

RESERVORIOS III

Ing. Silvia Maturano

2025

silvia.maturano@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RECUPERACIÓN SECUNDARIA

WATERFLOODING

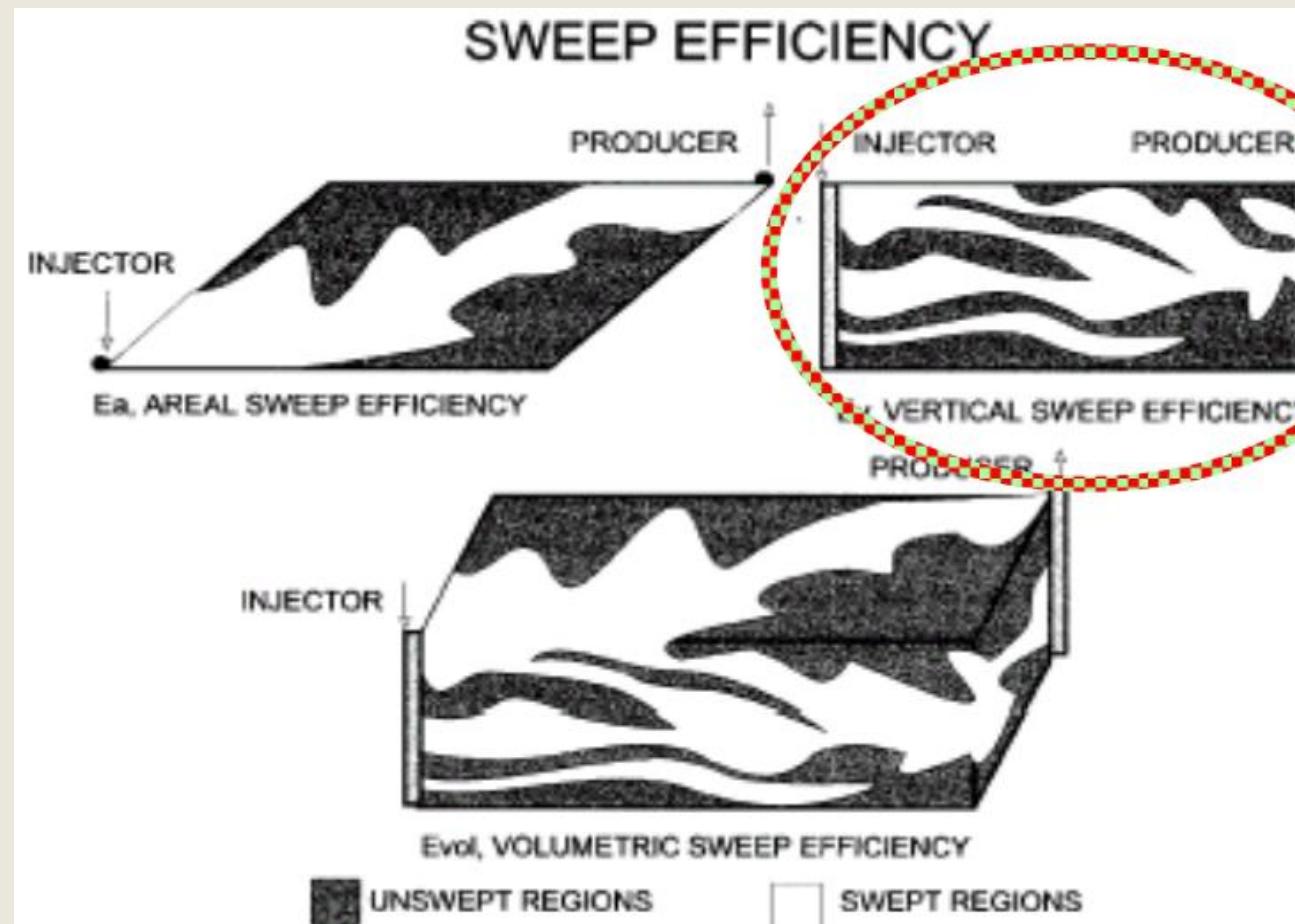
Eficiencia de barrido en el pattern E_p o E_A

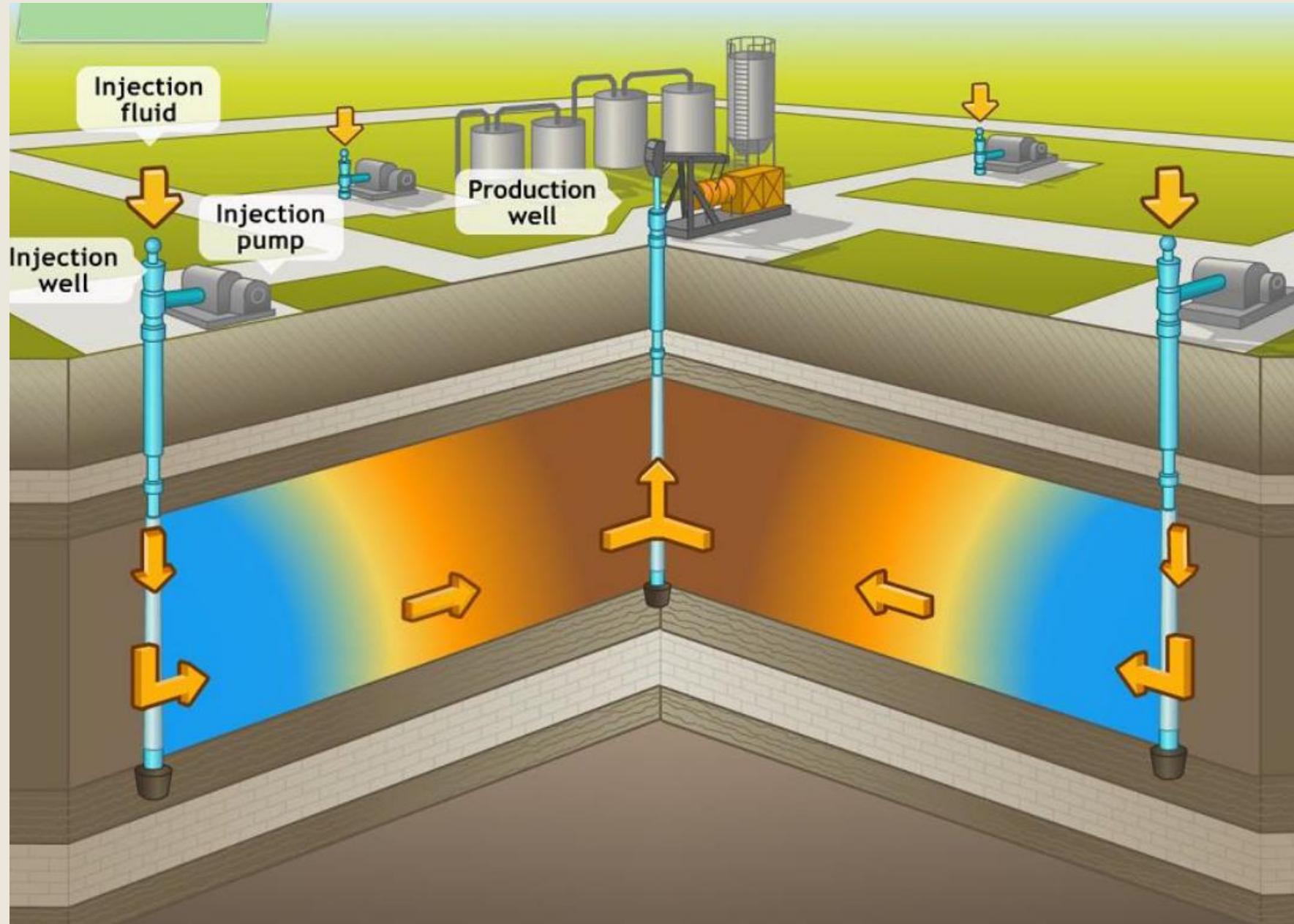
La eficiencia de barrido areal es función de:

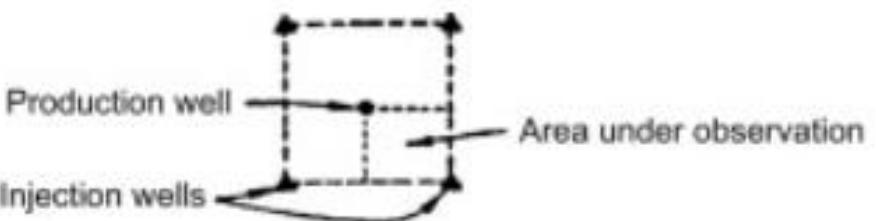
- Relación de movilidades.
- Configuración geométrica del pattern.
- Heterogeneidades del reservorio
- Cantidad de agua inyectada.

E_A :Fracción del arreglo contactada por el agua en un momento dado

Eficiencia de barrido

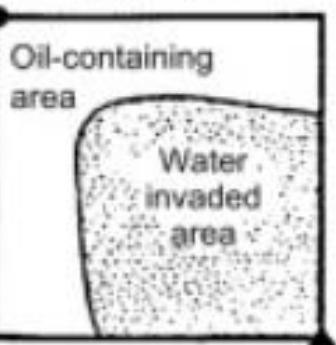




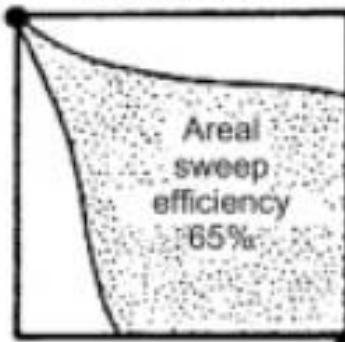


Water flooding:

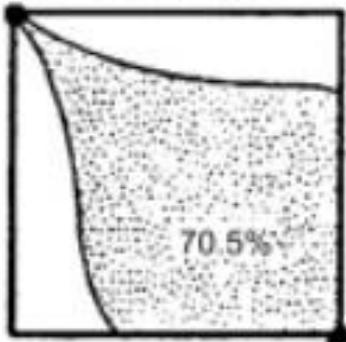
Mobility
ratio = 1.43



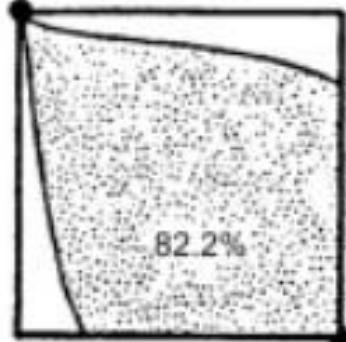
Water
breakthrough



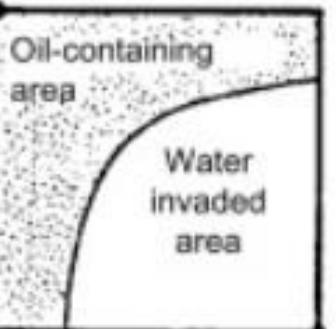
WOR=0.5



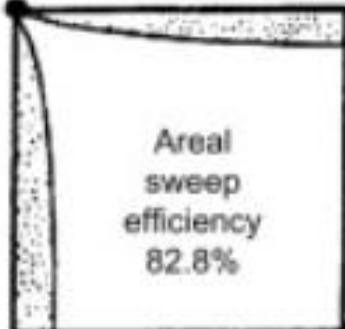
WOR=2



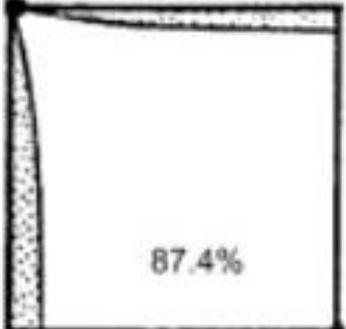
Mobility
ratio = 0.4



Water
breakthrough



WOR=0.6



WOR=4.7



X-ray shadowgraphs of flood progress in scaled five-spot patterns.

