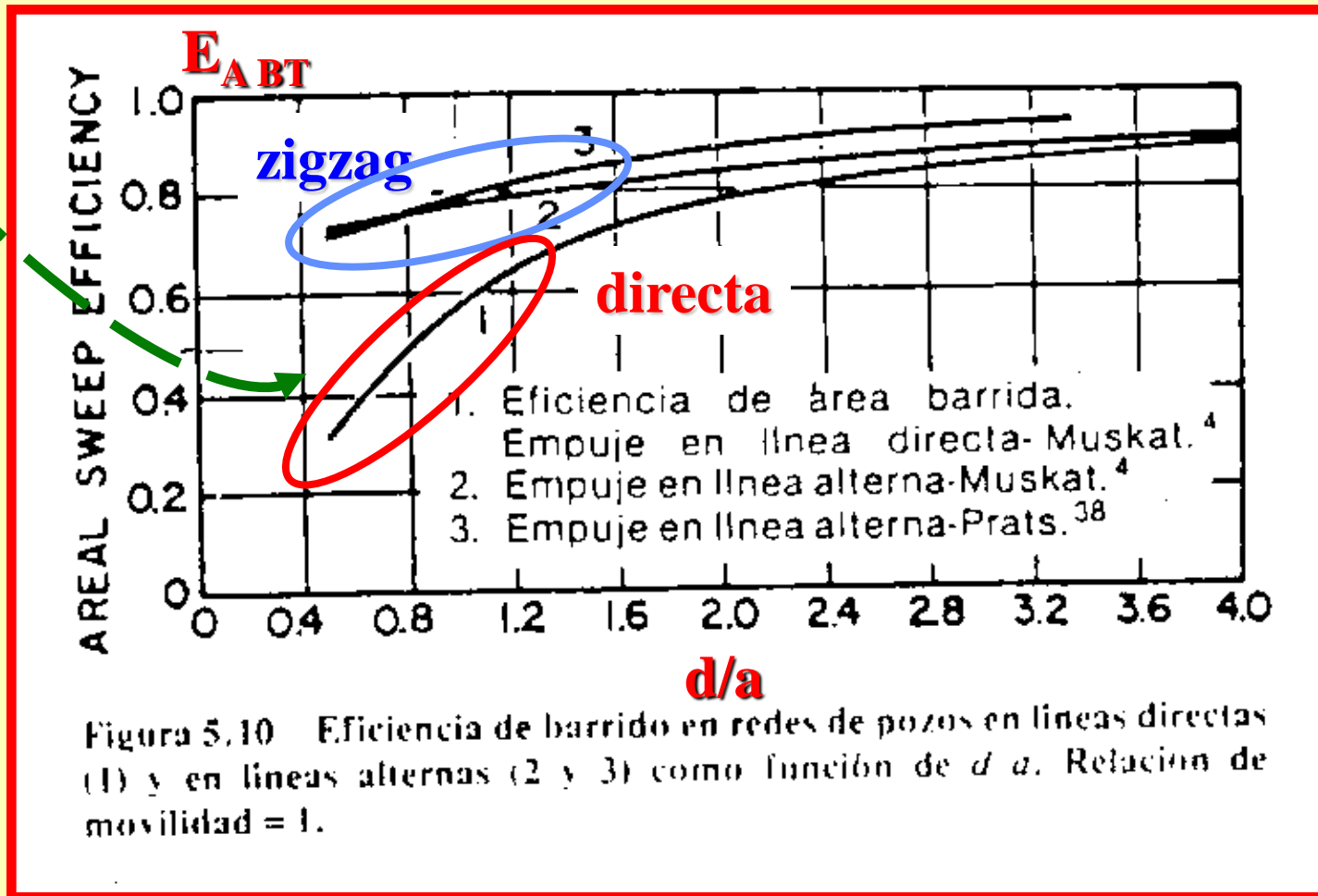
**d**: distancia entre productor e inyector adyacente

**a**: distancia entre dos productores de la misma línea

Relación inyector/productor = 1



La  $E_{Abt}$  se obtiene en función de  $d/a$  para  $M=1$ ,  
para barrido lineal y en zigzag



para Craig: Prats (3) es mas confiable

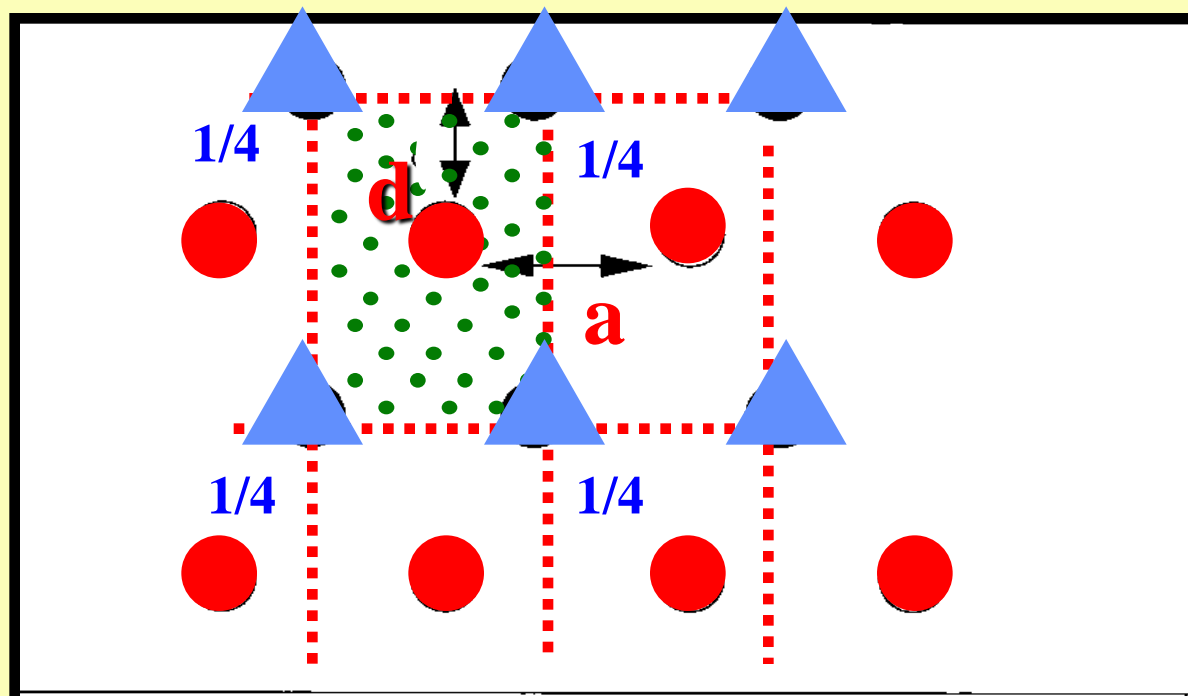
## II.II- Empuje en línea desplazada o zigzag

Es una modificación del de línea recta directa, acá **los productores están desplazados a la mitad de la distancia entre pozos.**

Comparado el zigzag con el lineal en el gráfico **MLC4-11** se ve que:

