



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 19 de junio 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

La suscrita:

Ruthsandy Barón Morelo CC.1020824181,

Autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Caracterización de flujo trilineal en yacimientos de lutitas fractales” presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero/a de Petróleos;

Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

RUTHSANDY BARÓN MORELO

Firma:



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Caracterización de flujo trilineal en yacimientos de lutitas fractales.

AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Baron Morelo	Ruthsandy

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Escobar Macualo	Freddy Humberto

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Muñoz Quijano	Ingrid Natalia
Martinez P.	Javier Andres

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de Petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Petróleos

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 119

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general Grabados ___
Láminas ___ Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas
X Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno



MATERIAL ANEXO: NO

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): NO

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Fractal	Fractal
2. Trilinear	Trilineal
3. Shale	Lutita
4. Anomalous Diffusion	Difusión Anomala
5. Multilinear Flow	Flujo multilíneal

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este trabajo presenta el análisis de pruebas de presión en yacimientos no convencionales a partir del modelo trilineal de difusión anómala, el cual se basa en la geometría fractal y en la difusión anómala para poder simular la heterogeneidad de flujo en el yacimiento con el fin de poder obtener una predicción de flujo más aproximado al real.

Con base a este modelo se generan familias curvas en las cuales aplicando la metodología TDS se crean nuevas ecuaciones que permitan determinar parámetros del yacimiento tales como: Permeabilidad del yacimiento interno, permeabilidad de la fractura hidráulica, conductividad de la fractura y dimensiones del yacimiento, así mismo mediante la entrada del parámetro alpha se identifican cuatro casos que muestran la variación del flujo dependiendo de la conexión entre sus elementos, por último basándose en datos obtenidos de la literatura, se simulan pruebas de presión con el fin de verificar el funcionamiento de las ecuaciones desarrolladas y que se encuentren dentro del rango de tolerancia de error.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This paper presents the analysis of pressure tests in unconventional reservoirs from the trilinear model of anomalous diffusion based on fractal geometry and anomalous diffusion in order to simulate the heterogeneity of flow in the reservoir in order to be able to obtain a flow prediction approximate to the real. Based on this model, we generate curves and applying the TDS methodology, creating new equations to determine reservoir parameters such as internal reservoir permeability, hydraulic fracture permeability, fracture conductivity, and reservoir dimensions. Same through the input of the parameter alpha define four cases, which show the variation of the flow depending on the connection between its elements, finally based on data obtained from the literature, pressure tests was simulated in order to verify the right operation of the equations and that are within the error tolerance range.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Freddy Humberto Escobar Macualo

Firma:

Nombre Jurado: Ingrid Natalia Quijano.

Firma:

Nombre Jurado: Javier Martinez P.

Firma:

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PRUEBAS DE POZOS**



**CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO TRILINEAL EN
YACIMIENTOS DE LUTITAS FRACTALES**

PRESENTADO POR:

RUTHSANDY BARÓN MORELO

Neiva, Huila Junio de 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Gregory Morelo López y Ricardo Antonio Barón Lenes, gracias por creer en mí, por su apoyo y amor incondicional, su guía, consejos y la fortaleza que me han dado es lo que me ha permitido llegar hasta aquí y ser la persona que soy hoy en día, nunca será suficiente para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi familia, por estar a mi lado en cada uno de mis pasos, por sus consejos y enseñanzas y a cada uno de mis amigos que me han acompañado a lo largo de este proceso, gracias por su compañía y amistad.

Quiero agradecerle a mi director de tesis Freddy Humberto Escobar Macualo por darme la oportunidad de realizar este proyecto guiándome durante todo el proceso bajo su enseñanza y por último a cada uno de mis profesores que aportaron a mi formación como profesional y persona.

Quiero agradecerle principalmente a Dios por darme fortaleza y sabiduría para la realización de este proyecto y por permitirme cumplir una más de mis metas.

Ruthsandy Barón Morelo

Tabla de Contenidos

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
Introducción	10
Objetivo.....	12
Capítulo 1 Marco teórico	13
1.1. Descripción modelo de flujo trilineal	13
1.2. Modelo trilineal de difusión anómala	13
1.2.1. Geometría Fractal.....	14
1.2.2. Difusión anómala en medios porosos	15
1.3. Modelo matemático	15
Capítulo 2 Estudio del comportamiento de la derivada adimensional en yacimientos no convencionales mediante el método de difusión anómala.....	18
2.1. Metodología de obtención de las curvas e identificación de sensibilidades	18
2.2. Flujos característicos.....	20
2.2.1. Caso 1 ($\alpha = 0.1-0.2$)	20
2.2.2. Caso 2 ($\alpha = 0.3-0.4$) y Caso 3 ($\alpha = 0.4-0.9$).....	21
2.2.3. Caso 4 ($\alpha = 1$).....	23
2.3. Ecuaciones de flujo en yacimientos de aceite.....	24
2.3.1. Análisis Flujo lineal.	24
2.3.2. Análisis Flujo Bilineal	29
2.3.3. Análisis Flujo Multilineal 1 ($m=0.3$)	34
2.3.4. Análisis Flujo Multilineal 2 ($m=0.6$)	38
2.3.5. Análisis Flujo Multilineal 3 ($m=0.8$)	44
2.3.6. Análisis Flujo Pseudoestable	49
2.4. Ecuaciones de flujo en yacimientos de gas.....	52
2.4.1. Análisis Flujo lineal	52
2.4.2. Análisis Flujo Bilineal	55
2.4.3. Análisis Flujo Multilineal 1 ($m=0.3$)	58
2.4.4. Análisis Flujo Multilineal 2 ($m=0.6$)	60
2.4.5. Análisis Flujo Multilineal 3 ($m=0.8$)	64
2.4.6. Análisis Flujo Pseudoestable	66
2.5. Puntos de intersección.....	68
2.5.1. Intersección flujo lineal-pseudoestable.....	68
2.5.2. Intersección flujo multilineal 1($m=0.3$)-multilineal 2($m=0.6$)	69
2.5.3. Intersección multilineal 1($m=0.3$) y multilineal 3 ($m=0.8$)	70
2.5.4. Intersección flujo multilineal 2 ($m=0.6$) y flujo pseudoestable	71
2.5.5. Intersección flujo multilineal 3 ($m=0.8$) y flujo pseudoestable	72
2.5.6. Intersección flujo bilineal y flujo lineal	73
Capítulo 3.....	74
Aplicación y verificación de las ecuaciones de caracterización del flujo trilineal	74
3.1. Ejercicios de Aplicación para yacimientos de aceite.....	74
3.1.1. Prueba 1 ($\alpha=0.6$)	74
3.1.2. Prueba 2 ($\alpha=0.9$)	81
3.1.3. Prueba 3 ($\alpha=1$)	87

3.2. Ejercicios de Aplicación para yacimientos de Gas	93
3.2.1. Prueba 4 ($\alpha=0.2$)	93
CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	101
APÉNDICE A: Solución analítica del modelo trilineal de difusión anómala	101
APÉNDICE B: Data de pruebas de presión utilizadas en las pruebas de verificación.	105
1.Data de presión para yacimiento de aceite (Prueba 1)	105
2.Data de presión para yacimiento de aceite (Prueba 2)	107
3.Data de presión para yacimiento de aceite (Prueba 3)	111
4.Data de presión para yacimiento de gas (Prueba 4)	116