Eficiencia de barrido: M

M es la facilidad con que el fluido se mueve en el reservorio

$$M = \frac{\lambda_{desplazante}}{\lambda_{desplazado}} = \frac{kw/o}{ko/o} = \frac{\mu_o kw}{\mu_w ko}$$

?

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}

- 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 S_{wbt}

Coincide con S_{wc}

hasta la rotura la S_w es cte.: M=cte;
luego de la rotura aumentan: S_w ∴ k_{rw} ∴ M

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

Eficiencia de barrido: M

Estimación rápida

Dado que $\mu_w = 0.4$ a 0.8 cP , tomando valores típicos $k_{ro} = 1$ y $k_{rw} = 0.2$

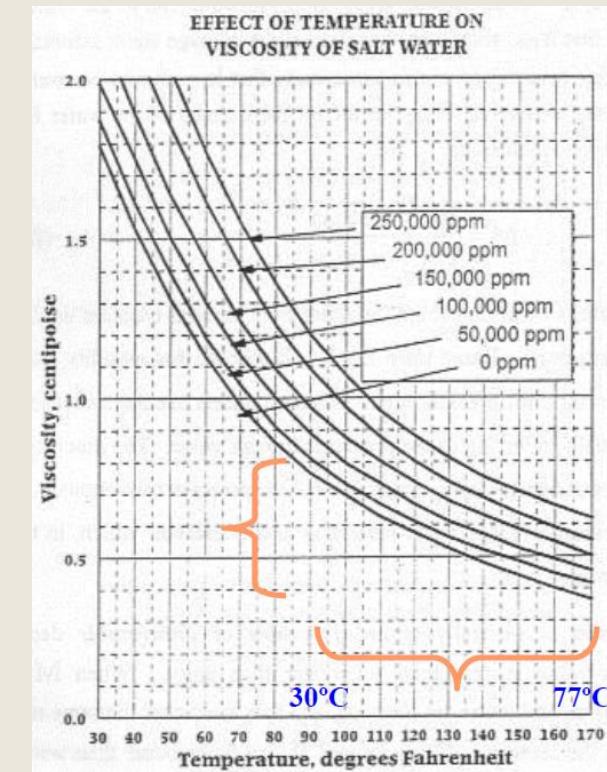
$$M=0.333 \mu_o$$

y $0.1 < \mu_o < 1 \text{ cP}$

Según Craig

Mojada por agua: $0.024 < M < 3.5$

Mojada por petróleo: $0.150 < M < 4.2$



Normalmente
 $0.02 < M < 2$

Eficiencia areal

Para desplazamiento en patterns regulares (5-spot o 7-spot), se sugiere adoptar:

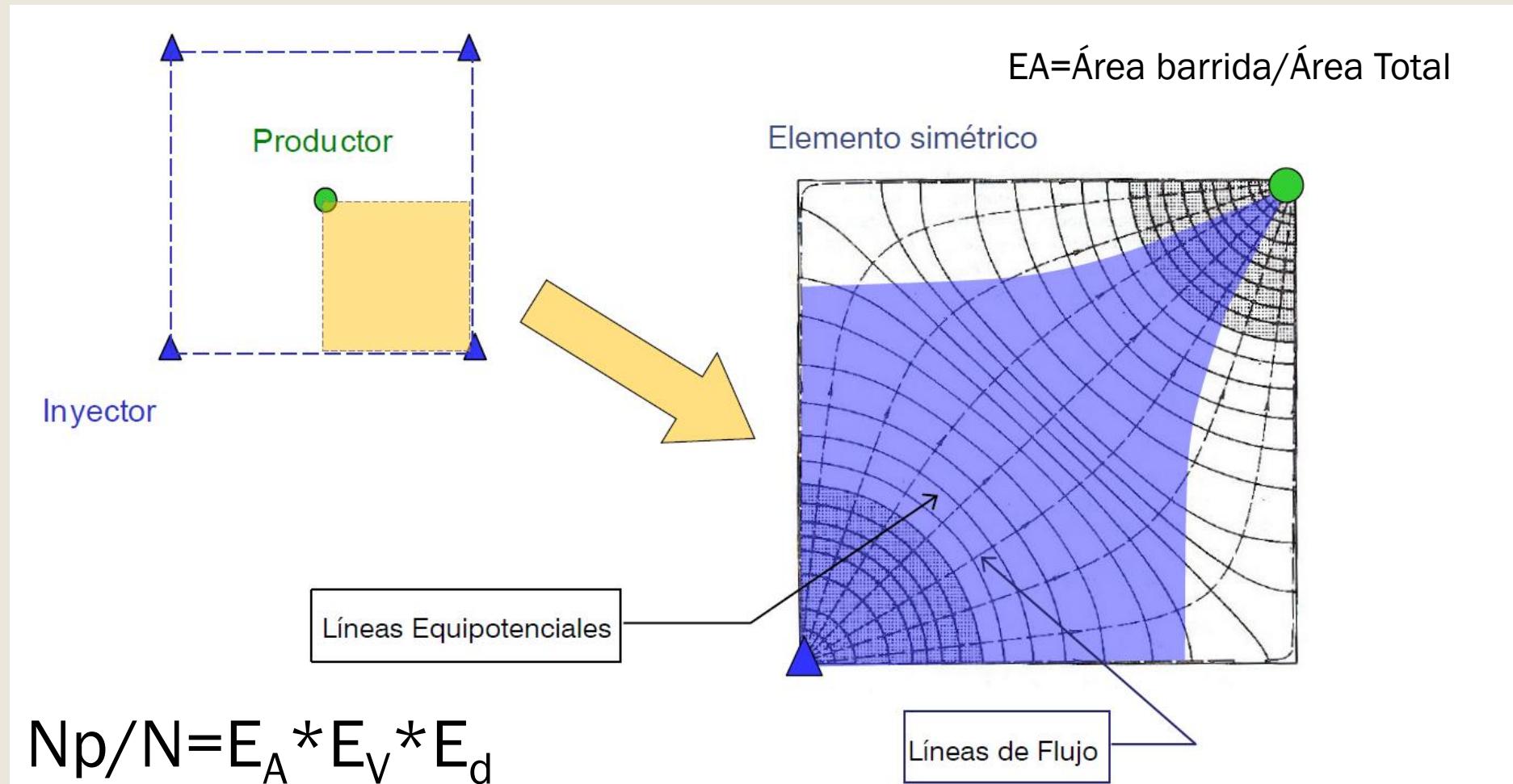
- $E_A = E_{Abt} + 0.316 \log (W_{iD} / W_{iDbt})$
- Si $1 < M < 10$ $E_{Abt} = 0.42 + 0.1 / M + (0.4 / M) - 0.012M$
- Si $M > 10$ $E_{Abt} = 0.733 / \ln(M + 0.5)$

Eficiencia areal

- $E_A = \text{área barrida} / \text{área total}$
- $E_{A\text{five spot}} = 70\%$

Eficiencia areal

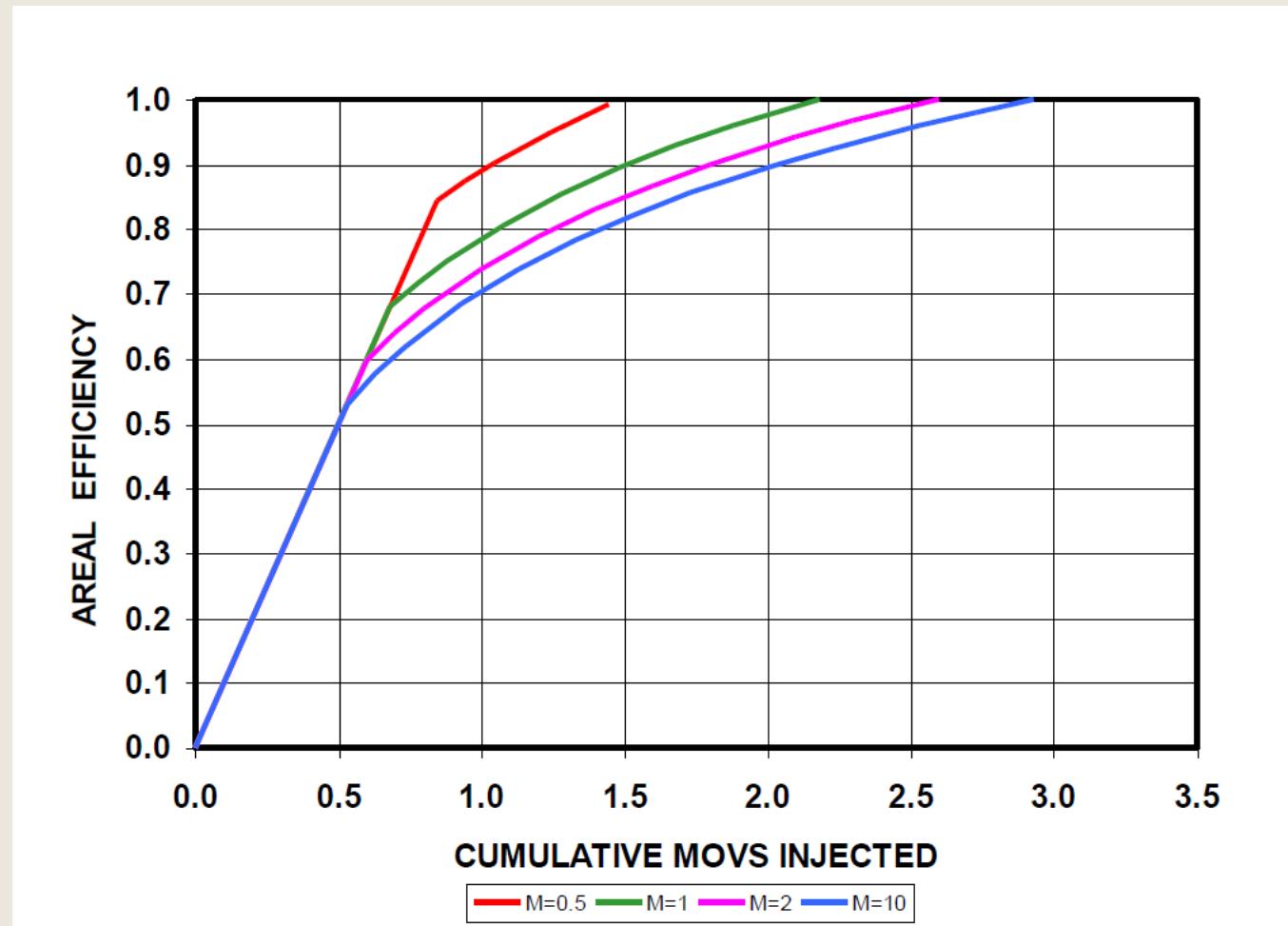
La selección del pattern es el primer factor en la determinación de la distribución de presiones dentro del reservorio. El conocimiento de esta distribución es sumamente importante ya que las mismas definen la presencia de las líneas equipotenciales, perpendicular a las cuales se mueven las líneas de flujo (streamlines).



?