- mejora la  $E_{ABT}$  para cualquier  $d/a$
- especialmente cuando  $d/a$  disminuye

lo que **hace al zigzag preferible.**



$$1P = (4 * 1/4) I$$

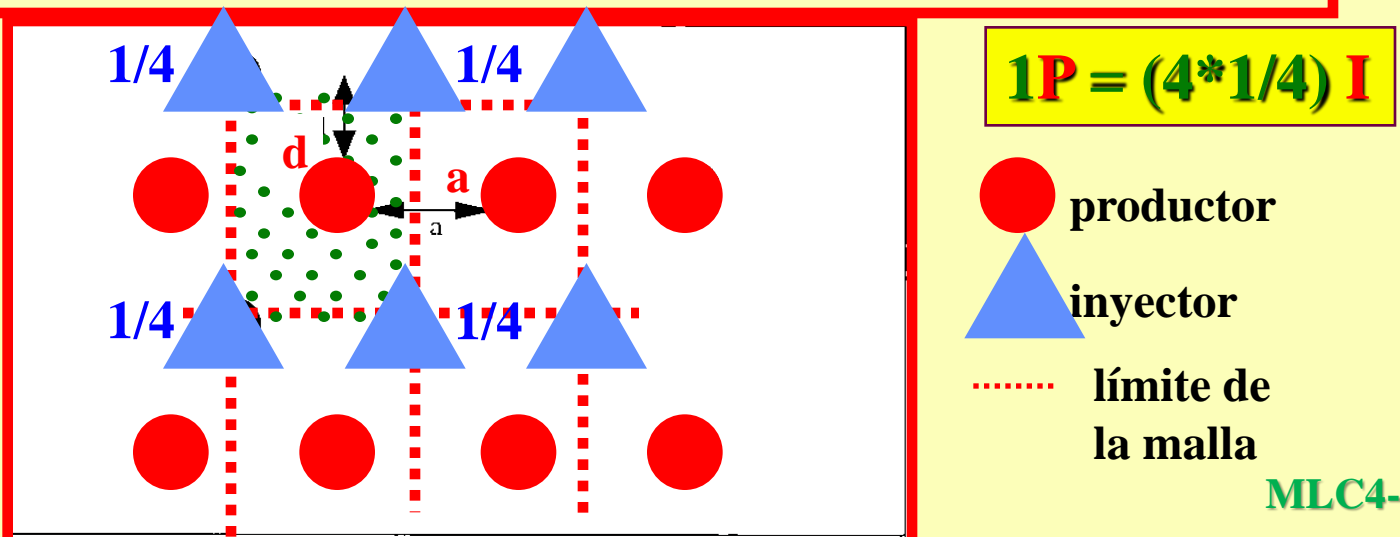
● productor

▲ inyector

..... límite de la malla

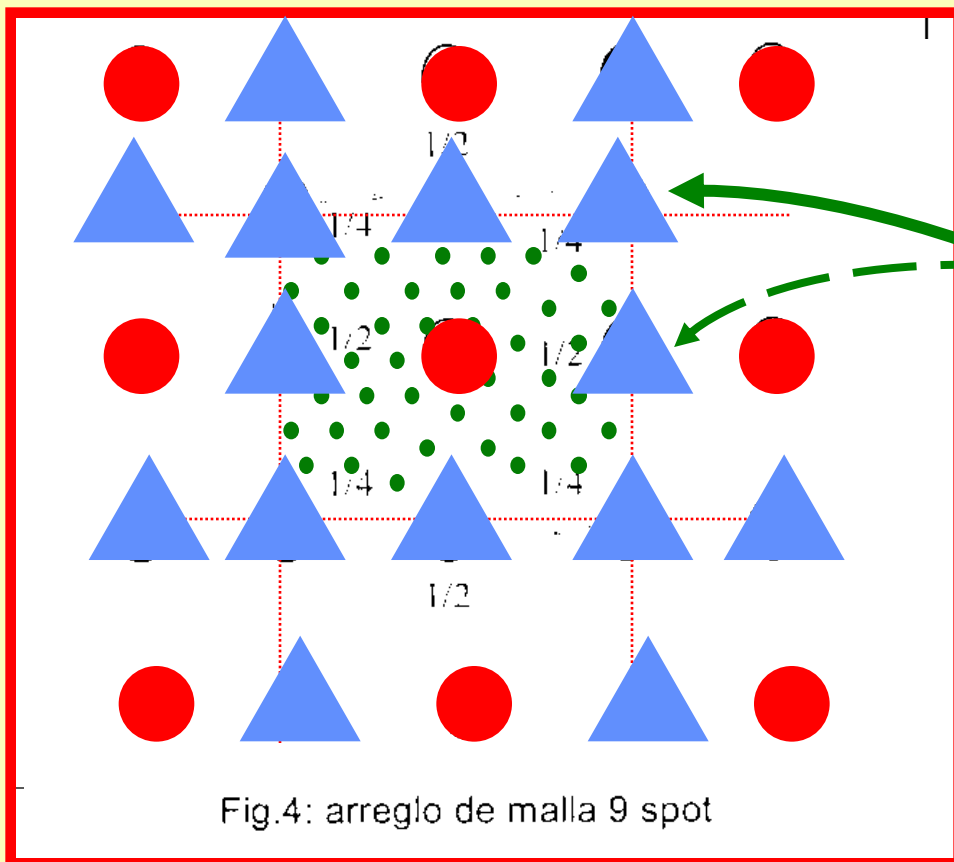
## II.III.- Five Spot

- Es un caso especial del mallado desplazado, acá la relación  $d/a=0,5$
- Es el **mallado mas utilizado**.
- Los pozos forman un **cuadrado**, con una relación **inyector/productor=1**
- Tiene **buena  $E_{Abt}$**
- Puede cambiarse de mallado simplemente cambiando la posición de los inyectores y productores, como con los mallados de 4 spot, 9 spot y 9 spot invertido



## II.IV.- Nine Spot

- En este mallado como el Five Spot los pozos forman un cuadrado, pero ahora con una relación **inyector/productor = 3**
- **Es utilizado cdo hay baja k y se necesita gran capacidad de inyección.**
- **El Nine Spot Invertido se usa cuando la k es elevada**
- Presenta un mallado flexible, sin necesidad de perforaciones infill; puede convertirse tb a línea recta con una relación inyector/productor = 1

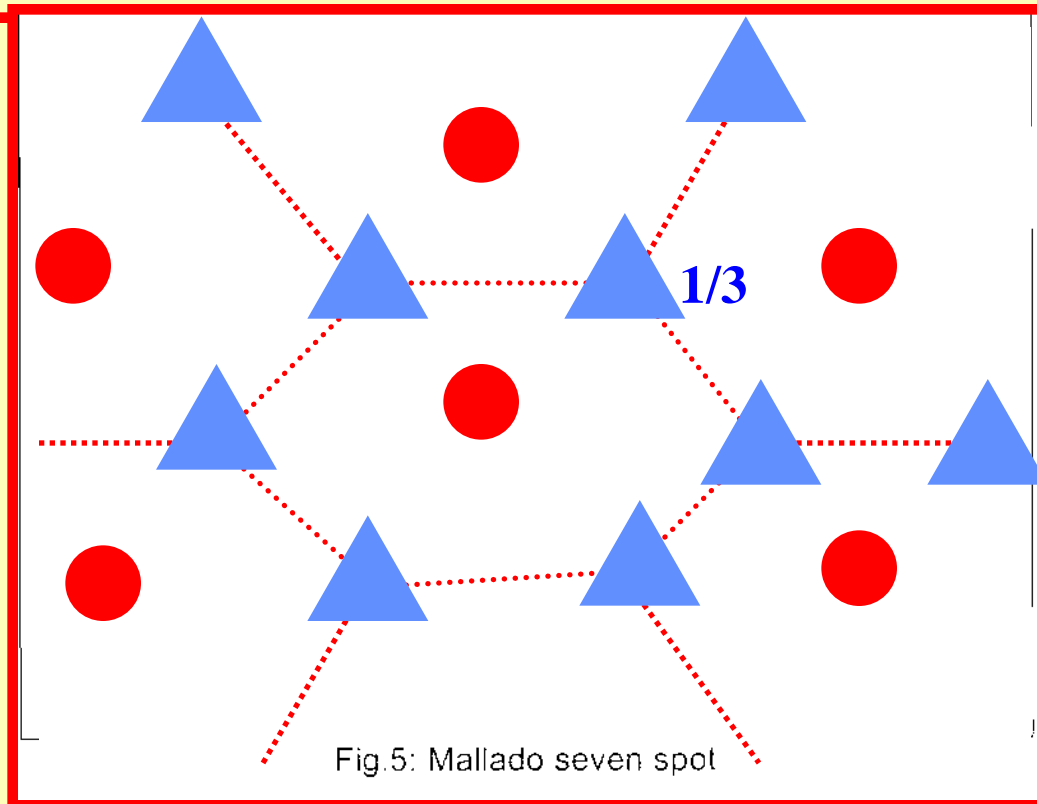


$$[(4*1/4) + (4*1/2)] I = 1P$$

$$3I = 1P$$

## II.V.- Seven Spot

- Es poco utilizado por la cantidad de perforaciones que requiere.
- Tiene 2 inyectores por cada productor
- Es utilizado cdo hay baja k
- El **mallado es un triángulo equilátero** o un **sistema lineal desplazado** donde  $d/a = 0,866$
- El **Seven Spot Invertido** se lo conoce como **Four Spot** con una relación inyector/productor = 0,5