Lista de tablas

Tabla 1.Datos de entrada para prueba 1	74
Tabla 2.Puntos característicos prueba 1	76
Tabla 3.Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 1	77
Tabla 4.Verificación porcentajes de error Prueba 2.....	80
Tabla 5.Datos de entrada para prueba 2.....	81
Tabla 6.Puntos característicos prueba 2.....	83
Tabla 7.Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 2	83
Tabla 8.Verificación porcentajes de error Prueba 2.....	86
Tabla 9.Datos de entrada para prueba 3.....	87
Tabla 10.Puntos característicos prueba 3.....	89
Tabla 11.Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 3	89
Tabla 12.Verificación porcentajes de error Prueba 3.....	92
Tabla 13.Datos de entrada para prueba 4.....	93
Tabla 14.Puntos característicos prueba 4.....	95
Tabla 15.Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 4	95
Tabla 16.Verificación porcentajes de error Prueba 4.....	97

Lista de figuras

Figura 1. Esquema yacimiento flujo trilineal.....	13
Figura 2. Esquema geometría Euclidiana	14
Figura 3. Esquema geometría fractal	14
Figura 4. Datos de entrada programa modelo trilineal	18
Figura 5. Comportamiento de la derivada adimensional de presión con variación de Alpha.	19
Figura 6. Comportamiento de la derivada adimensional de presión con variación de x_F ..	19
Figura 7. Caso 1	20
Figura 8. Caso 2.	21
Figura 9. Caso 3	22
Figura 10. Caso 4	23
Figura 11. Flujo lineal en fractura.....	24
Figura 12. Análisis flujo lineal en yacimiento de comportamiento trilineal.....	26
Figura 13. Esquema flujo Bilineal	29
Figura 14. Análisis de flujo bilineal en yacimiento de comportamiento Trilineal.	33
Figura 15. Análisis de flujo multilineal 1 ($m=0.3$) en yacimiento de comportamiento trilineal.	36
Figura 16. Análisis de flujo multilineal 2 ($m=0.6$) en yacimiento de comportamiento trilineal.	43
Figura 17. Análisis de flujo multilineal 3 ($m=0.8$) en yacimiento de comportamiento trilineal	47
Figura 18. Análisis de flujo Pseudoestable en yacimiento de comportamiento trilineal. ...	51
Figura 19. Identificación regímenes de flujo Prueba 1.	75
Figura 20. Presión y derivada de presión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 1).....	76
Figura 21. Identificación regímenes de flujo Prueba 2	82
Figura 22. Presión y derivada de presión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 2).....	82
Figura 23. Identificación regímenes de flujo Prueba 3	88
Figura 24. Presión y derivada de presión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 3).....	88
Figura 25. Identificación regímenes de flujo prueba 4	94
Figura 26. Pseudopresión y derivada de pseudopresión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 4).....	94

NOMENCLATURA

A	Área del yacimiento ,ft ²
B_o	Factor de volumen de formación del aceite,rbbl/STB
B_g	Factor de volumen de formación de gas ,ft ³ /SCF
C_D	Coficiente de almacenamiento,rbbl/psi
C_{RD}	Conductividad de fractura hidráulica, adimensional
C_t	Compresibilidad Total, 1/psi
d_F	Distancia entre dos fracturas hidráulicas adyacentes,ft
h	Espesor del yacimiento,ft
h_f	Espesor total de fracturas naturales, ft
h_{ft}	Espesor total fracturas naturales,ft
h_m	Espeso matriz,ft
k	Permeabilidad , md
k_I	Permeabilidad yacimiento interno, md
k_f	Permeabilidad de la fractura natural, md
k_F	Permeabilidad de la fractura hidráulica, md
k_o	Permeabilidad yacimiento externo, md
k_α	Coficiente fenomenológico de difusión anómala, md
k_m	Permeabilidad matriz, md
$m(P)$	Pseudopresión,psi ² /cp
m	Pendiente
n_F	Número de fracturas hidráulicas
n_f	Número de fracturas naturales
P	Presión, psi
P_D	Presión adimensional
q	Rata de flujo,STB/d
$q_{F,sc}$	Rata de flujo por fractura hidráulica, aceite STB/d, gas Mscf/d
r_w	Radio del pozo, ft
S	Parámetro de laplace
s	Daño (skin factor)
t	Tiempo, hr
t_D	Tiempo adimensional
$t_D * P'_D$	Derivada de presión adimensional
$t_D * m(P)'_D$	Derivada de pseudopresión adimensional
$t * \Delta m(P)$	Derivada de pseudopresión
w_F	Ancho de fractura hidráulica, ft
x_e	Tamaño de yacimiento, en dirección x, ft
x_F	Longitud media de fractura hidráulica, ft
y_e	Tamaño de yacimiento, en dirección y, ft

Griego

α	Coefficiente de difusividad
$\alpha_{O,F}$	Parámetro definido en el modelo de flujo trilineal
$\beta_{O,F}$	Parámetro definido en el modelo de flujo trilineal
Δ	Cambio
ϕ	Porosidad, fracción
η	Difusividad, ft ² /hr
λ	Transmisibilidad
μ	Viscosidad, cp
π	Constante pi
ρ	Densidad, lbm/ft ³
ζ	Tipo de medio: I,F,O
ω	Almacenamiento

Sufijos

<i>D</i>	Adimensional
<i>e</i>	Frontera externa
<i>f</i>	Fractura natural
<i>F</i>	Fractura hidráulica
<i>i</i>	Intercepto
<i>I</i>	Yacimiento interno
<i>m</i>	Matriz
<i>O</i>	Yacimiento externo
<i>R</i>	Yacimiento
<i>sc</i>	Condiciones estándar
<i>BL</i>	Bilineal
<i>L</i>	Lineal
<i>pss</i>	Pseudoestable
<i>m1</i>	Multilineal 1
<i>m2</i>	Multilineal 2
<i>m3</i>	Multilineal 3

RESUMEN

Los yacimientos no convencionales han aparecido como alternativa de la industria para aumentar las reservas y poder cumplir con la alta demanda de energía mundial, por lo tanto, es necesario su desarrollo buscando la optimización de costos, tiempos, aumento de vida productiva y el correcto diseño y ejecución de los procesos de fracturación, sin embargo, la complejidad de su estructura complica la predicción de su comportamiento y propiedades petrofísicas haciendo necesario el uso de modelos extensos de caracterización y rugosidad de cálculos o en los cuales se hacen asunciones que toman el yacimiento con un comportamiento y flujo homogéneo con interconectividad entre todos sus elementos.

Este trabajo presenta el análisis de pruebas de presión en yacimientos no convencionales a partir del modelo trilineal de difusión anómala, el cual se basa en la geometría fractal y en la difusión anómala para poder simular la heterogeneidad de flujo en el yacimiento con el fin de poder obtener una predicción de flujo más aproximado al real.

Con base a este modelo se generan familias curvas en las cuales aplicando la metodología TDS se crean nuevas ecuaciones que permitan determinar parámetros del yacimiento tales como: Permeabilidad del yacimiento interno, permeabilidad de la fractura hidráulica, conductividad de la fractura y dimensiones del yacimiento, así mismo mediante la entrada del parámetro α se identifican cuatro casos que muestran la variación del flujo dependiendo de la conexión entre sus elementos, por último basándose en datos obtenidos de la literatura, se simulan pruebas de presión con el fin de verificar el funcionamiento de las ecuaciones desarrolladas y que se encuentren dentro del rango de tolerancia de error.

ABSTRACT

Unconventional reservoirs have appeared as an alternative of the industry to increase the reserves and to be able to meet the high global energy demand, therefore, its development is necessary looking for the optimization of costs, times, increase of productive life and the correct design and execution of the fracturing processes, however, the complexity of its structure complicates the prediction of its behavior and petrophysical properties, making necessary the use of extensive models of characterization and roughness of calculations or in which assumptions are made that take the reservoir with a behavior and homogeneous flow with interconnectivity among all its elements.