Eficiencia areal

$$M = \frac{kw/\text{?}}{ko/\text{?}}$$

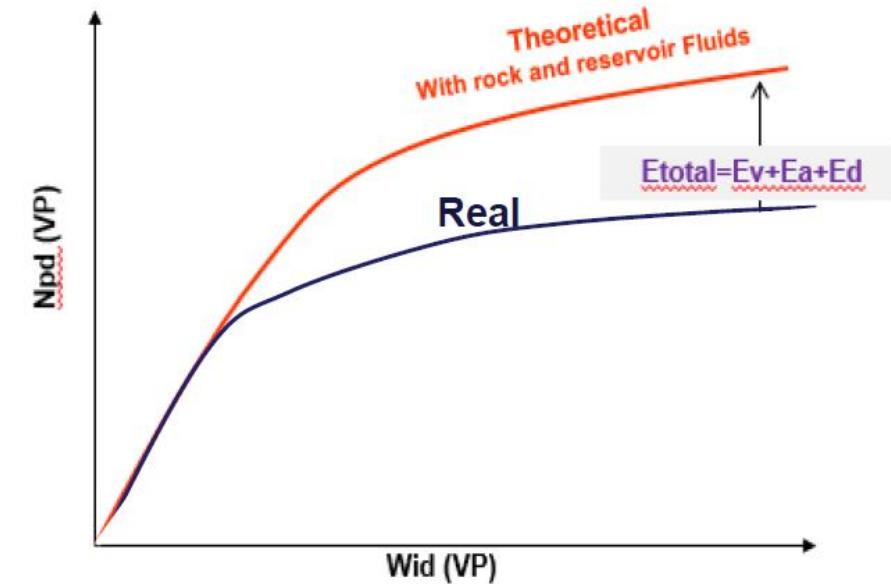
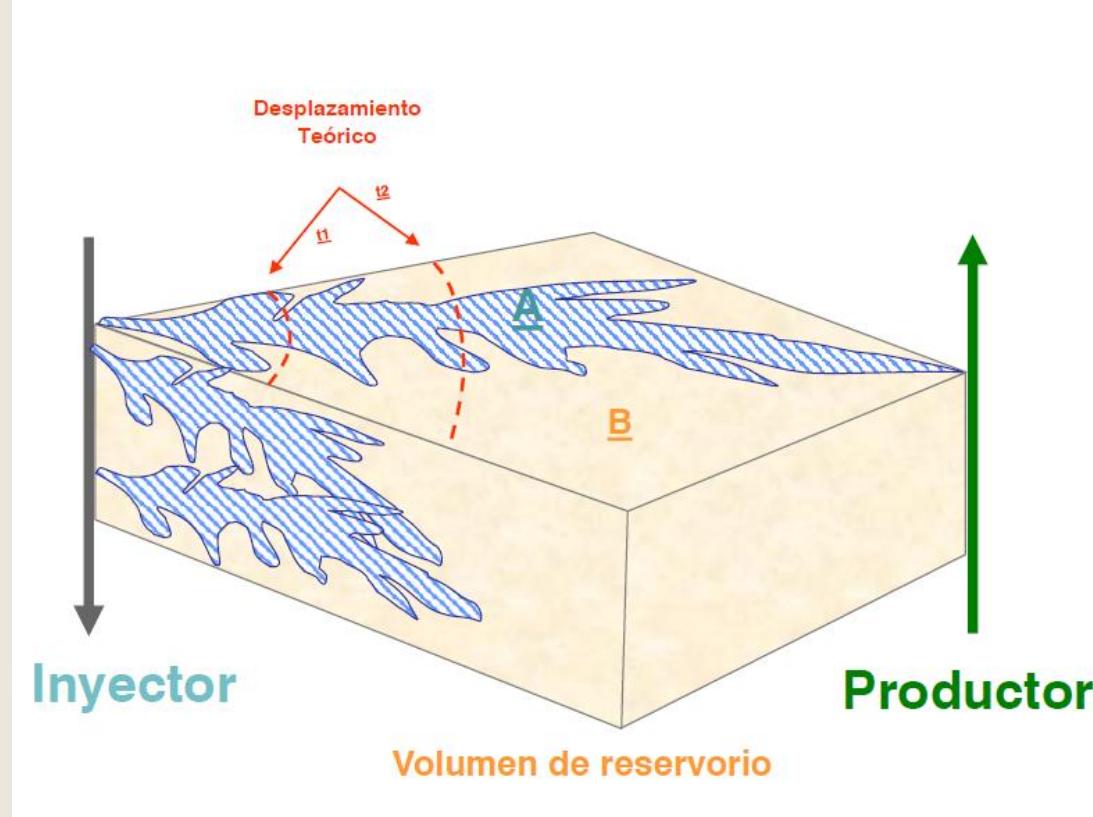


M>10 CGSJ
M<10 NQN

Eficiencia areal

- La velocidad a la cual un fluido se mueve por estas líneas de flujo es proporcional, de acuerdo a la ley de Darcy, al gradiente de presión, y la máxima velocidad se produce sobre la línea de flujo más corta, que corresponde a la diagonal, y por lo tanto esta será la primera en alcanzar el BT. Simultáneamente las velocidades menores se producen a lo largo de flujo más externas, y esta porción del reservorio, por supuesto, permanece no barrida al momento del BT.
- Matemáticamente se define la eficiencia de barrido areal como la relación entre el área barrida al área total. Para un mallado five spot con fluidos de relación de movilidad igual a 1 esta eficiencia es típicamente del 70%.

Eficiencias combinadas



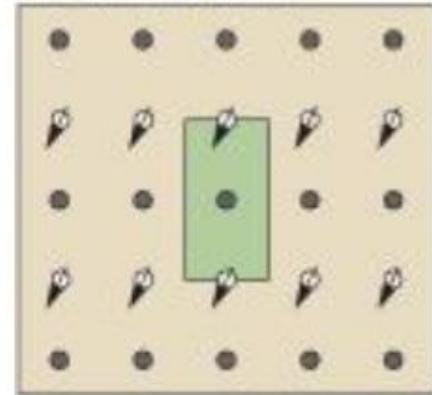
Eficiencia de barrido en el pattern E_p o E_A

Los principales tipos de malla son:

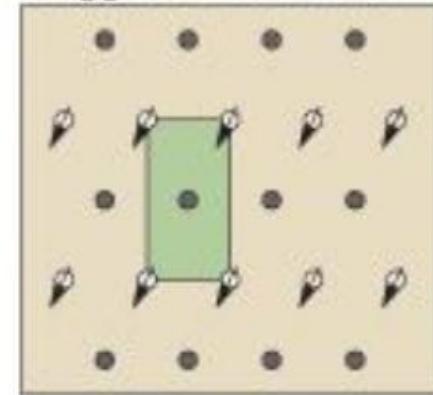
- línea recta directa
- línea en zigzag
- five spot
- seven spot
- nine spot

Mallas o patterns

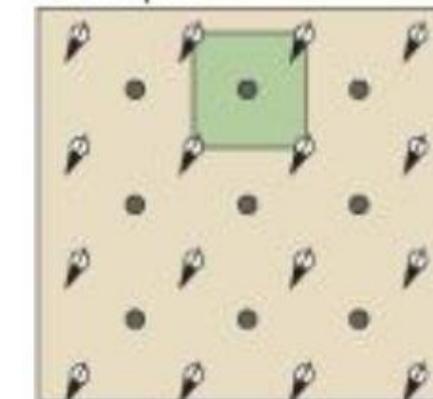
Direct line drive



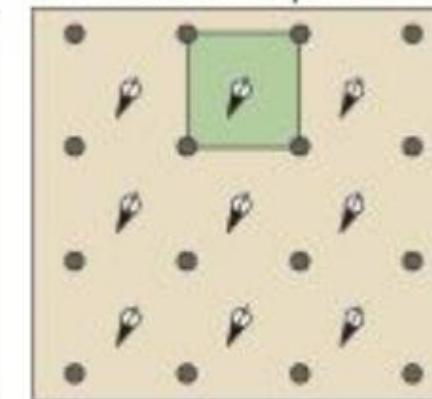
Staggered line drive



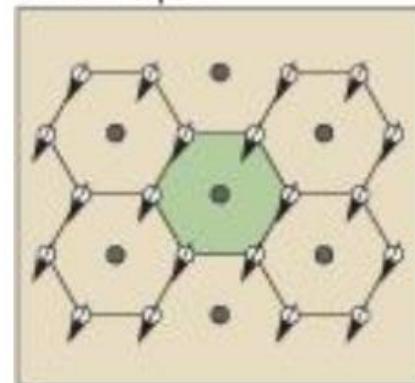
Five-spot



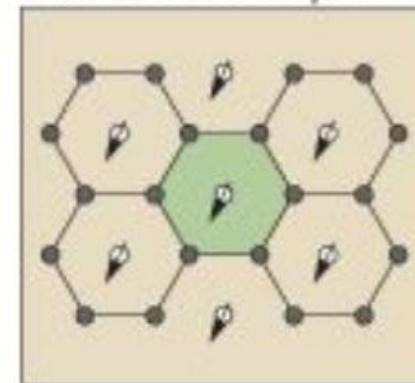
Inverted five-spot



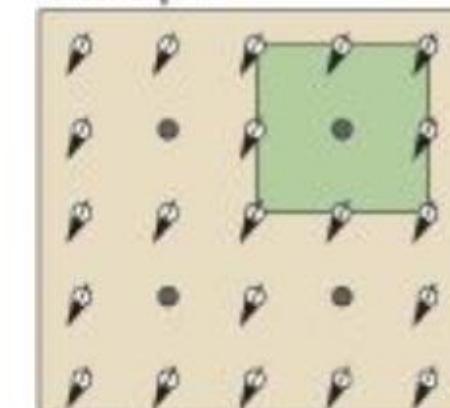
Seven-spot



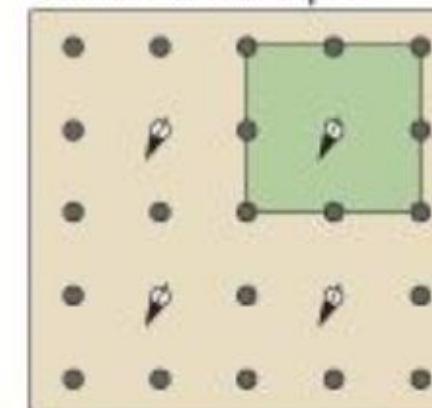
Inverted seven-spot



Nine-spot



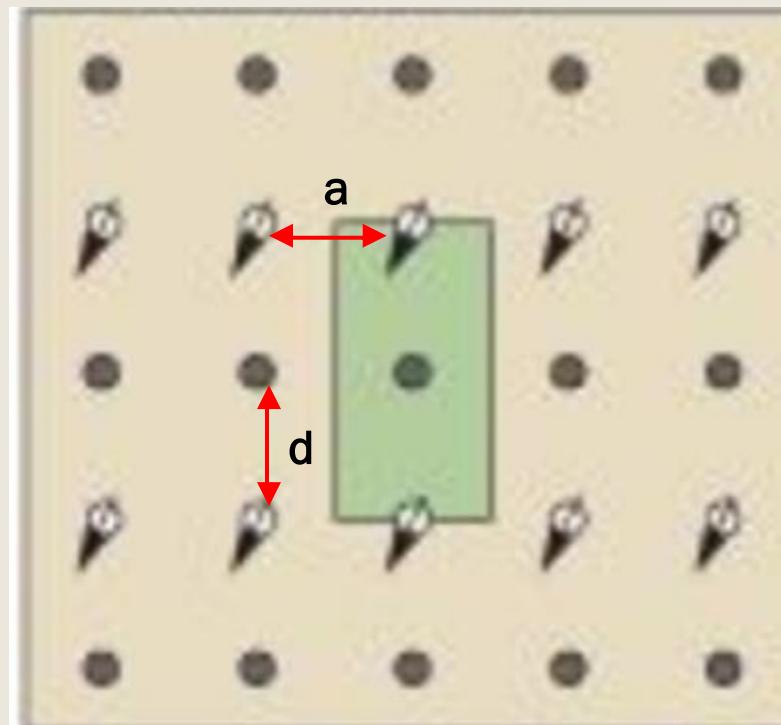
Inverted nine-spot

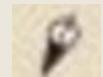


Empuje en línea recta directa (direct line drive)