$$(1/3 * 6) I=1 P$$

$$2 I=1 P$$



# Factores que la controlan la Eficiencia de Barrido Areal

$$E_A = \frac{\text{Area Barrida}}{\text{Area Total}}$$

1. **M** |
  - al disminuir mejora la  $E_A$  . **No la puedo cambiar**
  - **sólo podemos modificarla** por una asistida donde varío  $k, \mu, \theta$
2.  **$K_{\text{direccional}}$**  |
  - **No la puedo cambiar**
  - **Si se conoce se acomoda el arreglo para obtener la mejor  $E_A$**
3. **Distribución de presión entre inyectores y productores** |
  - **Se manejan para dar la  $>E_A$**
4. **Selección del pattern**

**Consideremos:**

**un five spot,**

**en un reservorio homogéneo,**

**con  $K$  uniforme y**

**una presión de fondo de inyección de 1000 psi (70 kg/cm<sup>2</sup>) y**

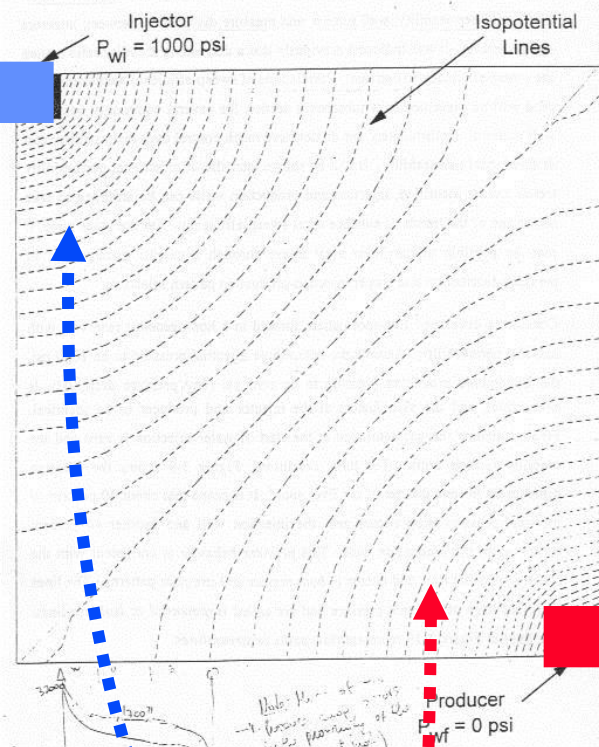
**0 psi en el fondo del productor,**

**$S_g=0$  y**

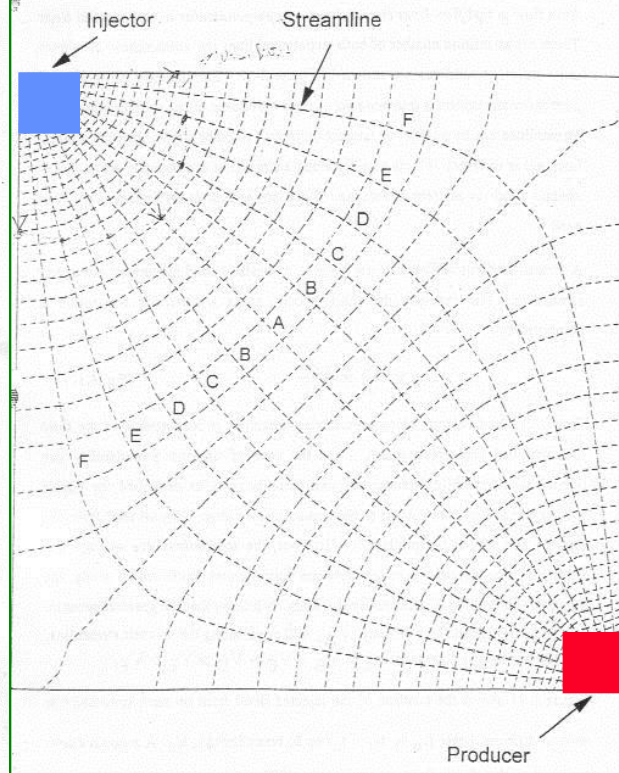
**$M=1$**

FIGURE 5-9

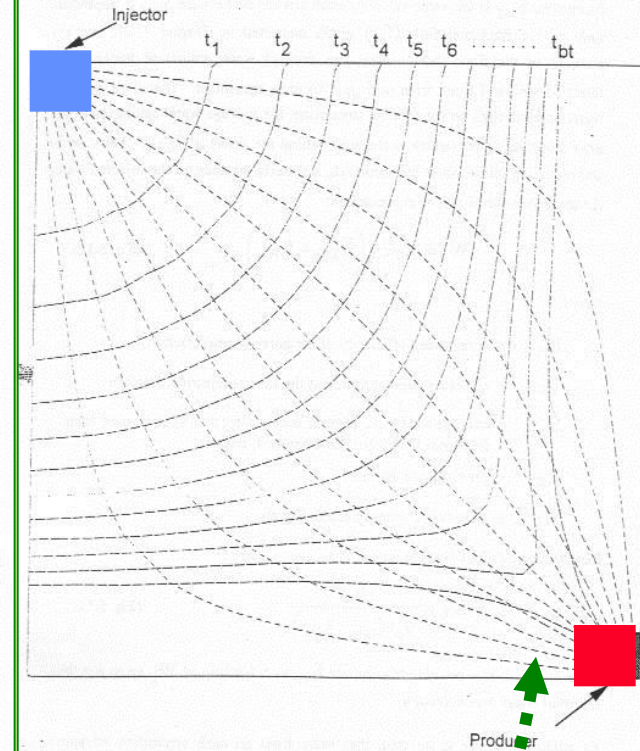
ISOPOTENTIAL LINES FOR A DEVELOPED FIVE-SPOT PATTERN WITH A MOBILITY RATIO EQUAL TO 1.0



ISOPOTENTIAL LINES AND STREAMLINES FOR A DEVELOPED FIVE-SPOT PATTERN WITH A MOBILITY RATIO EQUAL TO 1.0



FLOOD FRONT POSITION AT DIFFERENT TIMES UP TO BREAKTHROUGH FOR A DEVELOPED FIVE-SPOT PATTERN WITH A MOBILITY RATIO EQUAL TO 1.0



El modelo define la distribución de  $p$  (vemos un  $\frac{1}{4}$  de five spot)  
 El 40% del  $\Delta p$  ocurre cerca del pozo inyector y el otro 40% cerca del productor (flujo radial).  
 Las líneas son de  $p$  cte o equipotenciales

Las líneas equipotenciales son  $\perp$  a las líneas de flujo  
 Según Darcy la velocidad a la cual el fluido se mueve por las líneas de flujo es inv. prop. al  $\Delta L$  ya que el resto es cte  $v = k/\mu * \Delta p / \Delta L$   
La distancia es la diagonal

$$V_A > V_B > V_C > V_D > V_E > V_F$$

Vemos el frente de inyección a distintos tps:  $t_1, t_2, \dots, t_{bt}$

- la máxima velocidad

se da sobre la línea de flujo mas corta  
que corresponde a la diagonal  
será la 1º en romper

- velocidades menores

se da sobre líneas de flujo mas externas  
corresponde a la porción del reservorio  
que permanecerá sin barrer a la rotura