This paper presents the analysis of pressure tests in unconventional reservoirs from the trilinear model of anomalous diffusion based on fractal geometry and anomalous diffusion in order to simulate the heterogeneity of flow in the reservoir in order to be able to obtain a flow prediction approximate to the real. Based on this model, we generate curves and applying the TDS methodology, creating new equations to determine reservoir parameters such as internal reservoir permeability, hydraulic fracture permeability, fracture conductivity, and reservoir dimensions. Same through the input of the parameter alpha define four cases, which show the variation of the flow depending on the connection between its elements, finally based on data obtained from the literature, pressure tests was simulated in order to verify the right operation of the equations and that are within the error tolerance range.

Introducción

En la actualidad los avances tecnológicos y sociales de este siglo han aumentado la demanda de hidrocarburos, lo que ha llevado a que la industria tenga como prioridad la explotación de yacimientos no convencionales como alternativa viable para incrementar las reservas y la producción de hidrocarburos ; Las propiedades petrofísicas de estos yacimientos hacen necesario la fracturación hidráulica (que usualmente inducen a fracturas naturales) para estimular la producción de fluidos, dando como resultado un sistema complejo tanto en su configuración como en la predicción de su comportamiento.

El flujo trilineal fue desarrollado por Brown et al.(2009) como un modelo analítico que describe el comportamiento de un sistema complejo formado por un pozo horizontal hidráulicamente fracturado conectado a un reservorio interno con fracturas naturales y un reservorio externo en un yacimiento no convencional de lutitas. Este modelo toma como punto de referencia trabajos anteriormente desarrollados por otros investigadores cuya base fue la introducción de la transformada de Laplace por Van Everdigen y Hurst(1949)para la solución de modelos que se fundamentan en la Ecuación de difusividad en medios porosos. Brown et al.(2009) utiliza los modelos de transiente de dual porosidad (Kazemi et al.,1969) y Pseudoestable de dual porosidad (Warren and Root, 1963) para darle solución a la transformada de Laplace en yacimientos naturalmente fracturados lo que permite el modelamiento del yacimiento interno, de esta misma manera, basado en el modelo desarrollado por Raghavan, Chen, Agarwal (1997) ,se da la solución para un transigente de presión para múltiples pozos horizontales fracturados, logrando modelar el comportamiento de las fracturas hidráulicas. Raghavan and Chen (2016) proporciona un modelo de difusión anómalo el cual está relacionado con la naturaleza fractal de la red de fracturas en donde se presentan ciertos coeficientes para el medio poroso heterogéneo. Dos enfoques comunes para modelar los yacimientos naturalmente fracturados son usados, el DFN (*Discrete fracture network*) (Araujo et al,2004) y el de dual porosidad. En el DFN es posible considerar los detalles de cada fractura, la distribución y la conectividad de la red, el modelo requiere estudios extensos de caracterización y por la rugosidad de cálculos llevan a que los modelos computacionales sean ineficientes, por lo tanto, los detalles que pueden usar estos modelos son limitados por las capacidades de los modelos de flujo, lo que lleva a que estos métodos nos sean elegibles para las aplicaciones rutinarias de la ingeniería.

Los modelos de dual porosidad son basados en asunciones continuas y promedio de las propiedades de las fracturas, donde, el material contenido en la porosidad primaria es homogéneo e isotrópico y es contenido en un arreglo idéntico de paralelepípedos rectangulares, y el flujo puede ocurrir entre los elementos de porosidad primaria y secundaria, pero no entre los elementos de porosidad primaria (Warren & Root, 1963). El modelo es apropiado para sistemas homogéneos donde hay patrones repetidos de fracturas continuas que permiten determinar un flujo predominante, sin embargo, si se considera las variaciones en las fracturas, conectividad y conductividad de las fracturas es solo una aproximación de primer grado, al comportamiento de las redes en los pozos horizontales.

Esta investigación, utiliza el modelo *TDS* con el fin de generar curvas tipo que nos permitan obtener ecuaciones para caracterizar el flujo, se introducen los conceptos de difusión anómala y geometría fractal, para hacer menos extensos los cálculos y poder simular la heterogeneidad de velocidad de flujo en el yacimiento y de esta forma poder obtener un comportamiento más aproximado al real.

Objetivo

Objetivo General:

Desarrollar ecuaciones analíticas directas mediante la extensión de la técnica *TDS*, aplicables a pruebas de presión, que permitan caracterizar yacimientos no convencionales de lutitas que observen un modelo fractal de flujo trilineal.

Objetivos Específicos:

- Identificar las variables que modifican el comportamiento de la derivada de presión y localizar los flujos que se presentan.
- Estudiar el comportamiento del conjunto de curvas de derivada de presión adimensional contra tiempo adimensional generadas por el simulador analítico desarrollado, con el fin de plantear ecuaciones que representen el comportamiento de flujo en un medio fractal.
- Verificar la validez de las ecuaciones formuladas mediante su aplicación en ejemplos sintéticos.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Descripción modelo de flujo trilineal

La base del modelo del flujo trilineal es la premisa de que la vida productiva de un pozo horizontal con fracturas múltiples es dominada por regímenes de flujos lineales. El modelo de flujo trilineal agrupa los flujos lineales en tres regiones continuas de flujo: el reservorio exterior (denotado con el subíndice O), el reservorio interior ubicado entre fracturas artificiales (denotado con el subíndice I), y la fractura hidráulica (denotado con el subíndice F); En éste modelo se asume que el yacimiento interno es naturalmente fracturado y que las fracturas hidráulicas son de conductividad finita con una distribución uniforme a través del pozo horizontal. (Brown et al., 2009).

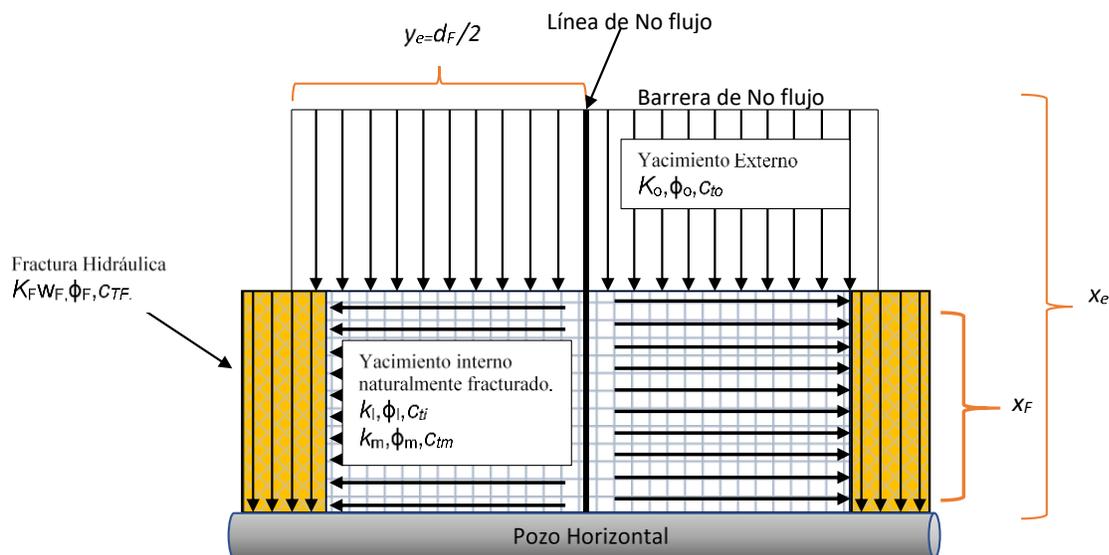


Figura 1. Esquema yacimiento flujo trilineal.