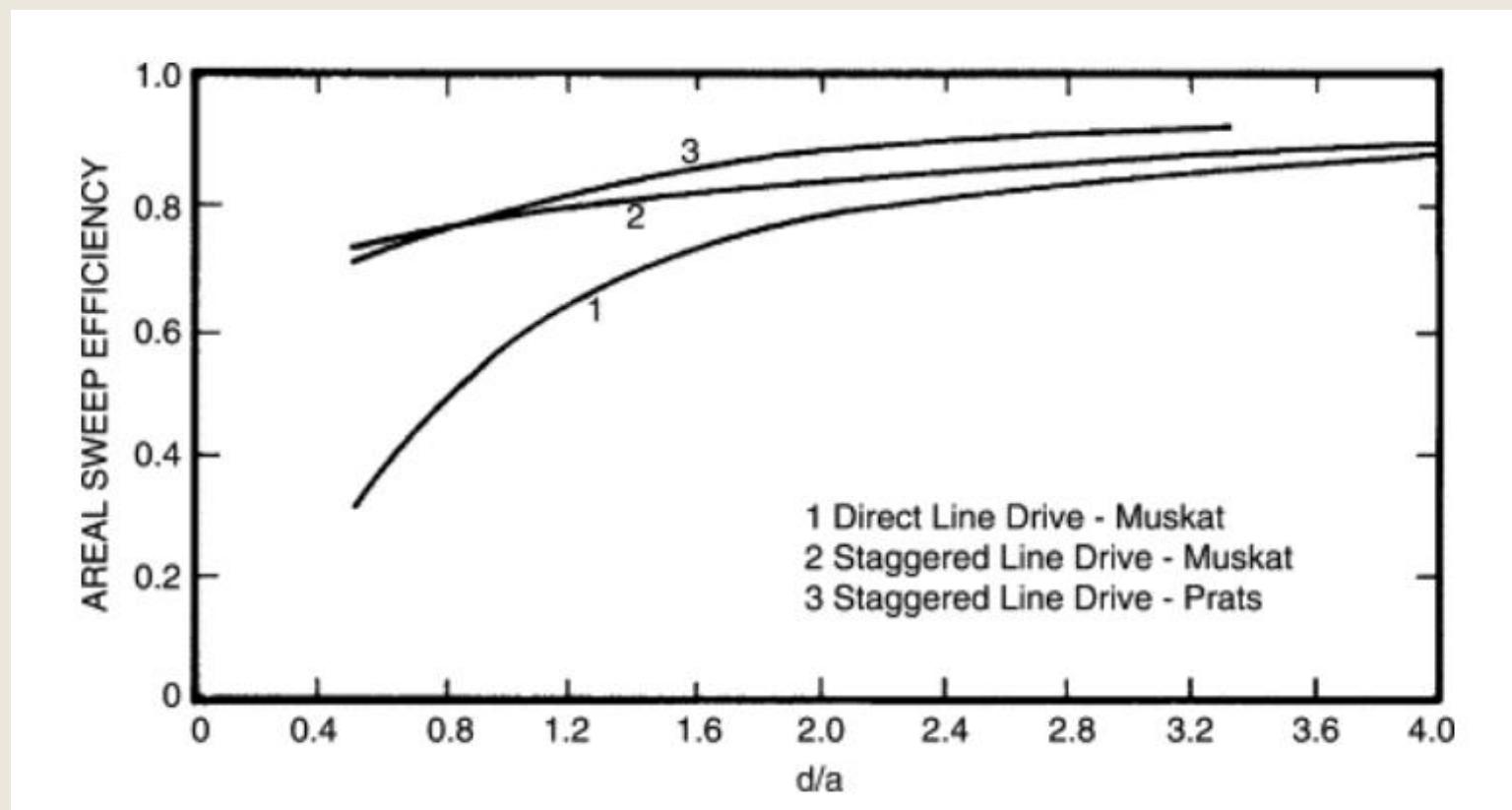
$$I/P = (2 \times 1/2) / 1 = 1$$

La razón I/P se calcula dividiendo el número de pozos inyectores que afectan a cada pozo productor entre el número de pozos productores que reciben el efecto de un inyector



-  Pozos inyectores
-  Pozos productores

Empuje en línea recta directa (direct line drive)



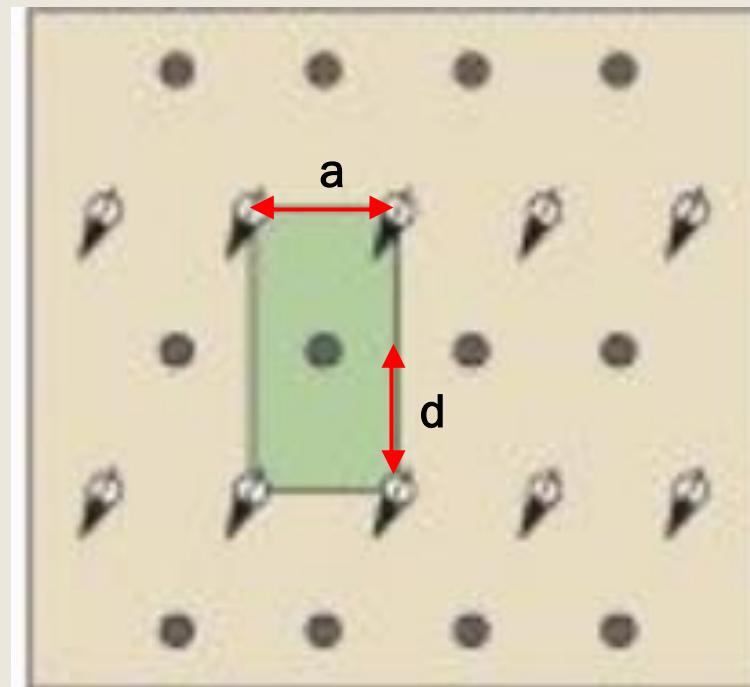
M=1

A mayor d/a $E_A \uparrow$

Empuje en línea desplazada (staggered line drive)

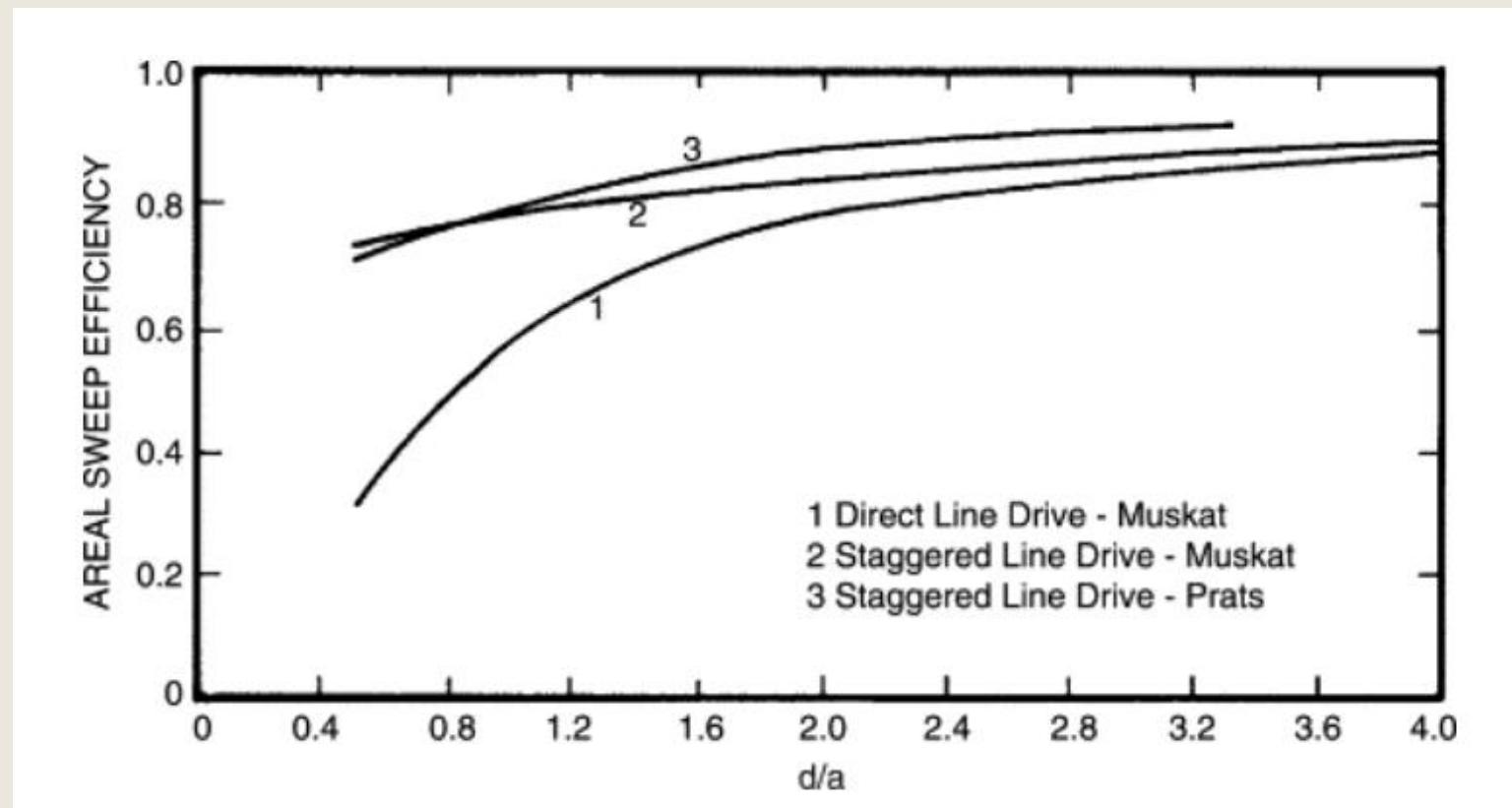
los productores están desplazados a la mitad de la distancia entre pozos