Para un mallado **5 Spot** con **M= 1** normalmente la  **$E_A = 70\%$**

**Comparativamente para este mallado las líneas de flujo no diagonales**

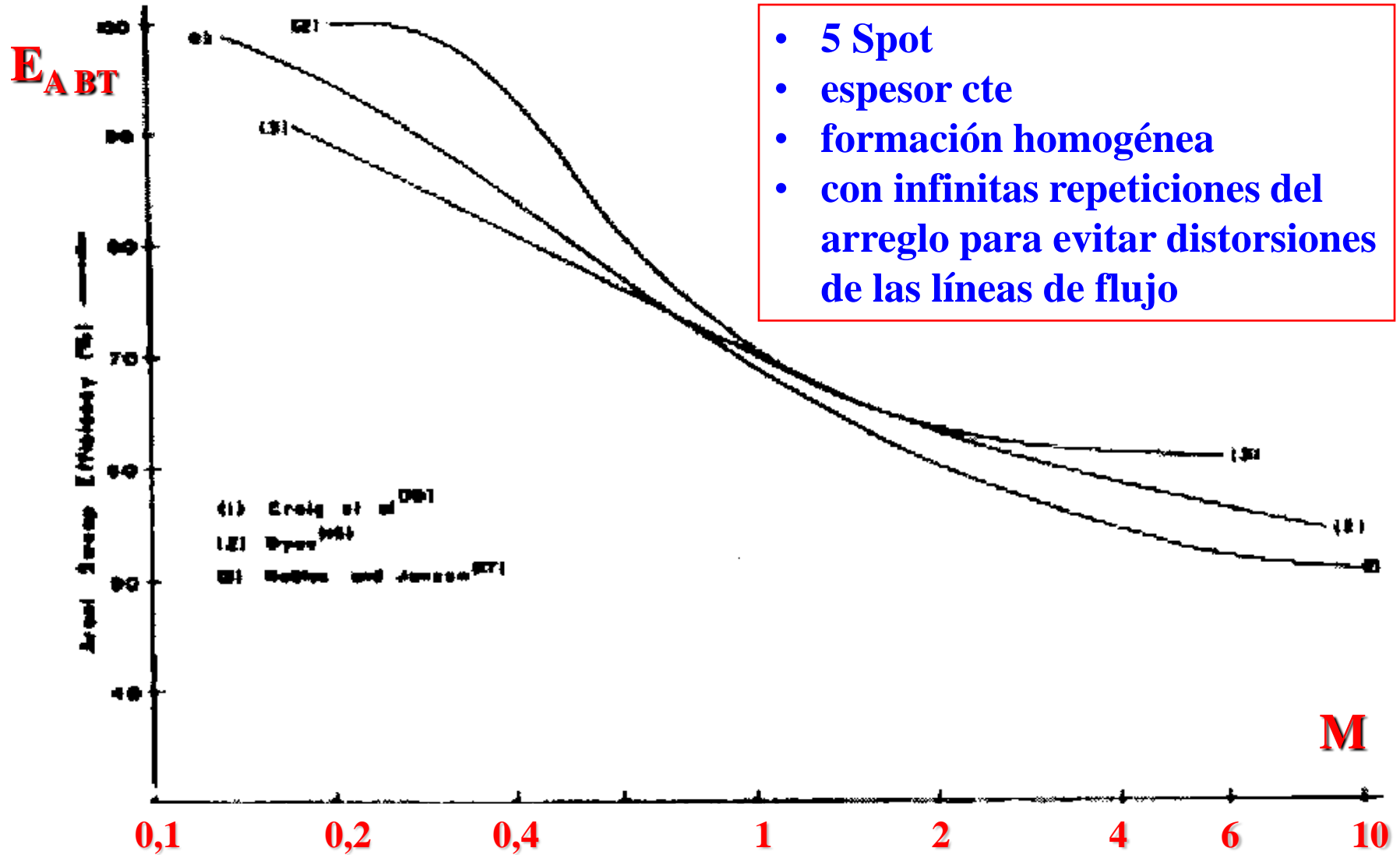
**M>1**

< resistencia al flujo por lo que son mas  
largas y la  **$E_A$  disminuye**

**M<1**

la velocidad es mayor y la  **$E_A$  aumenta**

# Comparación de los efectos de $M$ sobre la $E_{ABT}$ según distintos autores



- 5 Spot
- espesor cte
- formación homogénea
- con infinitas repeticiones del arreglo para evitar distorsiones de las líneas de flujo

**M**

# Eficiencia de Barrido Areal a la Rotura según el mallado

En forma general se presentan cuatro tipos de mallados :

- 1.- MALLADOS AISLADOS:** no hay otros pozos, no se aprecian límites.  $E_A$  puede superar el 100% (diapositiva 29)
- 2.- MALLADOS DESARROLLADOS:** todo el yacimiento ha sido desarrollado con el mismo mallado. Es lo más común.
- 3.- MALLADOS NORMALES:** cuando la malla tiene un productor
- 4.- MALLADOS INVERTIDOS:** cuando la malla tiene un solo inyector

En gral. se grafica  $E_A$  vs el log M para cada tipo de mallado



**$E_{ABT}$  para un arreglo 5 spot :**

**a) desarrollado:** comparación de las curvas obtenidas por varios autores. Para  $M < 1$  hay concordancia, pero para  $M > 1$  hay 4 curvas reportadas y por ej. para  $M = 3$  la  $E_A$  varía de 52 a 66%

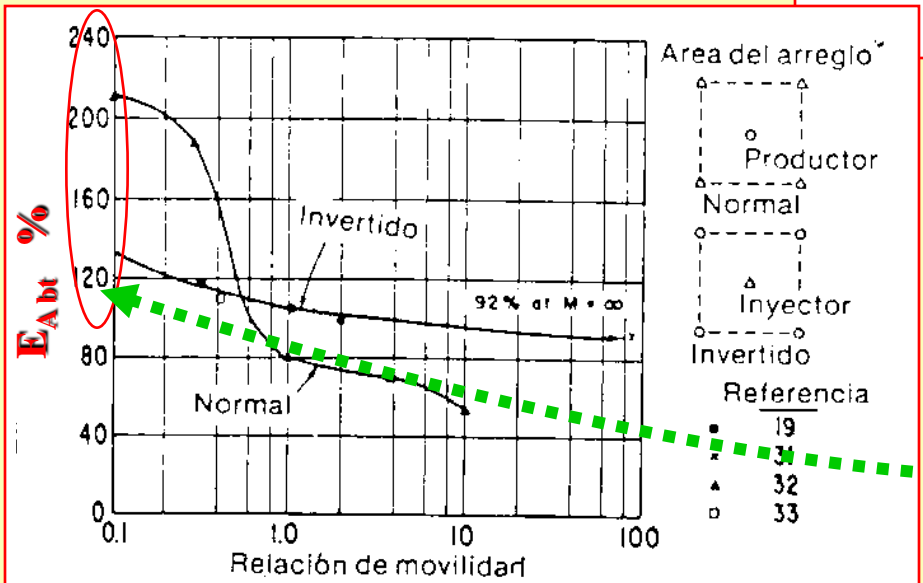
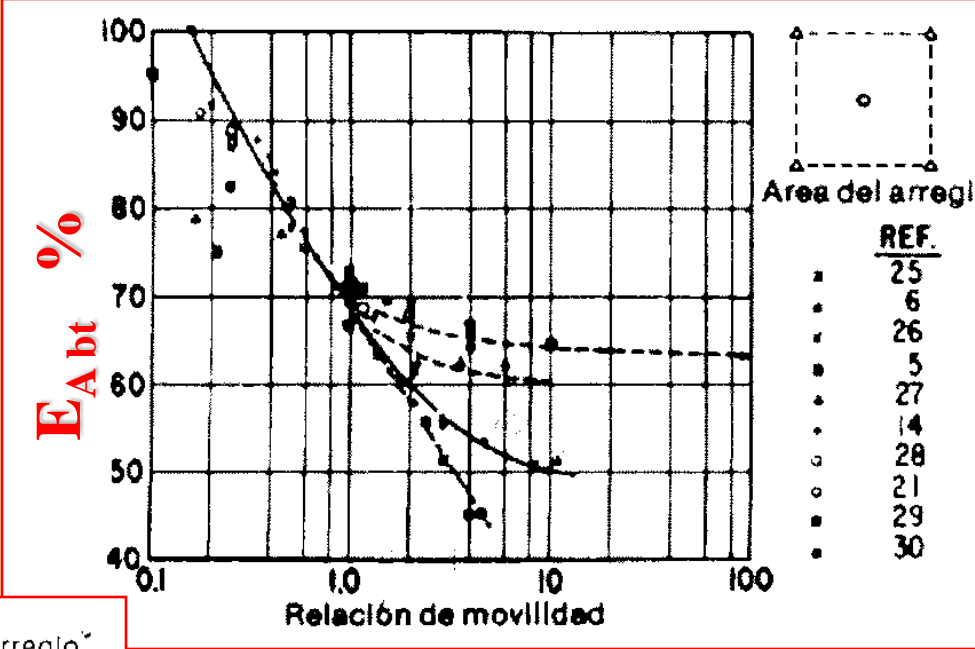