Fuente: Ozkan, E., Brown, M. L., Raghavan, R. S., & Kazemi, H. (2009, January 1). Comparison of Fractured Horizontal-Well Performance in Conventional and Unconventional Reservoirs. Society of Petroleum Engineers.

1.2. Modelo trilineal de difusión anómala

El modelo de difusión anómala (T_{DA}) desarrollado por Ozcan et al. (2014) reemplaza el modelo de doble porosidad (T_{DP}) con un modelo en el cual se considera un medio poroso con geometría fractal y difusión anómala, esto con el fin de obtener un comportamiento que tenga un mayor ajuste al comportamiento real de los yacimientos.

1.2.1. Geometría Fractal

La geometría fractal desarrollada por el matemático Mandelbort (1982), se basa en la hipótesis de que un objeto irregular se forma de pequeños fragmentos que se parecen al todo y tienen características similares, muchas propiedades petrofísicas que afectan el flujo en el medio poroso, muestran características de fractales. En varios campos se ha visto el ejemplo de que los procesos de fractura tienden a crear Objetos fractales.

Los yacimientos naturalmente fracturados eran generalmente simulados por el modelo de dos escalas de Warren and Root (1963), en el cual, la red de fracturas es representada por geometría euclidiana (Figura 2), por lo tanto, para representar estas redes de diferentes escalas y con comportamiento no Euclidiano se propuso la geometría fractal como solución. Chang and Yortsos (1990), plantean un sistema fractal en un medio poroso naturalmente fracturado donde los fractales (Fracturas) son ubicados dentro de una geometría euclidiana (Matriz) (Figura 3), en éste se asume que el almacenamiento de flujo ocurre en un volumen local, que cada fractura tiene la misma densidad y se tiene en cuenta el número de fracturas a simular.

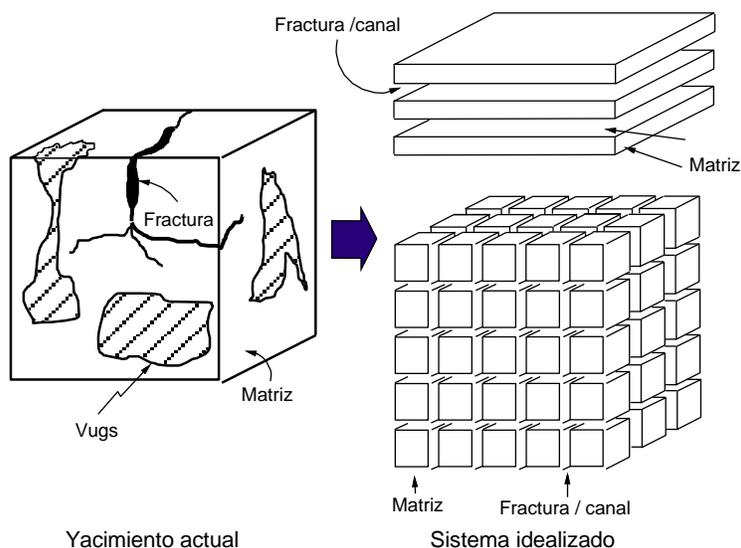


Figura 2. Esquema geometría Euclidiana

Fuente Escobar, M. F. (2009). Análisis moderno de pruebas de presión. Editorial Universidad Surcolombiana.

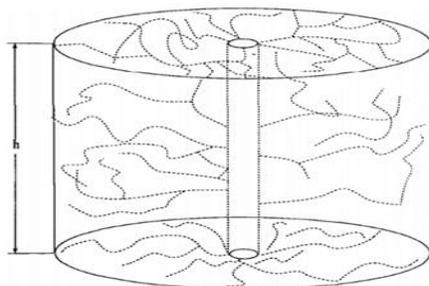


Figura 3. Esquema geometría fractal

Fuente: Chang, J., & Yortsos, Y. C. (1990, March 1). Pressure Transient Analysis of Fractal Reservoirs. Society of Petroleum Engineers

1.2.2. Difusión anómala en medios porosos

A diferencia de los yacimientos convencionales en los que domina el flujo Darcy, en los yacimientos no convencionales de Shale, donde hay bajas permeabilidades y son yacimientos heterogéneos, se ha demostrado que un flujo difusivo es más exacto al momento de representar el comportamiento del flujo en el yacimiento (Kuchuk & Biryukov, 2015 ; Poon, 1998). La difusión es el resultado del movimiento Browniano, el cual es el movimiento aleatorio resultante del choque entre moléculas en un medio líquido, sólido o gaseoso. La relación entre el desplazamiento al cuadrado de la partícula y el tiempo es representada por el coeficiente de difusividad (α), donde una difusión normal se da cuando $\alpha=1$ y a valores menores de uno se da una subdifusión.

Una difusión Normal es asociada usualmente con yacimientos homogéneos con un flujo constante, donde el desplazamiento al cuadrado de la partícula es una función lineal con el tiempo; En yacimientos no convencionales se presentan una subdifusión, donde el coeficiente (α) se relaciona directamente con la heterogeneidad del yacimiento. Entre más pequeño se convierta α , la velocidad del yacimiento se vuelve más heterogénea y el movimiento del fluido es constantemente interrumpido.

1.3. Modelo matemático (Ozcan et al. 2014)

Para simplicidad de cálculos en el modelo trilineal se presentan los términos en forma adimensional. La definición de la caída de presión es dada por las siguiente formula:

$$P_D = \frac{\lambda_l h_l}{141.2qB} \Delta P \quad (1)$$

Donde:

λ_l	Movilidad del fluido, md/cp
h_l	Espesor del yacimiento interno, ft
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, $BOPD$
B_o	Factor volumétrico del crudo, $STB/bbls$
ΔP	Caída de presión, Psi

En caso del gas:

$$m(P_D) = \frac{\lambda_l h_l}{1422.54 q_{FSC} T} \Delta m(P) \quad (2a)$$

$$(t_D * m(P_D')) = \frac{kh}{141.2q\mu B} (t * \Delta m(P')) \quad (2b)$$

Donde q_{Fsc} es el caudal de cada fractura individual que es igual al caudal total de pozo horizontal dividido en el número de fractura hidráulicas:

$$q_{Fsc} = \frac{q_{sc}}{n_f} \quad (3)$$

La derivada de presión adimensional está dada por:

$$(t_D * P_D') = \frac{kh}{141.2q\mu B} (t * \Delta P') \quad (4)$$

El tiempo adimensional es dado por:

$$t_D = 2.637 \times 10^{-4} \frac{\eta_I}{x_F^2} t \quad (5)$$

Donde:

t	Tiempo, <i>hr</i>
x_F	Longitud media de la fractura hidráulica, ft

η_I es la difusividad del reservorio interno definido por:

$$\eta_I = \frac{\lambda_I}{(\phi C_t)_I} \quad (6)$$

$$\lambda_I = \frac{K_I}{\mu} \quad (7)$$

Las ecuaciones 1 y 5 corresponden a la presión y tiempo adimensional del modelo trilineal de dual-porosidad. Para el modelo trilineal de difusión-anómala, η_I y λ_I se refiere a η_α y λ_α , donde $k_I = k_\alpha$, k_α es diferente a la permeabilidad convencional Darcy. También se define la distancia (ξ_D) y el espesor adimensional de la fractura Hidráulica (w_{FD}), respectivamente:

$$\xi_D = \frac{\xi}{x_F} \quad (8)$$

Donde ξ es la distancia en X o Y, el espesor adimensional es definido por:

$$w_{FD} = \frac{w_F}{x_F} \quad (9)$$

w_F es el ancho de la fractura hidráulica.