$$I/P = (4 \times 1/4) / 1 = 1$$



-  Pozos inyectores
-  Pozos productores

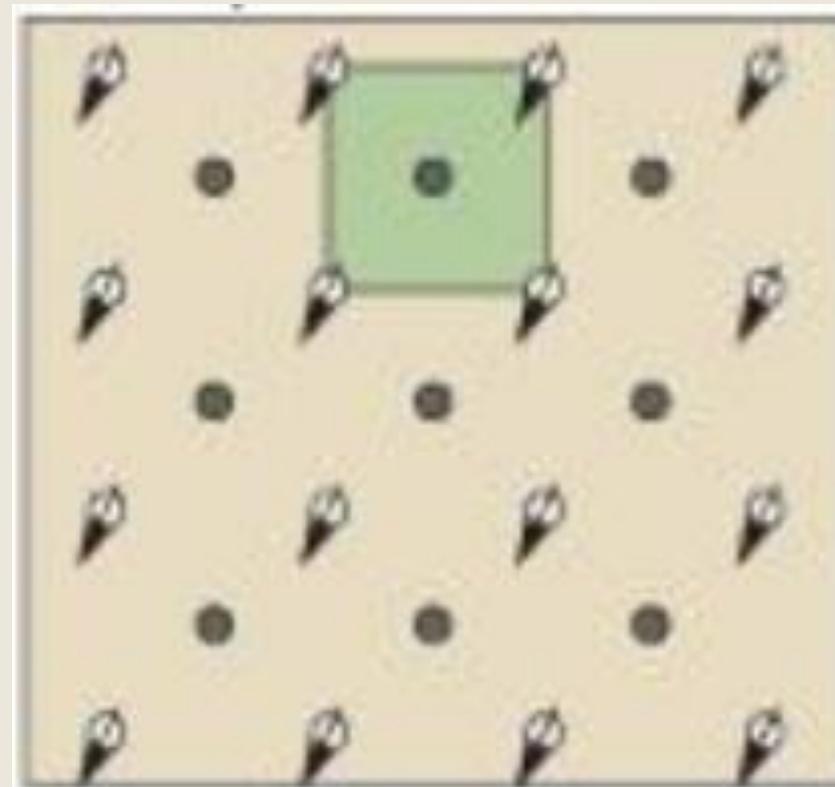
Empuje en línea desplazada



M=1

A menor d/a E_A línea desplazada > E_A línea directa

Five spot directo



I/P=1

M=1, E_A=70%

 Pozos inyectores

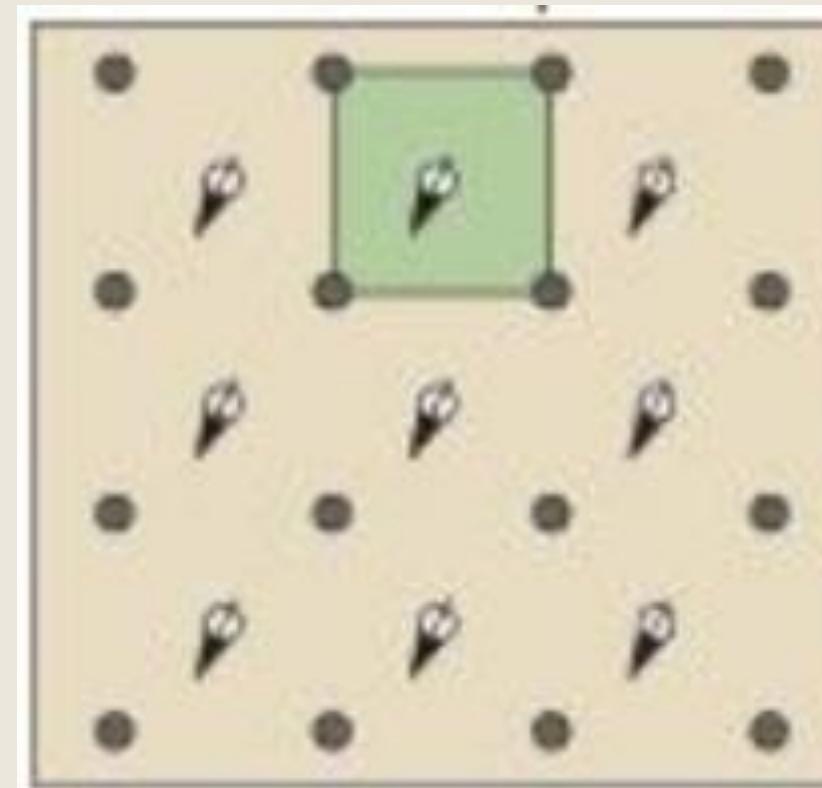
 Pozos productores

Más común en NQN

Five spot

- Caso especial del mallado desplazado donde la relación $d/a=0.5$.
- Es el mallado de barrido más utilizado.
- La ubicación de los pozos es regular y los mismos forman un cuadrado, con una relación inyectores/productores igual a 1.
- Presenta una muy buena eficiencia de barrido y simultáneamente al haberse realizado la perforación en forma regular, puede cambiarse el pattern simplemente cambiando la posición de inyectores y productores

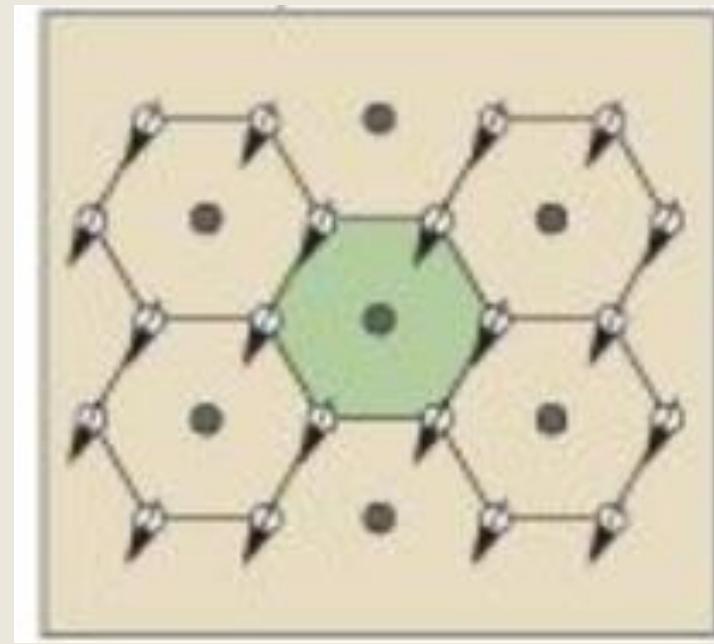
Five spot inverso



I/P=1

- Pozos inyectores
- Pozos productores

Seven spot directo



$$d/a=0,866$$

- Pozos inyectores
- Pozos productores

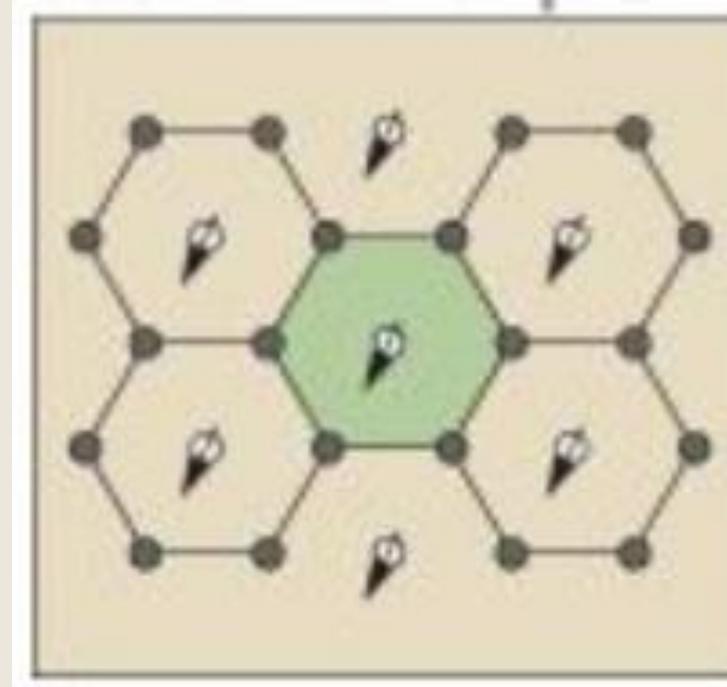
$$I/P = (6 \times 1/3) / 1 = 2$$

Más común en CGSJ

Seven spot

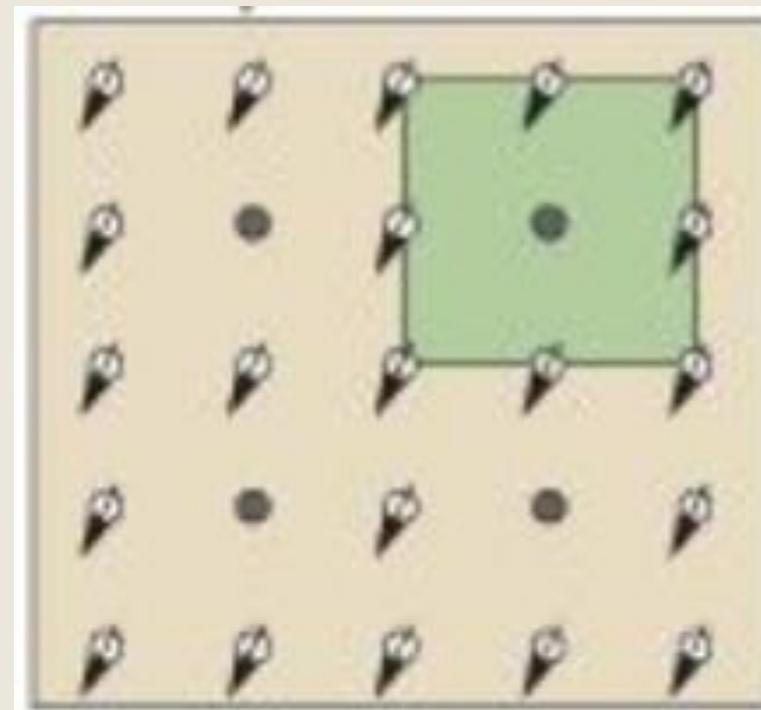
- Este sistema tiene dos inyectores por cada productor, siendo su principal uso en reservorios de baja inyectividad, sin embargo, se trata de un mallado poco utilizado.
- El desarrollo del pattern está basado en un triángulo equilátero o en un sistema de barrido lineal donde la relación $d/a=0.866$. Si el yacimiento no fue desarrollado previendo este pattern se requiere la perforación de muchos pozos infill para que este pattern sea factible.
- El pattern seven spot invertido también se lo conoce como *four spot* donde se presenta una relación inyectores a productores igual a 0.5.

Seven spot inverso



$$I/P=3/6=0.5$$

Nine spot directo



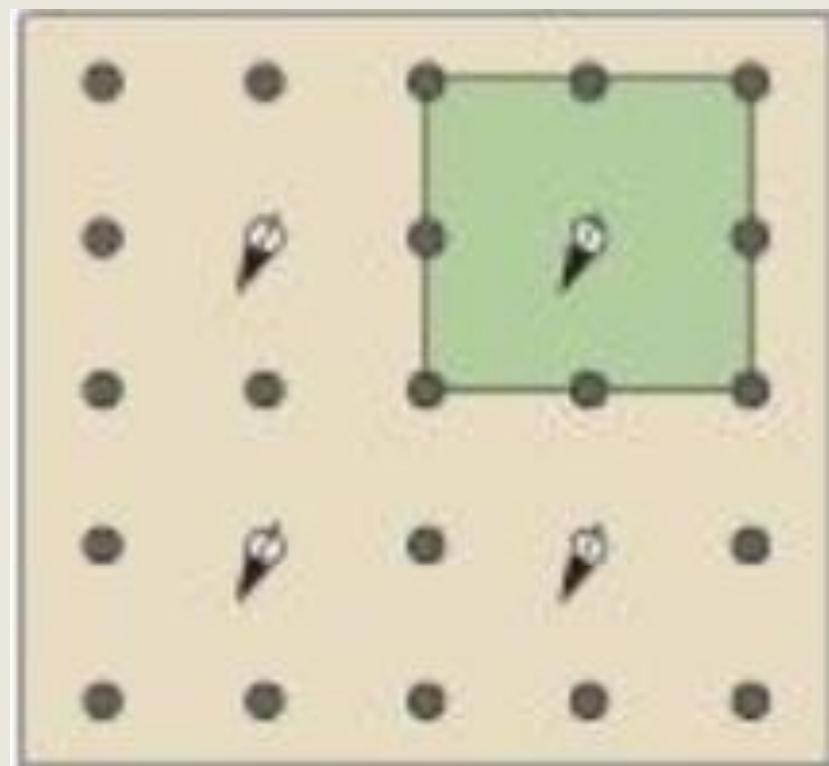
- Pozos inyectores
- Pozos productores

$$I/P = (4 \times 1/4 + 4 \times 1/2) / 1 = 3$$

Nine spot

- Este mallado desarrollado se tiene perforando los pozos en un cuadrado, la relación inyectores/productores es igual a 3 y es muy útil cuando se necesita una gran capacidad de inyección como consecuencia de problemas como baja permeabilidad.
- El **nine spot invertido** probablemente se utilice más dado que la relación inyectores/productores precisamente se ha invertido, siendo útil en reservorios donde la inyectividad es elevada.
- Una de las mayores ventajas de este mallado es su flexibilidad.
- El mallado nine spot invertido puede convertirse en una relación de inyector a productor igual a uno, tanto como five spot o barrido en línea recta con sólo realizar las conversiones adecuadas.