Figura 5.4 Area barrida a la surgencia, pilotos de un solo pozo de inyección (cinco pozos, invertido) y sencillo de cinco pozos (normal de cinco pozos).

**b) arreglo aislado:**  
 uno normal y otro invertido  
 Se ve que la  $E_A$  puede superar el 100%

## Eficiencia de Barrido Areal después de la Rotura

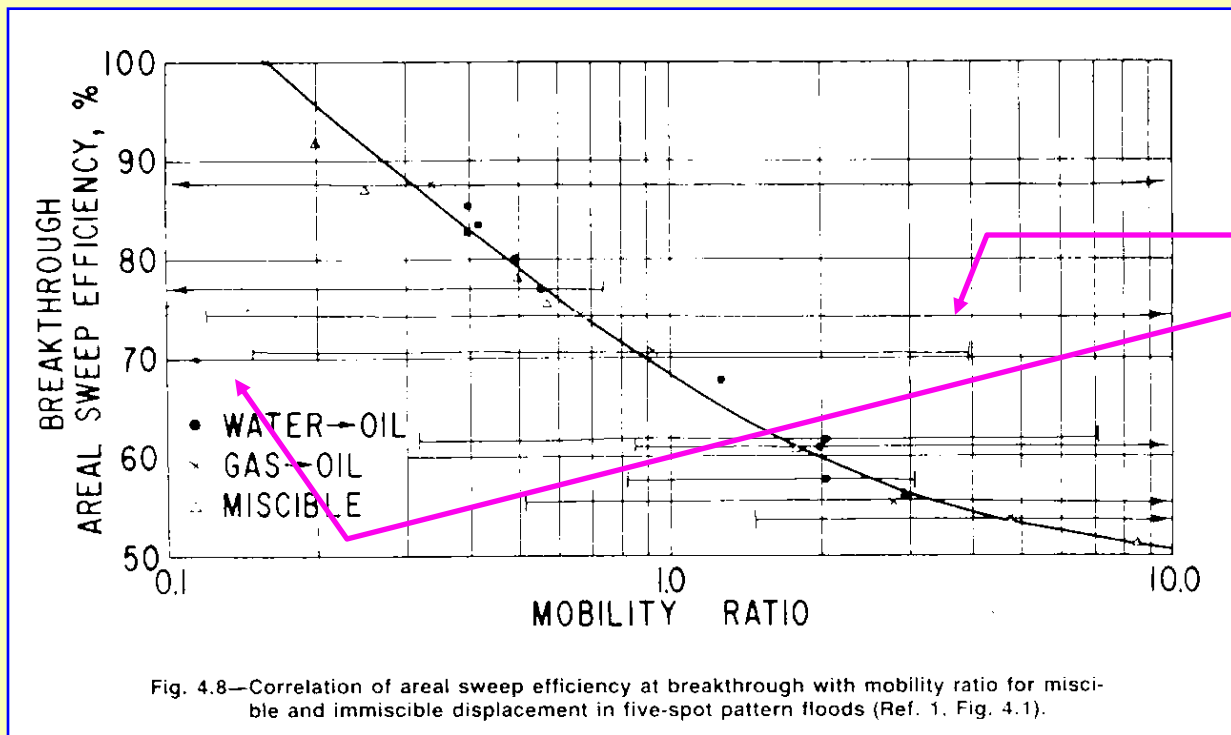
Si se sigue inyectando  
luego de la rotura  
en una MALLA DESARROLLADA:

- $E_A$  crecerá hasta el 100%,
- **WOR** aumentará pudiendo llegar a que el yacimiento no pueda operarse económicamente por los grandes volúmenes de agua de inyección y de purga que se manejan en las instalaciones en superficie y por lo tanto no se puede alcanzar barrido completo.

(MLC4-4)



Craig (Cap. 5) experimentó inyecciones de agua e inyecciones de gas, a un 5 Spot, donde descubrió que definiendo  $M$  cdo  $k_{rw}$  se toma  $S_{wpromBT}$ ,  $M_s$ , los datos de  $E_{ABT}$  y  $M$  coincidían con los de otros investigadores con fluidos miscibles.



Además **compara  $M$  cdo  $k_{rw}$  se toma:**

- al desplazamiento total en el frente de invasión

**lo que da una correlación ambigua**

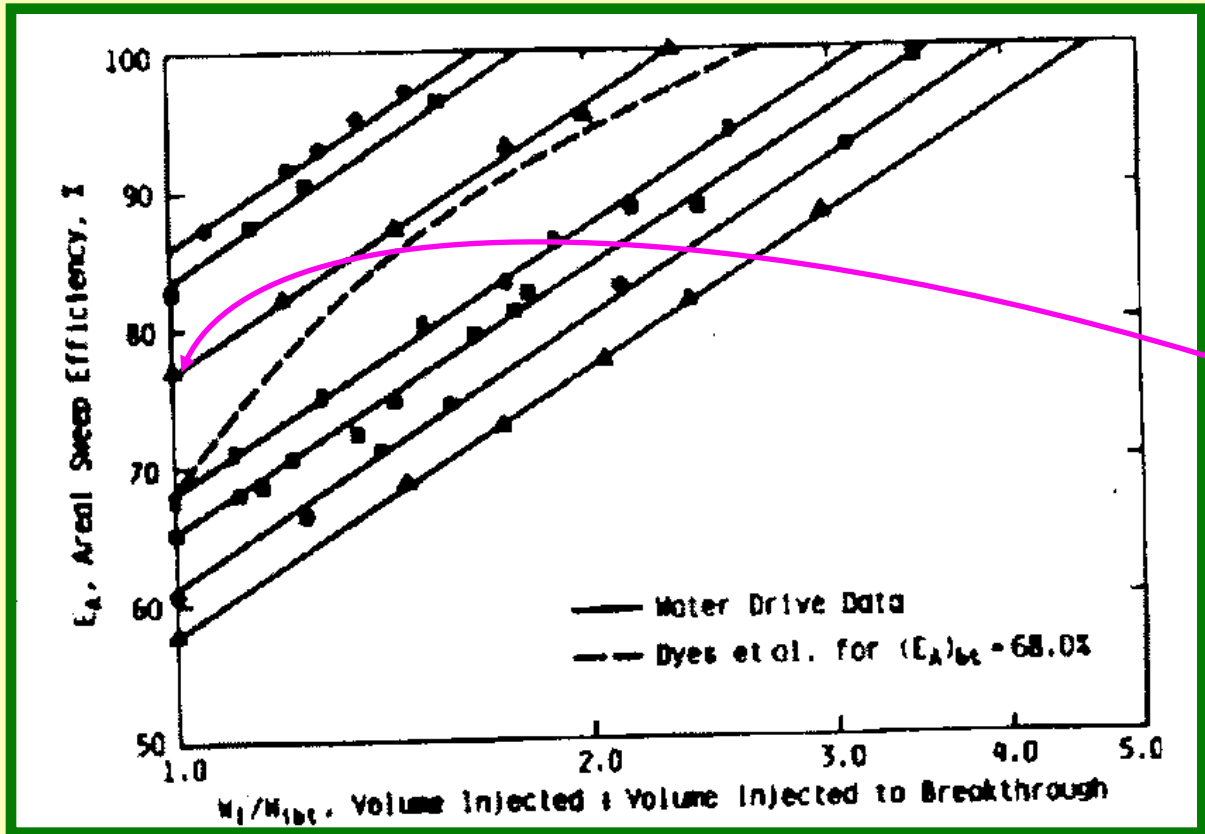
**El valor de  $E_{ABT}$  se estima de la correlación la cual es ajustada con:**

$$E_{ABT} = 0,54602036 + \frac{0,03170817}{M_s} + \frac{0,30222997}{e^{M_s}} - 0,00509693 M_s$$