Las conductividades adimensionales del reservorio y la fractura son definidas por:

$$C_{FD} = \frac{k_F w_F}{k_I x_F} \quad (10)$$

$$C_{RD} = \frac{k_I x_F}{k_O Y_E} \quad (11)$$

Donde:

k	Permeabilidad, <i>md</i>
$k_F w_F$	Conductividad de la fractura hidráulica, <i>md-ft</i>
Y_E	Tamaño del yacimiento en dirección <i>y</i> , <i>ft</i>

Los radios de difusividad de la fractura hidráulica y el reservorio externo están dados por:

$$\eta_{FD} = \frac{\eta_F}{\eta_I} \quad (12)$$

$$\eta_{OD} = \frac{\eta_O}{\eta_I} \quad (13)$$

Donde η se refiere a la difusividad en cada uno de los reservorios (Ecuación 6).

Se introduce el termino de densidad de las fracturas naturales:

$$\rho_f = \frac{n_f}{h} \quad (14)$$

La solución detallada de la difusión - anómala para el reservorio interno del modelo trilineal desarrollada por Brown et al.(2009), es presentada en el apéndice A.

Capítulo 2

Estudio del comportamiento de la derivada adimensional en yacimientos no convencionales mediante el método de difusión anómala

Mediante un programa desarrollado en el grupo de investigación GIPP, se simuló el comportamiento de un yacimiento no convencional mediante el método de T_{DA} (modelo de difusión anómala trilineal) con el fin de analizar el comportamiento de la derivada adimensional de presión en función del tiempo.

2.1. Metodología de obtención de las curvas e identificación de sensibilidades

Para generar las curvas de derivada adimensional se usó el programa desarrollado por el semillero de GIPP, éste programa usa el modelo de T_{DA} (Trilineal de difusión – anómala) desarrollado por Ozcan et al.(2014), para simular el comportamiento del yacimiento.

Parameter	Value
Omega	0.01
LamdaF	0.0001
(tD)ini	0.0000001
tD(max)	1E7
Ndata	300
Filename	misDatos
Steph	6
Xe, ft	275
Ye, ft	90.3
xf, ft	100
wf, ft	0.01
CD	0
phiF	0.38
phil	0.5
phiD	0.04
kF, md	1E+4
kl, md	0.13
kD, md	1E-6
ctF	1E-4
cti	4E-4
ctD	3E-4
etaF	3469736.842
EtaI	8.57
etaD	0.00109875
h, ft	300
rw, ft	0.25
dF, ft	180.6
qFo, sc	150
T, R	600
Mu	0.02
Mui	0.02
Bo	1.43
rhof	0.67
hf	0.0052
nf	201
hft	1.0452
X	0.13
Alpha	0.1
qFg, sc	100
EtaAlfa	8.57

Figura 4. Datos de entrada programa modelo trilineal

Una vez ingresados los datos iniciales, se modificaron variables con el fin de identificar aquellas que cambiarían el comportamiento de la derivada. Con este ejercicio se llegó a la conclusión que la variable más influyente en el comportamiento del yacimiento es α (Figura 5), seguido de la longitud media de la fractura (x_f) (Figura 6), Tamaño del yacimiento en dirección Y (y_e), Permeabilidad del yacimiento interno (k_i) y permeabilidad de la fractura (k_f).

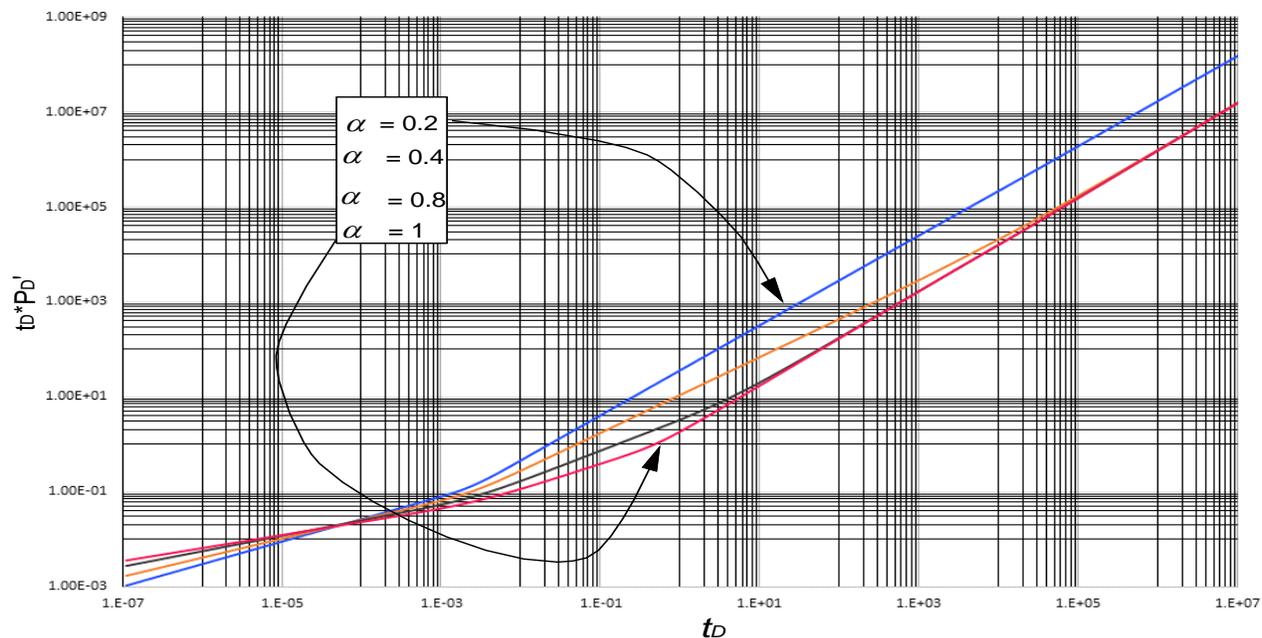


Figura 5. Comportamiento de la derivada adimensional de presión con variación de Alpha.