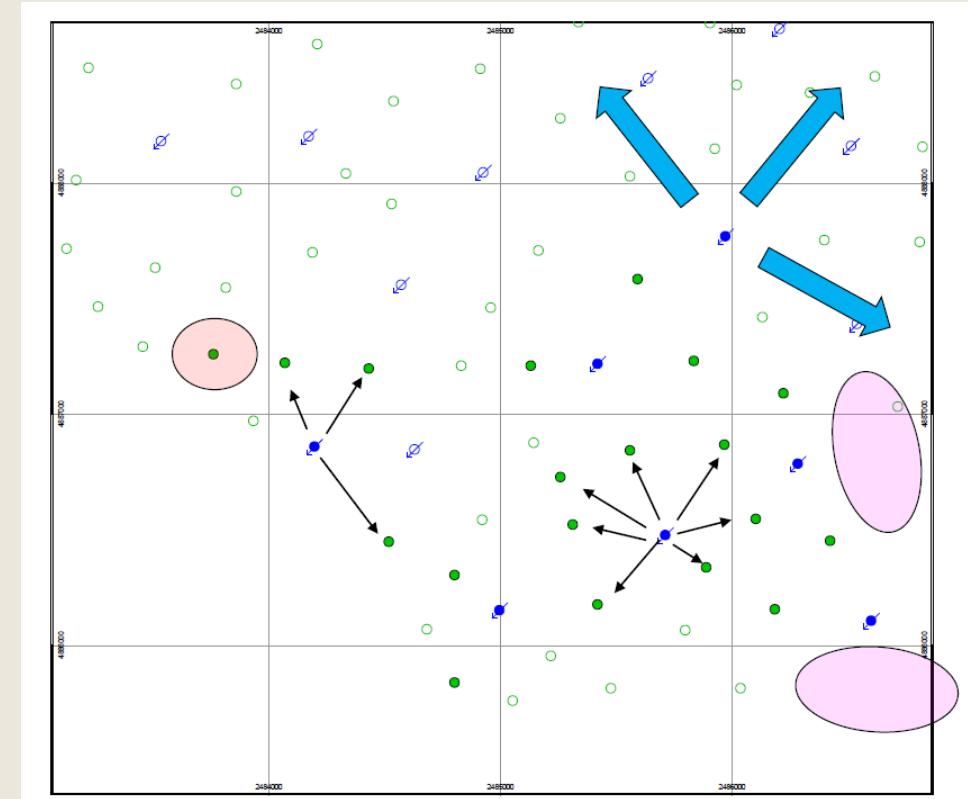
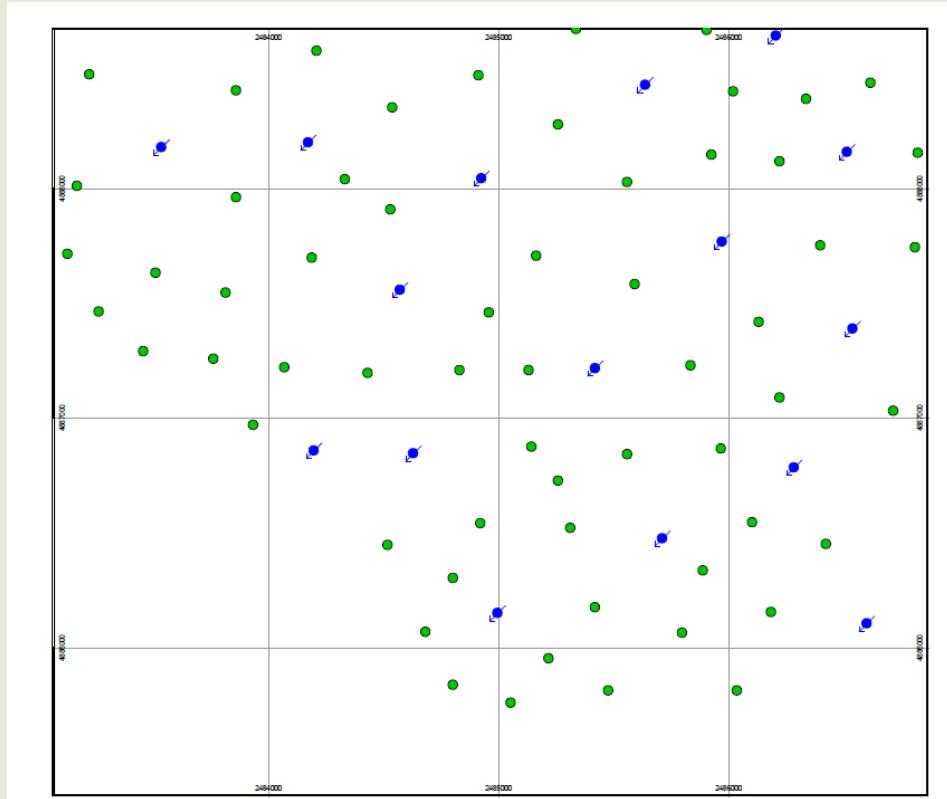
Nine spot inverso



- Pozos inyectores
- Pozos productores

$$I/P = 2/6 = 1/3$$

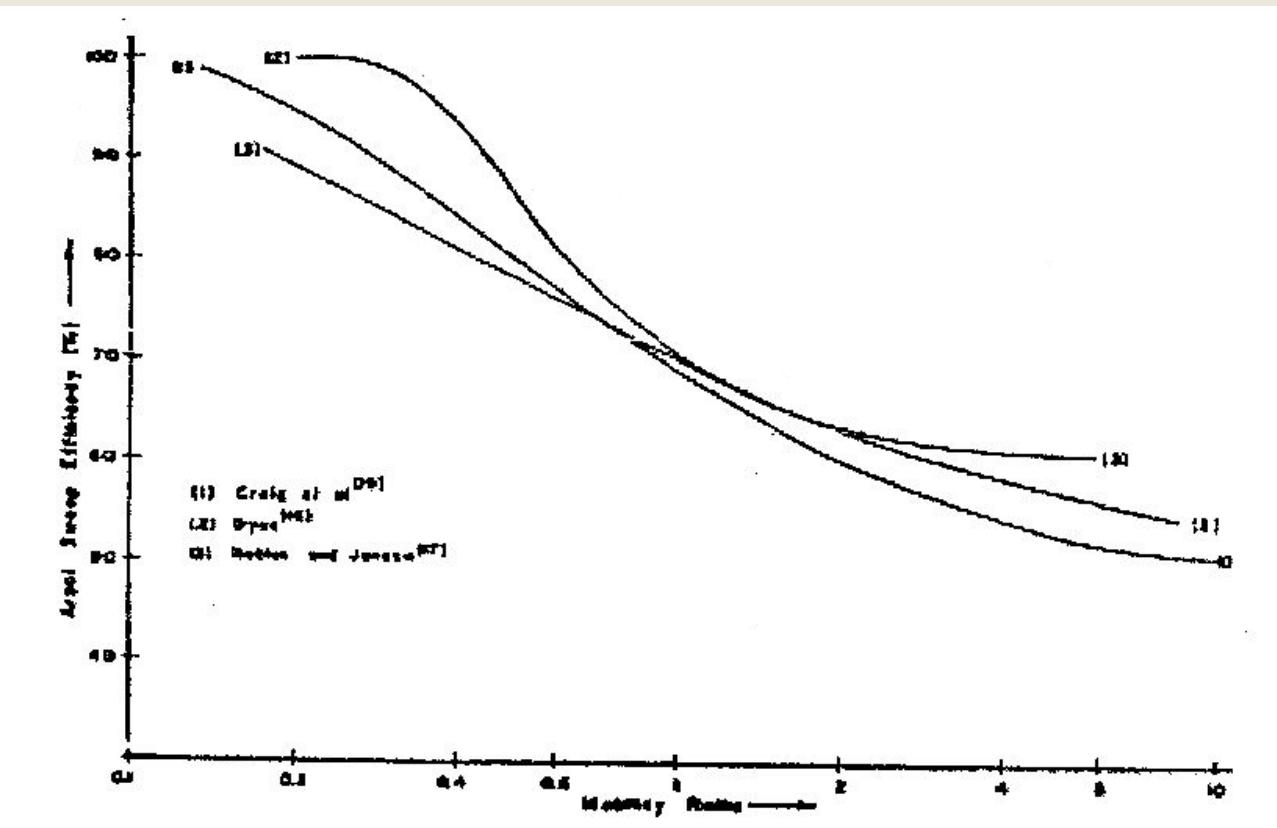
Esquemas de inyección: la realidad



Resumen I/P

Tipos de arreglos	Relación entre pozos inyectores y productores	Patrón requerido
Cuatro Pozos	1/2	Triángulo equilátero
Cinco Pozos	1	Cuadrado
Siete Pozos	2	Cuadrado
Invertido siete pozos	½	Triángulo equilátero
Nueve pozos	3	Cuadrado
Invertido de nueve pozos	1/3	Cuadrado
Empuje línea directa	1	Rectángulo
Empuje de línea desplazada	1	Modificación de arreglo de línea directa desplazando los pozos inyectores a lo largo de su línea

E_A vs M



Eficiencia areal al BT en función de la movilidad para un pattern five spot

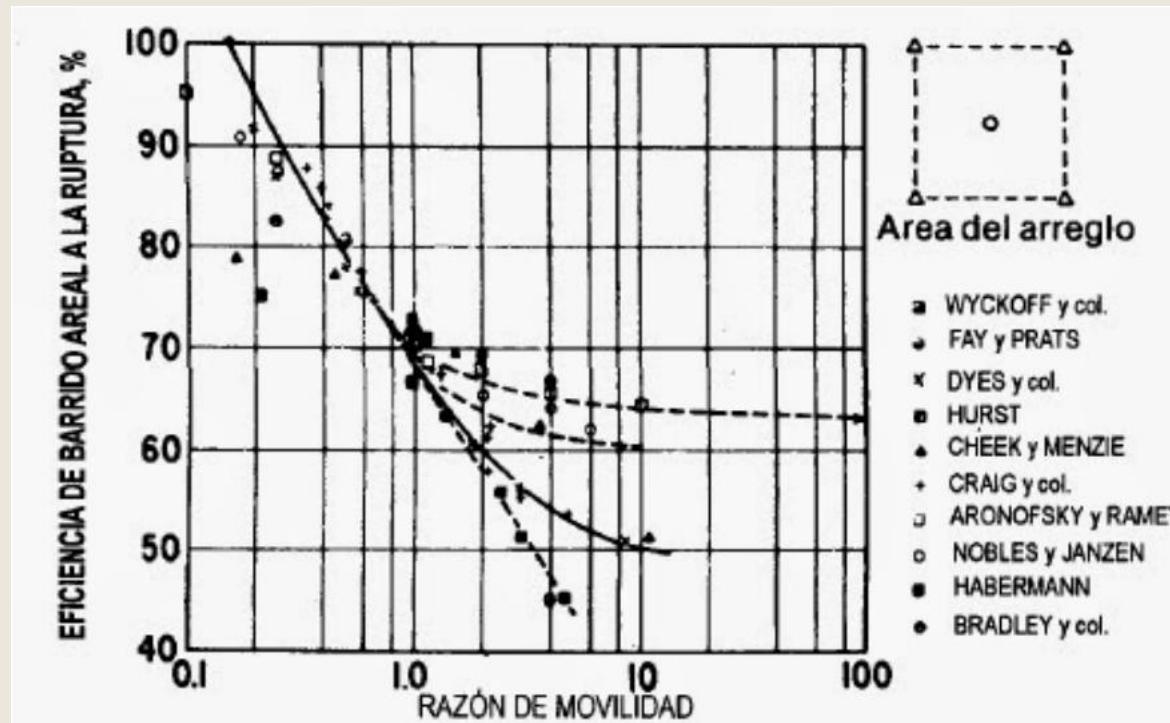
- 5 Spot
- Espesor constante
- Formación homogénea
- Con infinitas repeticiones del arreglo para evitar distorsiones de las líneas de flujo

E_A a la rotura según el mallado

En forma general se presentan cuatro tipos de mallados :

- **Mallados aislados:** no hay otros pozos, no se aprecian límites. E_A puede superar el 100%.
- **Mallados desarrollados:** todo el yacimiento ha sido desarrollado con el mismo mallado. Es lo más común.
- **Mallados normales:** cuando la malla tiene un productor.
- **Mallados invertidos:** cuando la malla tiene un solo inyector.