← cdo  $k_{rw}$  se calcula a la  $S_{wmed}$  detrás del frente

La ec. es válida para:  **$0,16 < M_s < 10$**

Experimentalmente CGM encontraron para un arreglo Five Spot, que  $E_A$  aumenta linealmente luego de la rotura con el logaritmo de:  $W_i / W_{iBT}$  (vol. inyect./vol. inyectado a BT)



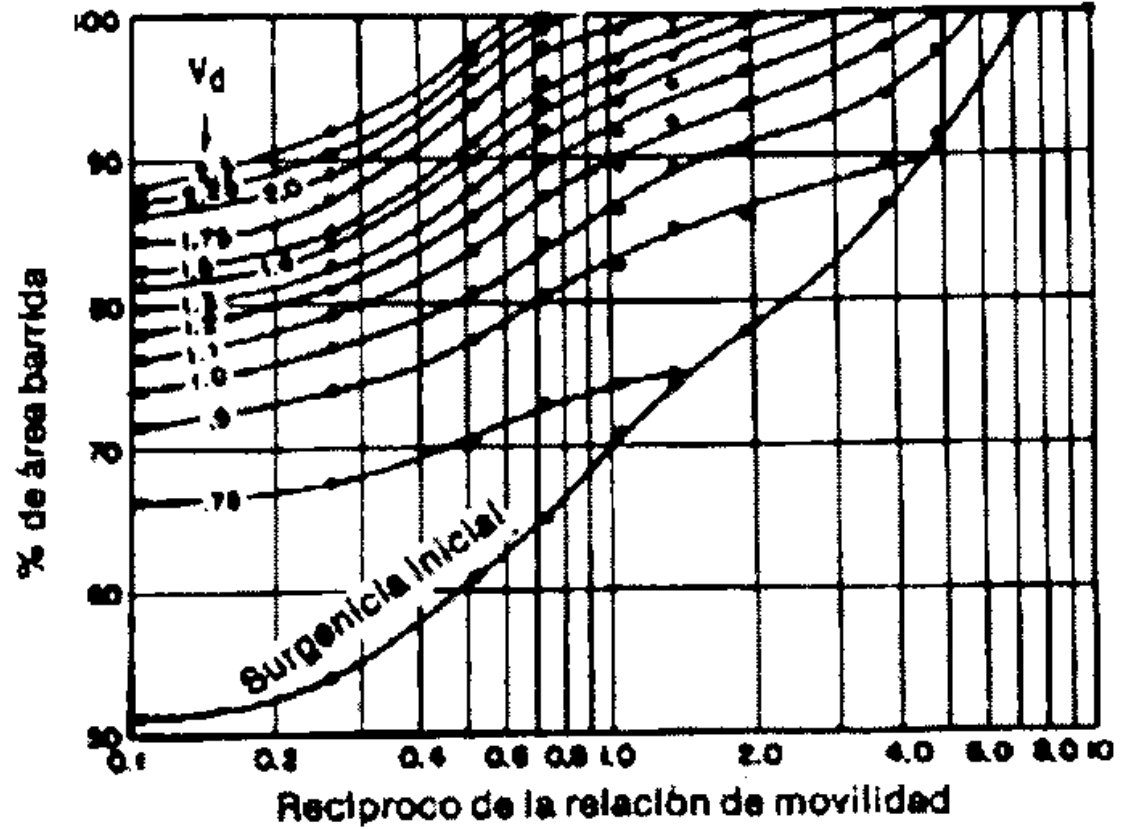
cuya gráfica puede ajustarse con la ec.

$$E_A = E_{ABT} + 0,633 \log \frac{W_i}{W_{iBT}}$$

a la Swemed

$$E_A = E_{ABT} + 0,274 \ln \frac{W_i}{W_{iBT}}$$

La figura muestra la Correlación de  $E_A$  en función  $M$  para un **arreglo Five Spot desarrollado** aplicable después de la rotura, en **isolínea los volúmenes desplazados**



**Factores experimentales:**  
 $V_D$  y  $\Psi_s$

$V_D$  : volumen poral desplazable

$V_p$  : volumen de la malla

$(\Delta S_o)_{max}$  : Sat. de pet. Máx desplazable

$\Psi_s$  : fracción de flujo de la región barrida, que es = fw si lo que fluye en esa región es agua

$$V_D = \frac{W_i}{V_p|_{malla} (\Delta S_o)_{max}} = \frac{W_i}{V_p|_{malla} (1 - S_{wir} - S_{or})}$$

**Método Dyes**  
 Craig (Cap 5)

### III.- Otros factores que afectan la $E_A$

Las correlaciones se desarrollaron para reservorios ideales, cdo se utilizan para predecir  $E_A$  se debe tener en cuenta:

#### 1.- Fracturas:

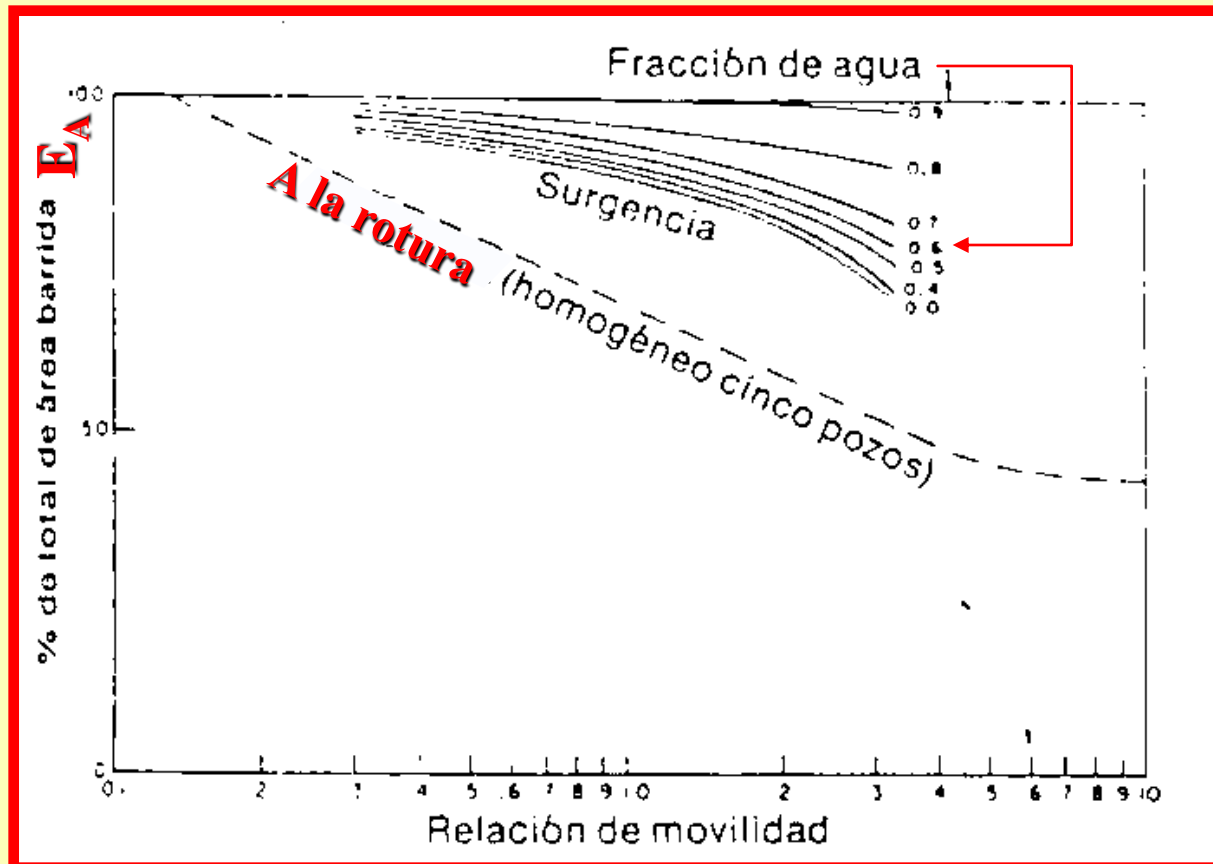
- Si la malla se ubica en su dirección se produce la rotura temprana.
- Se debe ubicar la línea productores-inyectores perpendicular a la fractura.
- Amoco sugiere que si el inyector está fracturado para no afectar  $E_A$  debe ser  $x_f/L < 0,15$  donde  $x_f$  es la longitud media de la fractura y L la distancia productor-inyector.