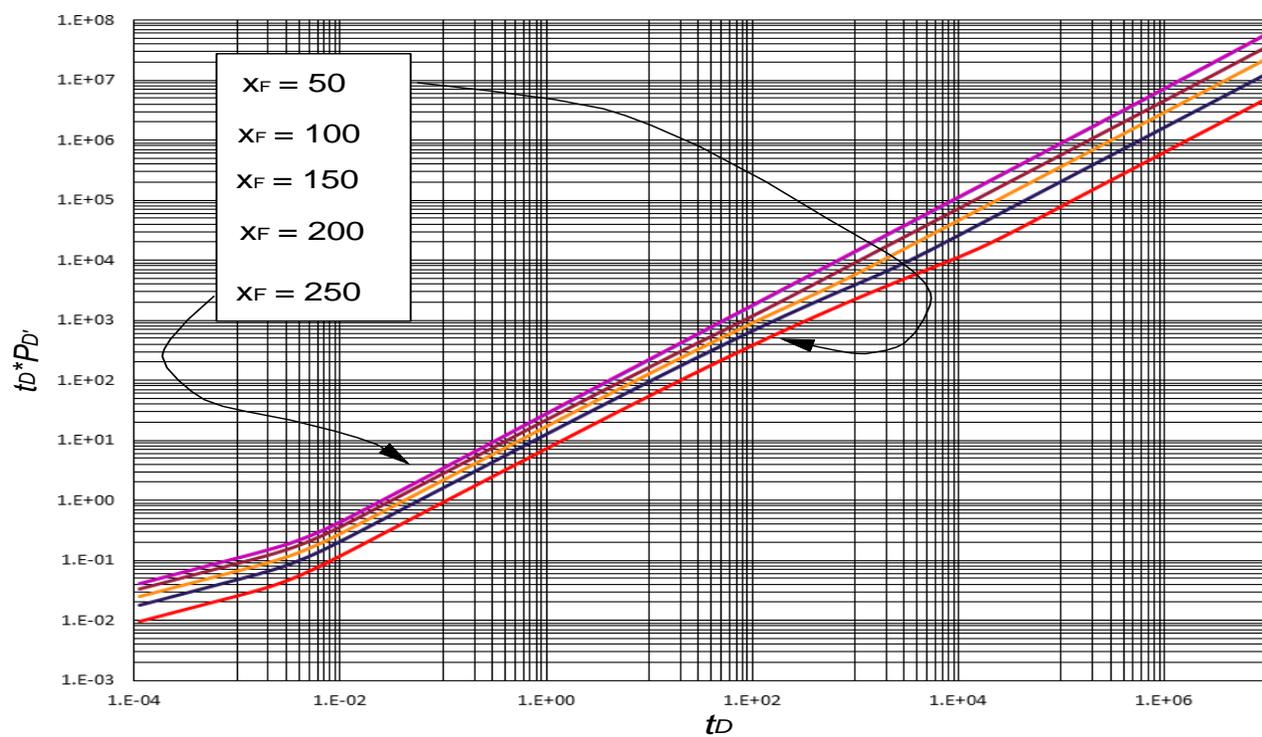


Figura 6. Comportamiento de la derivada adimensional de presión con variación de x_F

2.2. Flujos característicos

En el análisis del comportamiento de la derivada de presión e identificación de sensibilidades, se observó que la variable dominante en la variación de flujo en el yacimiento es α , lo que causa una reacción de la derivada de presión modificando su comportamiento, y mostrando cuatro casos principales:

2.2.1. Caso 1 ($\alpha = 0.1-0.2$)

Se observa un flujo lineal de pendiente 0.5, que representa el flujo en la fractura, seguido de un flujo pseudoestable que identifica el tiempo en el cual la matriz ya no aporta flujo a las fracturas naturales (Figura8).

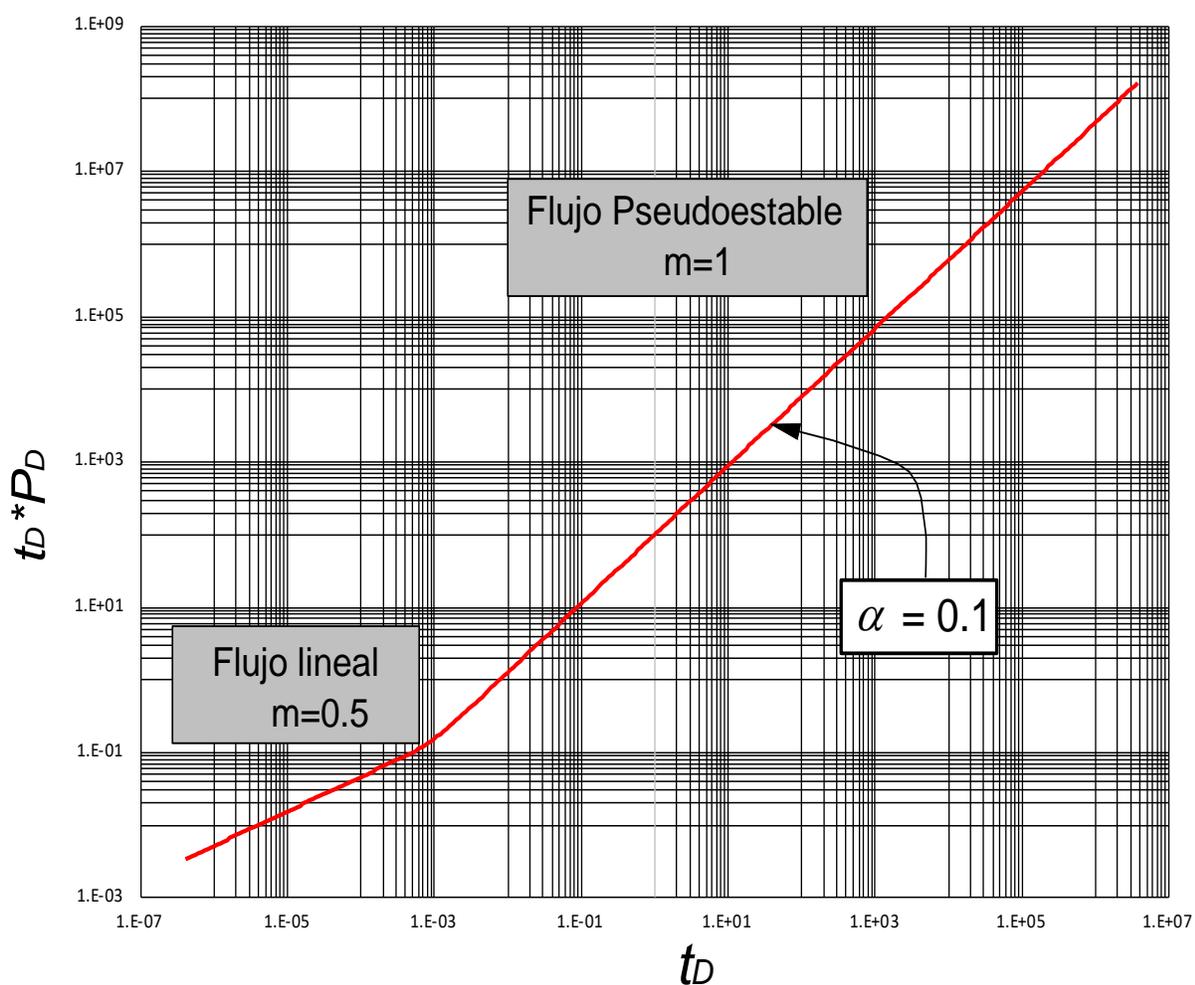


Figura 7.Caso 1

El comportamiento que presenta se debe a la baja difusión de la matriz, lo que indica largas interrupciones del flujo en las fracturas causada por los elementos que la componen, una matriz muy compacta y pérdida de conexión entre fracturas. La respuesta del reservorio es débil por la configuración de la matriz, por lo tanto, la respuesta a tiempos tempranos de la derivada es dominada por el flujo de la fractura.

2.2.2. Caso 2 ($\alpha= 0.3-0.4$) y Caso 3 ($\alpha= 0.5-0.9$)

En el segundo caso se observa un flujo multilíneo de pendiente 0.3, seguido de un segundo flujo multilíneo de pendiente 0.8 y por último un flujo pseudoestable de pendiente unitaria. ($\alpha= 0.3-0.4$) (Figura 8).