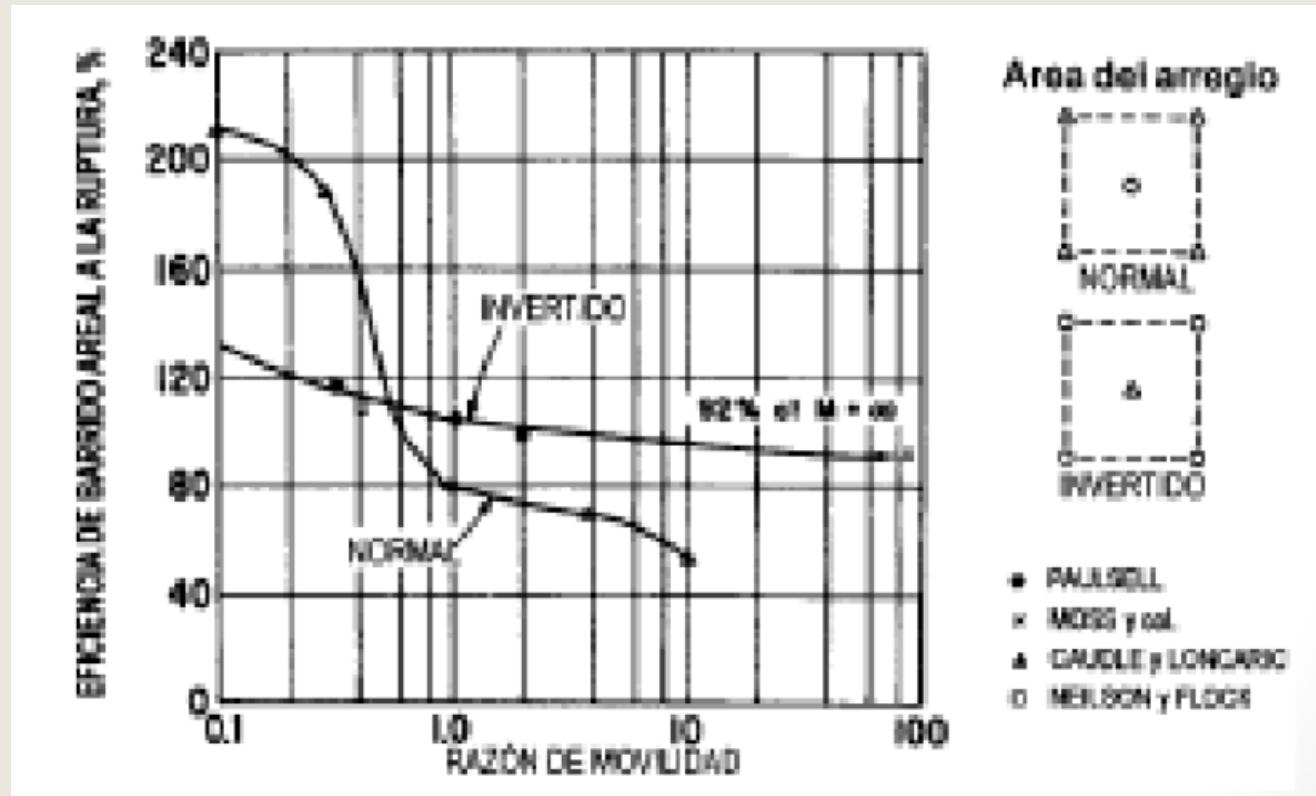
E_A a la rotura según el mallado: Mallado desarrollado



Eficiencia de barrido para un arreglo desarrollado
(tomado de Craig)

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

E_A a la rotura según el mallado: Mallado aislado



Aislado: uno normal y otro invertido Se ve que la EA puede superar el 100%

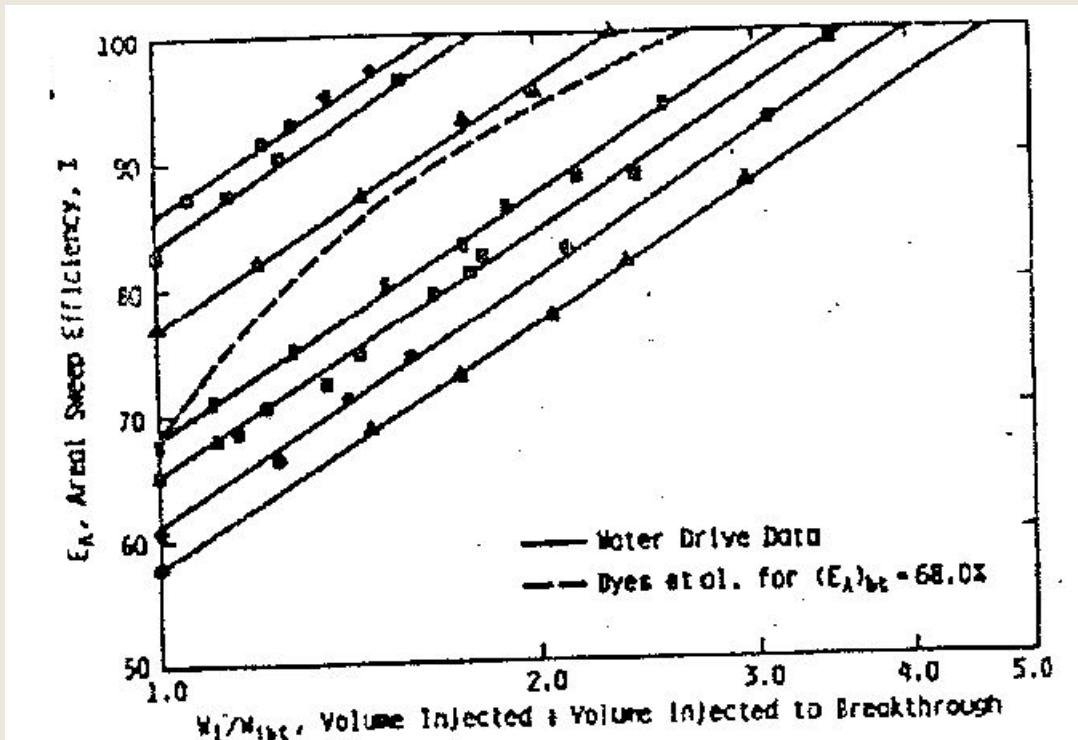
Eficiencia de barrido para un arreglo five spot normal e Invertido aislado (tomado de Craig)

E_A luego de BT

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 económico 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.

E_A luego de BT



$$E_A = EA_{BT} + 0.633 \log \frac{W_i}{W_{iBT}}$$

$$E_A = EA_{BT} + 0.274 \ln \frac{W_i}{W_{iBT}}$$

E_A es la fracción del área que ha sido barrida cuando la saturación de agua es Swemed.

Experimentalmente Craig , Geffen y Morse encontraron para un arreglo five Spot, que E_A aumenta linealmente luego de la rotura con el logaritmo de: W_i / W_{iBT} (volumen inyectado/volumen inyectado al BT)

E_A

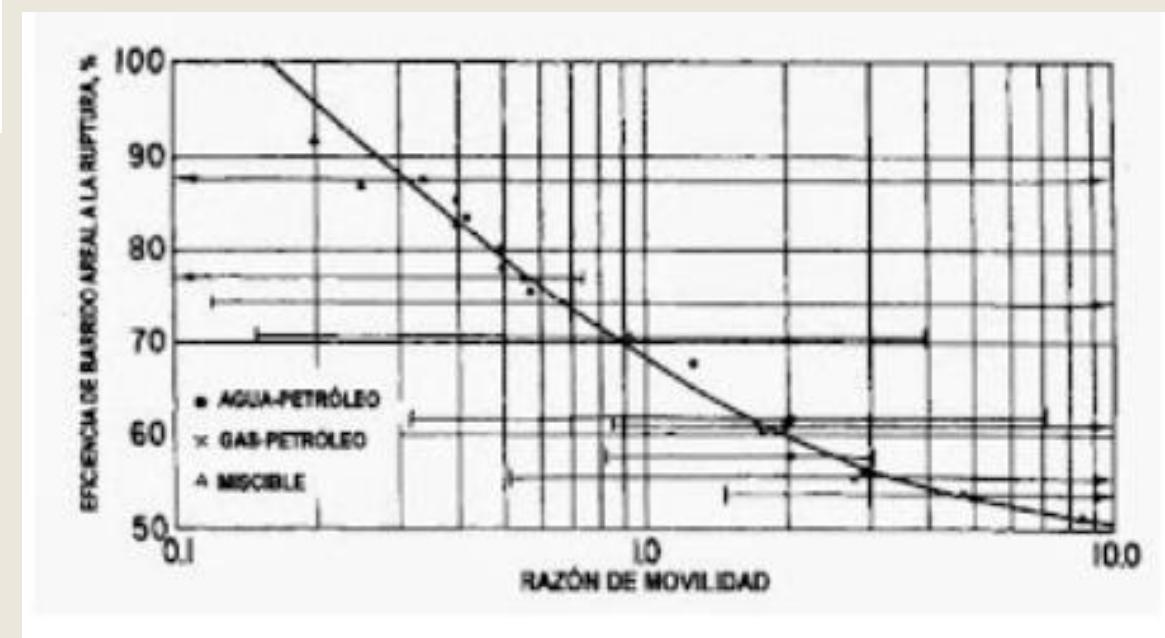
$$E_{ABT} = 0.54602036 + \frac{0.03170817}{M_{\bar{s}}} + \frac{0.30222997}{e^{\frac{M_{\bar{s}}}{s}}}.$$

Siendo M_s la relación de movilidades cuando la k_w se calcula para S_{wemed} detrás del frente.

Ecuación Válida para:

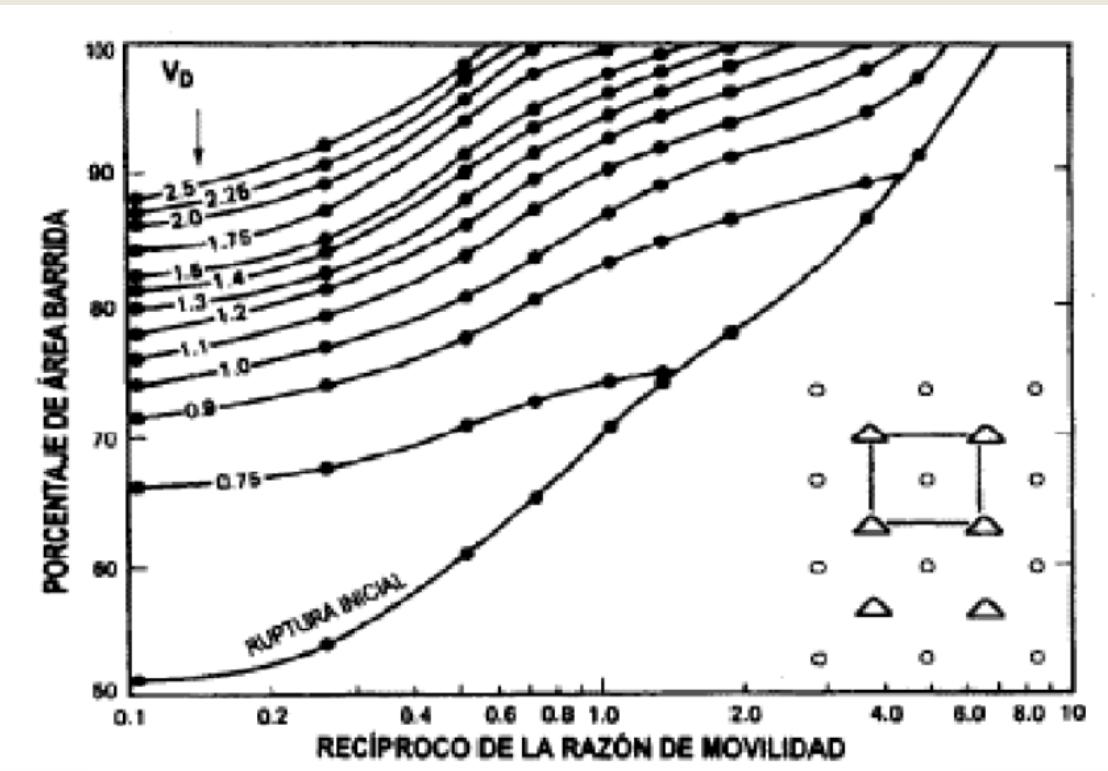
$$0.16 \leq M_{\bar{s}} \leq 10$$

Craig experimentó inyecciones de agua e inyecciones de gas, a un 5 Spot, donde descubrió que definiendo M cuando k_w se toma a S_{wemed} , M_s , los datos de E_{ABT} y M coincidían con los de otros investigadores con fluidos miscibles.