2.- **Permeabilidad direccional:** se generan durante la deposición por el movimiento del agua en una dirección predominante o durante el desarrollo de la porosidad.

- Tiene un efecto semejante pero mas leve que el anterior
- Se debe ubicar los productores-inyectores perpendicular a la dirección de máxima permeabilidad.

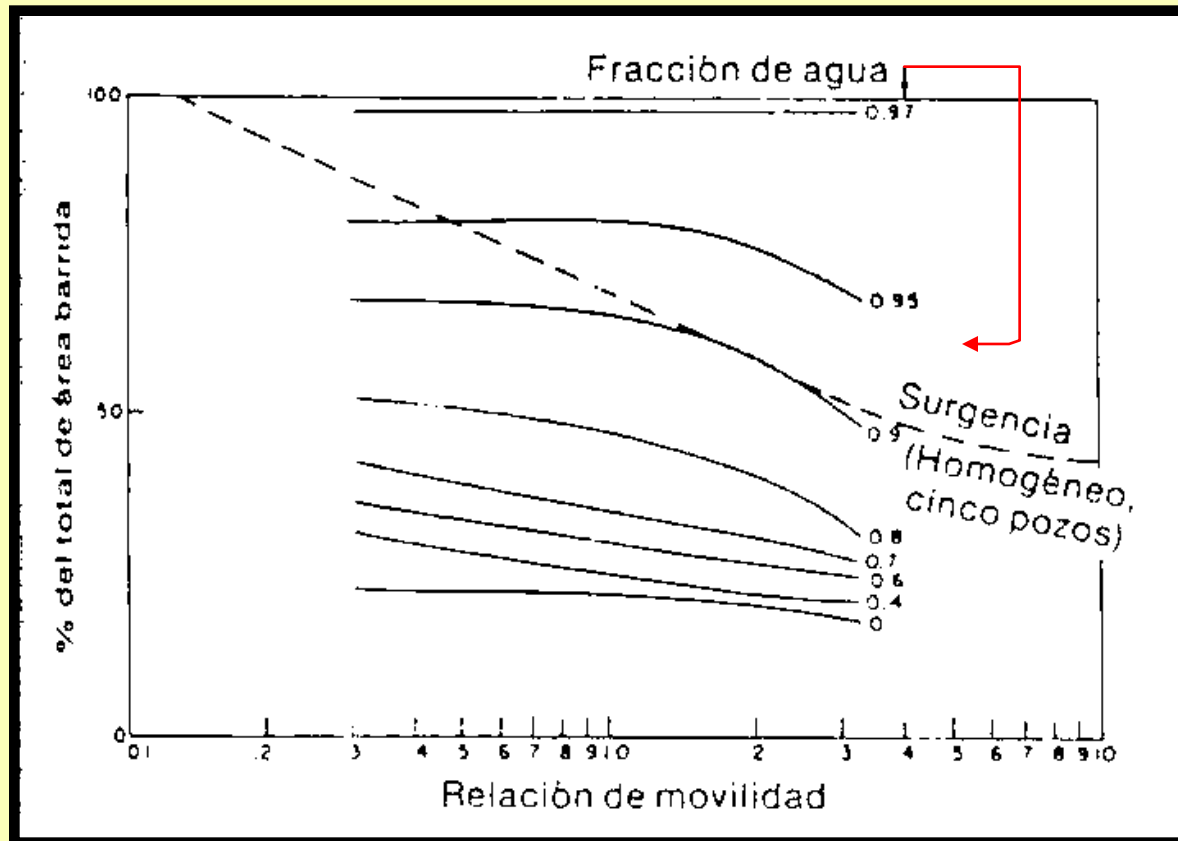
## Estudio de Hutchinson del efecto de $k$ direccional sobre el comportamiento de la inyección en un modelo de cinco pozos.

- La figura da la  $E_A$  para un sistema con  **$k$  horizontal anisótropa**
- Este es el arreglo mas favorable y donde la dirección de máxima  $k$  es paralela a las líneas que conectan dos inyectores adyacentes.
- El contraste de  $k$  es de 16:1



# Estudio de Hutchinson del efecto de $k$ direccional sobre el comportamiento de la inyección en un modelo de cinco pozos.

- La figura da la  $E_A$  para un sistema con  $k$  anisótropa
- Este es el arreglo menos favorable donde la dirección de máxima  $k$  es paralela a la línea que va del productor al inyector
- El contraste de  $k$  es de 16:1



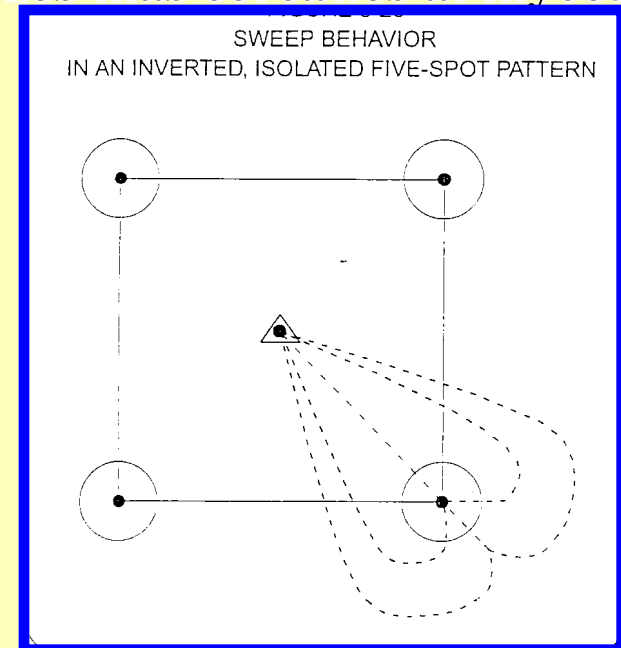
**3.- Variaciones de Permeabilidad Areal:** puede generarse como consecuencia de los cambios en la compactación, cementación, depositación, etc.

Se maneja cada caso en particular y su efecto sobre la  $E_A$  se determina mediante modelos matemáticos o la experiencia propia del yacimiento.

**4.- Ángulo de Buzamiento:** cuando la formación está inclinada el efecto dominante es la gravedad; se inyecta el agua en la base de la columna de petróleo.

**5.- Mallados Irregulares:** la recuperación es menor que en los regulares. Aparece el BT prematuramente en los pozos mas cercanos al inyector.