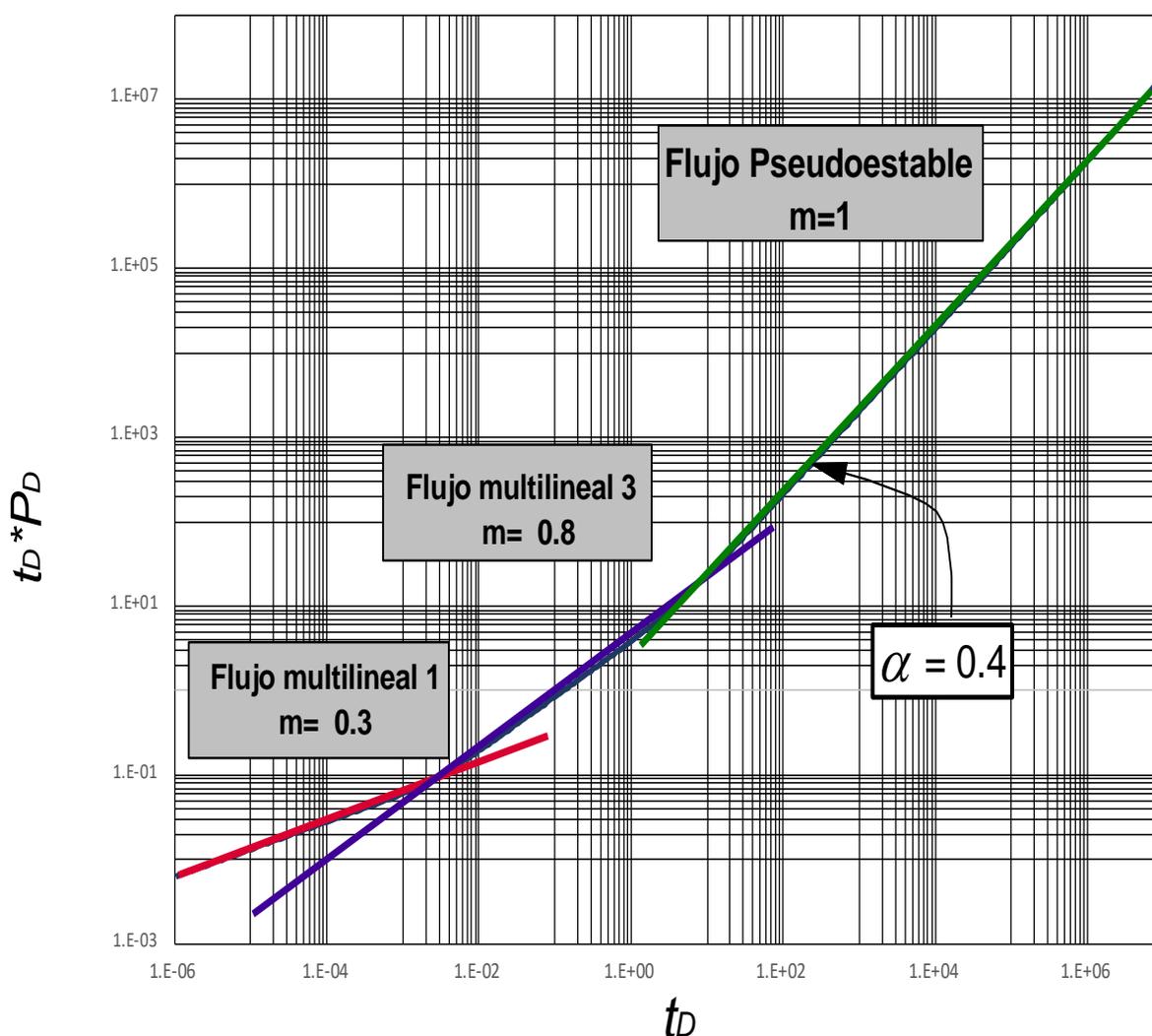


Figura 8. Caso 2.

En el tercer caso se presenta a tiempos tempranos un flujo multilíneal de pendiente 0.3, seguido por un segundo flujo multilíneal de pendiente 0.6 y a tiempos tardíos un flujo pseudoestable de pendiente unitaria. ($\alpha=0.5 - 0.9$) (Figura 9).

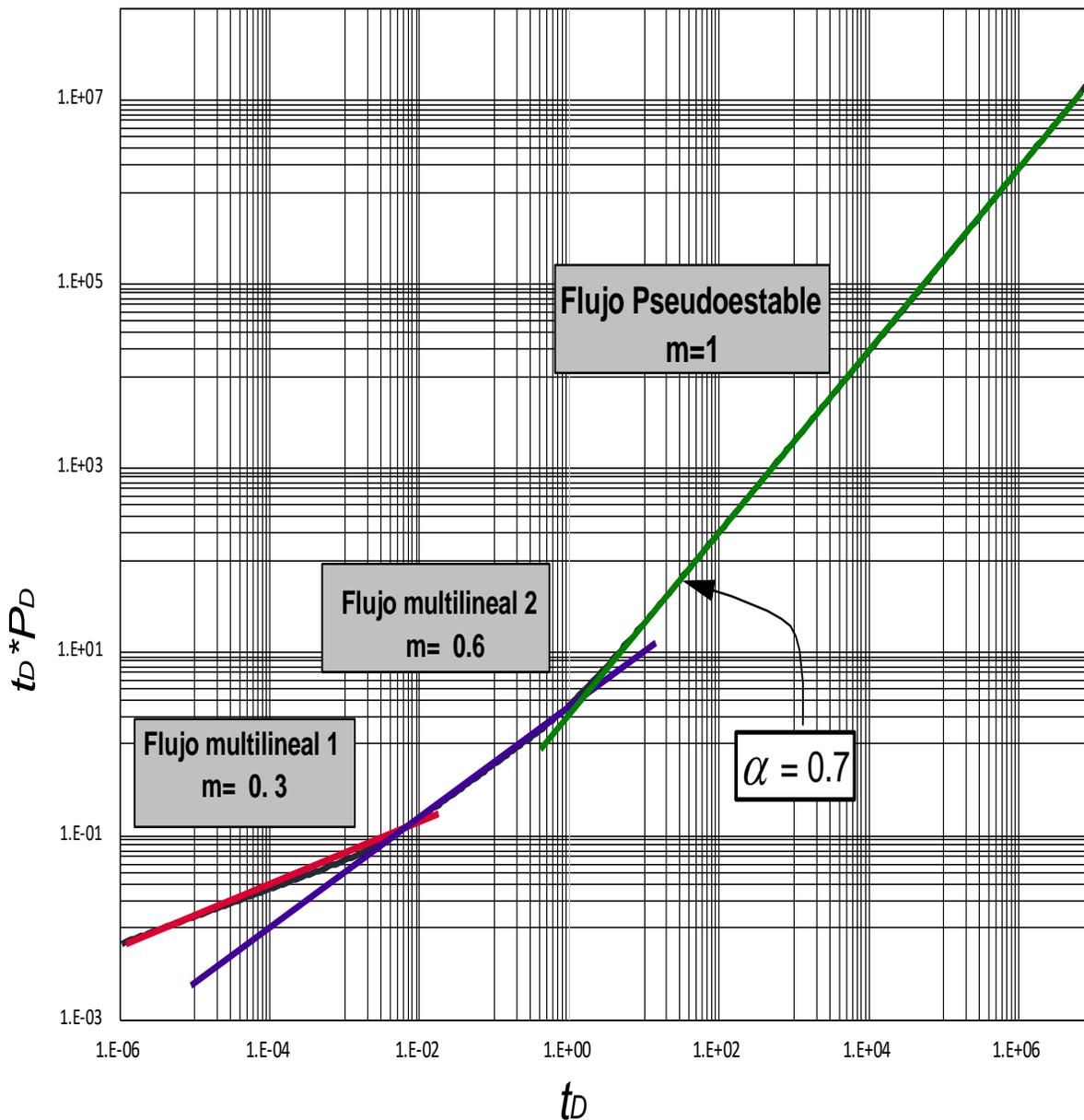


Figura 9.Caso 3

El comportamiento transitorio de la derivada de presión a tiempos intermedios en los dos últimos casos mencionados se debe a la heterogeneidad en el flujo presente en el yacimiento, ya que a medida que $\alpha \rightarrow 1$, más homogénea es el sistema el flujo, en estos casos no se ve preferencia de aporte por ninguno de los elementos del sistema.