Eficiencia de barrido areal en el momento de la ruptura para un arreglo de 5 pozos.

Correlación alterna E_A



Se muestra una correlación alterna de la eficiencia de barrido areal en función de la relación de movilidades para un pattern desarrollado y que se aplica luego de alcanzarse el BT.

Efecto de la relación de movilidad sobre los volúmenes desplazados para un arreglo 5 spot (de Craig)

Correlaciones

Para el desarrollo de estas correlaciones se define dos factores obtenidos experimentalmente

- El volumen desplazable, VD

$$V_D = \frac{W_i}{V_{Pmalla} (\Delta S_o)_{\max}} = \frac{W_i}{V_{Pmalla} (1 - S_{wir} - S_{or})}$$

VP es el volumen poral de la malla

$(\Delta S_o)_{\max}$ es la saturación de petróleo máxima que puede desplazarse

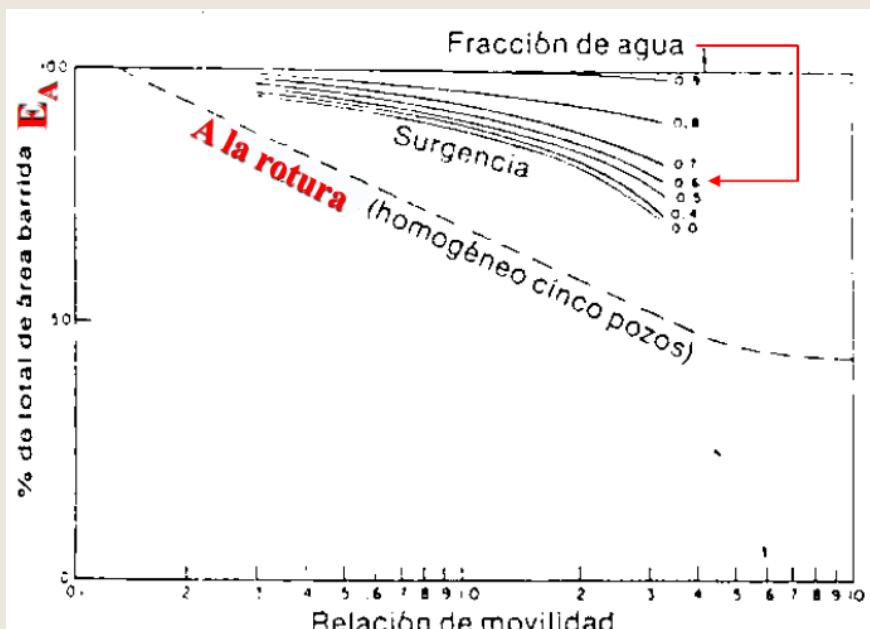
- Fracción de flujo de la región barrida, ΨS , que se define como la fracción del flujo total que proviene de la región barrida (esto será igual al fw si se asume que sólo el agua fluye de la zona barrida).

Otros factores que alteran E_A

- Fracturas
- Permeabilidad direccional
- Variaciones de permeabilidad areal
- Ángulo de buzamiento
- Mallados aislados
- Mallados irregulares
- Saturación inicial de gas

Otros factores que alteran E_A

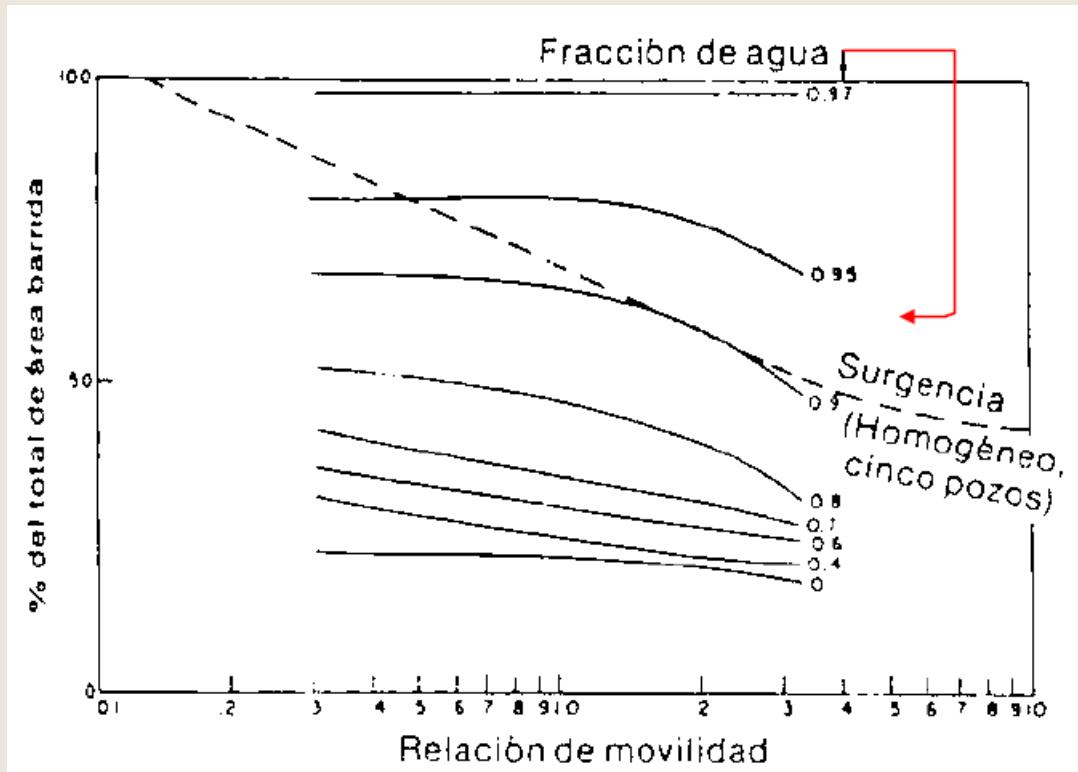
- **Fracturas:** ubicar fracturas en dirección perpendicular a la línea entre inyector y productor. Si el inyector está fracturado se recomienda que xf/L sea menor que 0.15 donde xf es la longitud media de la fractura y L es la distancia inyector-productor.
- **Permeabilidad direccional:** Los inyectores y los productores deben colocarse en una línea perpendicular a la dirección de máxima permeabilidad.



Eficiencia de barrido para un arreglo de 5 pozos con permeabilidad horizontal anisotrópica. El arreglo más favorable sigue siendo la dirección de máxima k paralela a las líneas que pasan a través de los inyectores (de Craig)

Estudio de Hutchinson

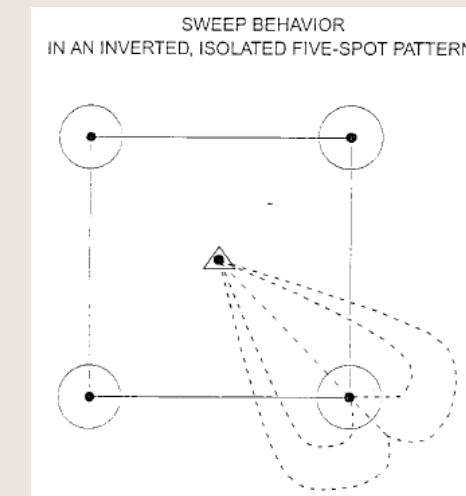
Otros factores que alteran E_A



Eficiencia de barrido para un arreglo de 5 pozos con permeabilidad horizontal anisotrópica. El arreglo menos favorable sigue siendo la dirección de máxima k paralela a las líneas que va del pozo productor al inyector (de Craig)

Otros factores que alteran E_A

- **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.
- **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.
- **Mallados Irregulares:** la recuperación es menor que en los regulares. Aparece el BT prematuramente en los pozos más cercanos al inyector.
- **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 EA puede ser mayor al 100%



Otros factores que alteran E_A

■ Saturación inicial de gas

La mayoría de los estudios de laboratorio fueron conducidos en modelos con saturación de 100% de líquidos. Sin embargo, en muchos reservorios, cuando comienza la secundaria existe una saturación de gas.

Cuando el agua se inyecta en reservorios con una saturación inicial de gas, los estudios de Craig *et al.* mostraron que el agua inyectada se moverá radialmente hasta que:

- el banco de petróleo contacte a otro banco de petróleo formado por un inyector adyacente
- el banco de petróleo alcance un productor

En estas condiciones, la eficiencia de barrido areal al BT con gas inicial es igual a la del sistema con 100% de líquido. En otras palabras, el comportamiento del sistema en el BT como posteriormente a él, es similar para ambos yacimientos, con o sin gas presente.

El petróleo total producido, sin embargo, en un sistema con gas inicial será menor a aquel saturado sólo con líquido en una cantidad igual a la del volumen ocupado inicialmente por el gas.

Selección del mallado

En su análisis debe entrar en consideración distintos aspectos, tales como:

- la distribución de los pozos que tiene
- la geología del reservorio
- los objetivos de inyección y producción
- la necesidad de perforar la menor cantidad de pozos infill posibles

- Muchos de los arreglos de pozos existentes pueden permitir varios tipos de mallados, así por ejemplo, un yacimiento desarrollado en forma de cuadrado puede ser barrido con sistemas tipo five spot, nine spot invertido o normal, en línea, periférico o four spot desplazado. La selección del mallado, en estas situaciones está determinado primeramente por la geología.

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_{gi} 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

- La capacidad de inyección del reservorio también es importante, cada uno de los posibles patterns ofrecen diferentes relaciones de pozos productores a inyectores (1:1 en five spot, 2:1 en four spot desplazado, 3:1 para un nine spot invertido o 1:3 para el nine spot normal).
- Así si se necesita presurizar el yacimiento, y el mismo tiene alta capacidad de inyección, el nine spot normal aparece como un buen candidato. Sin embargo, no debe olvidarse que la geología y las razones económicas pueden cambiar la selección natural.

Selección del mallado

Siguiendo a Craig un correcto mallado debe satisfacer los siguientes criterios :

- 1) Dar el máximo caudal posible de petróleo
- 2) Dar la capacidad de inyección necesaria para satisfacer el caudal de petróleo
- 3) Maximizar la recuperación de petróleo con el mínimo corte de agua
- 4) Ser compatible con los pozos ya perforados, requiriendo un mínimo de nuevos pozos a perforar
- 5) Eventualmente ser compatible con las operaciones de secundaria de otros operadores cuando el yacimiento tiene continuidad.

Conclusiones

- El diseño y operación de un proyecto de secundaria requiere la mayor eficiencia de barrido areal, y esto sólo se puede alcanzar cuando la relación de movilidades es baja y el mallado seleccionado puede sacar ventajas de las heterogeneidades del reservorio.
- Comparar las distintas correlaciones, y realizar simulaciones numéricas permiten mejorar la selección y predicción del comportamiento del yacimiento, pero la base de todo esto se encuentra en una correcta caracterización del reservorio, de ahí que no se deben ahorrar esfuerzos en alcanzarla.

FIN

Eres agente de cambio