**6.- Mallados Aislados:** cuando se usa un modelo repetitivo, c/malla se comporta independientemente de las otras, sus fluidos quedan confinados por la influencia de los mallados vecinos. En un piloto en cambio la  $E_A$  puede ser mayor al 100%





## 7.- Saturación inicial de gas:

- los estudios de laboratorio usan 100% de líquidos.
- Craig encontró que cdo hay  $S_{g \text{ inicial}}$ 
  - el agua inyectada se moverá radialmente hasta que el banco de petróleo :
    - a) contacte a otro banco de petróleo de un inyector adyacente
    - b) alcance un productor
  - entonces el banco de agua se dirigirá al productor
  - La  $E_{ABT}$  con gas inicial es =  $E_{ABT}$  con 100% de líquido

**EL COMPORTAMIENTO EN LA ROTURA Y DESPUÉS ES IGUAL**

**PERO EL PETRÓLEO PRODUCIDO SERÁ MENOR EN UNA CANTIDAD IGUAL AL VOLUMEN OCUPADO POR EL GAS INICIALMENTE**

## Flujos en línea y periféricos

El barrido periférico utiliza los pozos de los bordes del reservorio como inyectores.

- Son muy flexibles permiten cambiar a un modelo mas denso si se necesita.
- Tiene problemas cuando hay alta  $S_{g\text{inicial}}$  ya que no habrá respuesta hasta que el agua no reemplace el volumen poral que ocupa, lo que implica mucho tiempo y gasto en agua.

El flujo en línea utiliza una sola línea de pozos en un borde o en el medio del reservorio como inyectores

- Utilizan pocos inyectores respecto a los productores, lo que da una inversión inicial baja.
- El corte de agua es bajo ya que se cierran los pozos cuando se produce la rotura y continúa la producción con la próxima línea de productores.
- Si el barrido se conduce hasta el final se necesita inyectar menos agua y con un buena  $E_A$  siempre que se cierren los pozos cuando los alcanza el BT
- Exigen reservorios con alta  $k$  para que el frente de agua se mueva largas distancias a la presión de inyección. Suele ir convirtiéndose los productores alcanzados por el agua a inyectores.

## Selección del mallado

### Debe considerar:

- 1.- la distribución de los pozos existentes
- 2.- **la geología del reservorio**
- 3.- los objetivos de la inyección y producción
- 4.- **la necesidad de perforar la menor cantidad de pozos**

### Debe satisfacer:

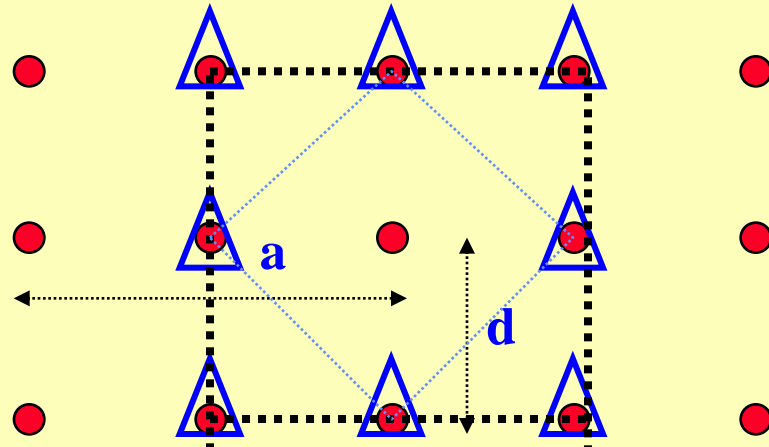
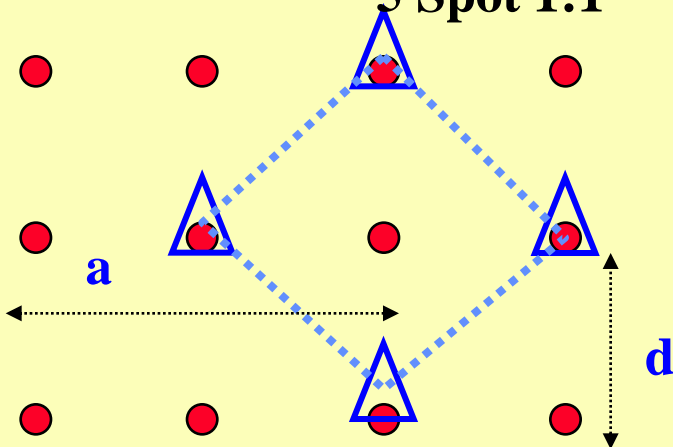
- 1.- **Dar el máximo caudal de petróleo posible.**
- 2.- Permitir la capacidad de inyección para cumplir con 1.
- 3.- **Dar la máxima recuperación de petróleo con el mínimo corte de agua**
- 4.- Ser compatible con los pozos existentes requiriendo pocos pozos a perforar
- 5.- **Compatible con las operaciones de otros operadores con los que se comparta el yacimiento**

Algunos mallados se pueden convertir a otros de acuerdo al patrón de perforación existente.

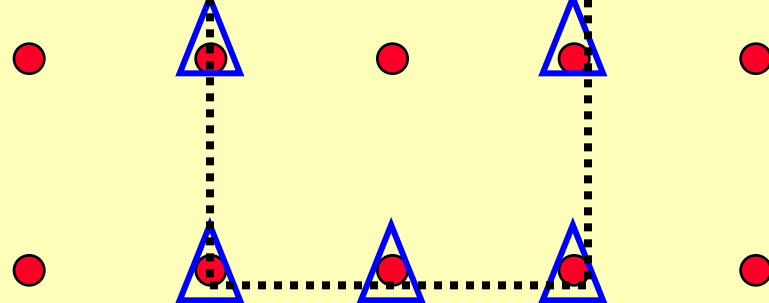
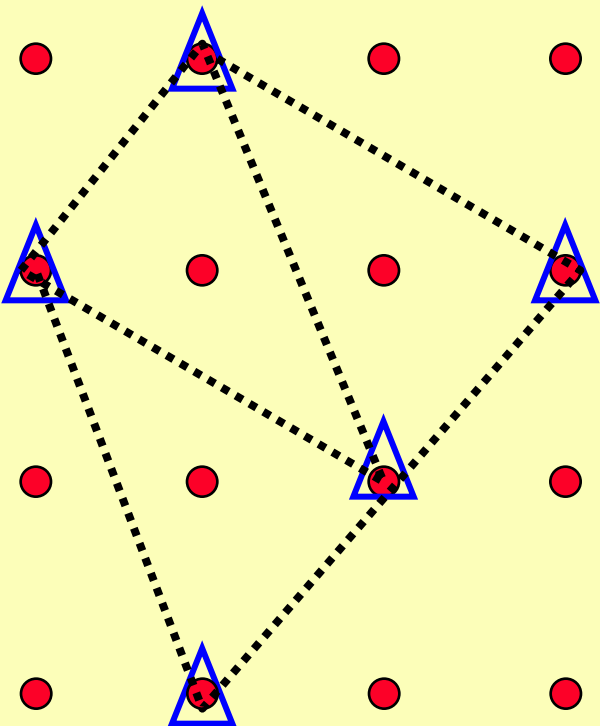
arreglo	relación: productor/inyector	patrón de perforación requerido
4 pozos	2	Triángulo equilátero
4 pozos en líneas oblicuas	2	<b>Cuadrado</b>
5 pozos	1	<b>Cuadrado</b>
7 pozos	1/2	Triángulo equilátero
7 pozos invertidos	2	Triángulo equilátero
9 pozos Normal	1/3	<b>Cuadrado</b>
9 pozos Invertido	3	<b>Cuadrado</b>
en línea directa	1	Rectángulo
en línea alternas	1	Líneas desfasadas de pozos

Si un yacimiento se desarrolló en forma **cuadrada** puede usarse como:

**5 Spot 1:1**



**4 Spot Desplazado 2**



**9 Spot Normal 1:3**  
**9 Spot Invertido 3:1**