2.2.3. Caso 4 ($\alpha = 1$)

El cuarto caso se presenta a valores de $\alpha=1$, a tiempos tempranos se identifica un flujo bilineal ($m=0.25$), seguido de un flujo lineal ($m=0.5$) y termina con un flujo pseudoestable de pendiente unitaria. En este caso el flujo en las redes de fractura no es obstaculizada por la matriz, ya que el sistema se encuentra densamente fracturado y eficientemente conectado, por lo tanto, el sistema se depletará con mayor rapidez y mejor eficiencia, lo que causa que las fracturas naturales dominen el flujo en el reservorio y que el flujo entre el reservorio y la fractura de conductividad hidráulica finita empiece a tiempos tempranos formando un flujo bilineal. (Figura 10)

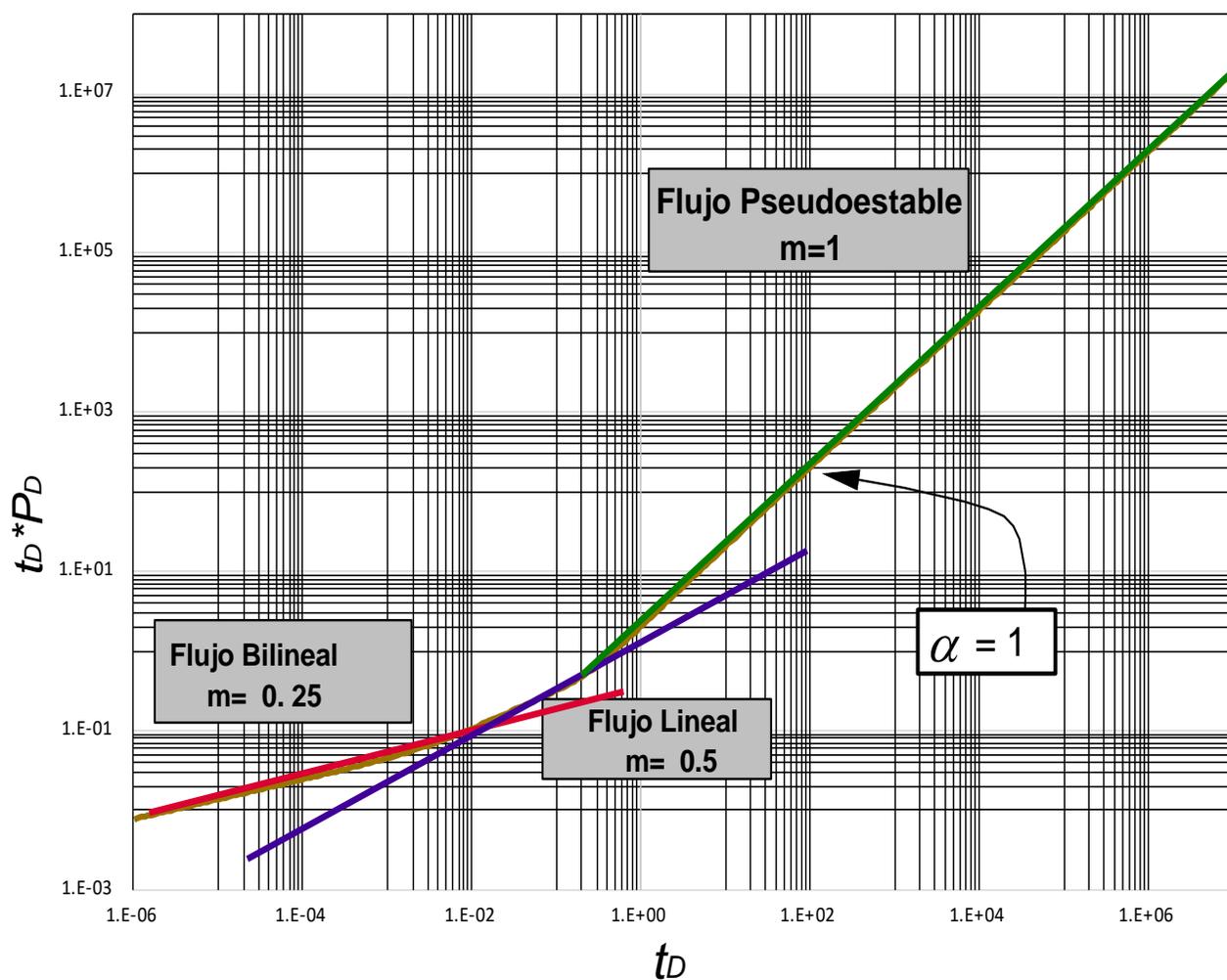


Figura 10.Caso 4

2.3. Ecuaciones de flujo en yacimientos de aceite

En los casos presentados a continuación se asume que $q = q_{fsc}$ y $ct\phi = (ct\phi)_i$.

2.3.1. Análisis Flujo lineal.

El flujo lineal se caracteriza por tener una pendiente de 0.5 en un gráfico Log-Log. En este flujo teóricamente la mayoría de los fluidos producidos por el pozo ocurre por la expansión de la fractura (Bourdarot & Balvet, 1998).

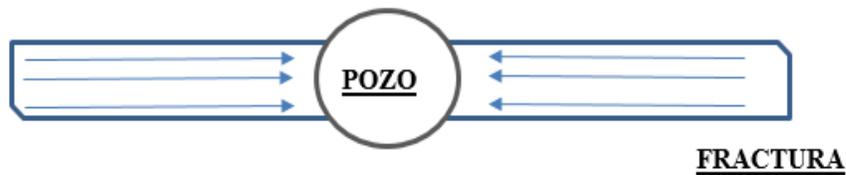


Figura 11. Flujo lineal en fractura.

Fuente: Bourdarot, Gilles, and Barbara Brown Balvet. 1998. Well testing: Interpretation methods: Editions Technip Paris, France.

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo lineal denotado con el subíndice L , es presentada a continuación:

$$(t_D^* P_D')_L = 1.08 \left(\frac{t_{DL}}{\alpha^2} \right)^{0.5} \quad (15)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y 5:

$$\frac{kh}{141.2q\mu B} (t^* \Delta P')_L = 1.08 \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2 \alpha^2} \right)^{0.5} \quad (16)$$

$$(t^* \Delta P)_L = 152.4 \frac{q\mu B}{k_I h} \sqrt{\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2 \alpha^2}} \quad (17)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta P')_L = 2.47 \frac{qB}{h} \sqrt{\frac{t_L \mu}{\phi c t k_I x_F^2 \alpha^2}} \quad (18)$$

Despejando permeabilidad del yacimiento interno, se obtiene:

$$k_I^{0.5} = 2.47 \frac{qB}{h(t^* \Delta P')_L} \left(\frac{t_L \mu}{\phi c t x_F^2 \alpha^2} \right)^{0.5} \quad (19)$$

$$k_I = 2\pi \frac{t_L \mu}{\phi c t} \left(\frac{qB}{h(t^* \Delta P')_L x_F \alpha} \right)^2 \quad (20)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>BOPD</i>
B_o	Factor volumétrico del crudo, <i>STB/bbls</i>
$t^* \Delta P'$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad

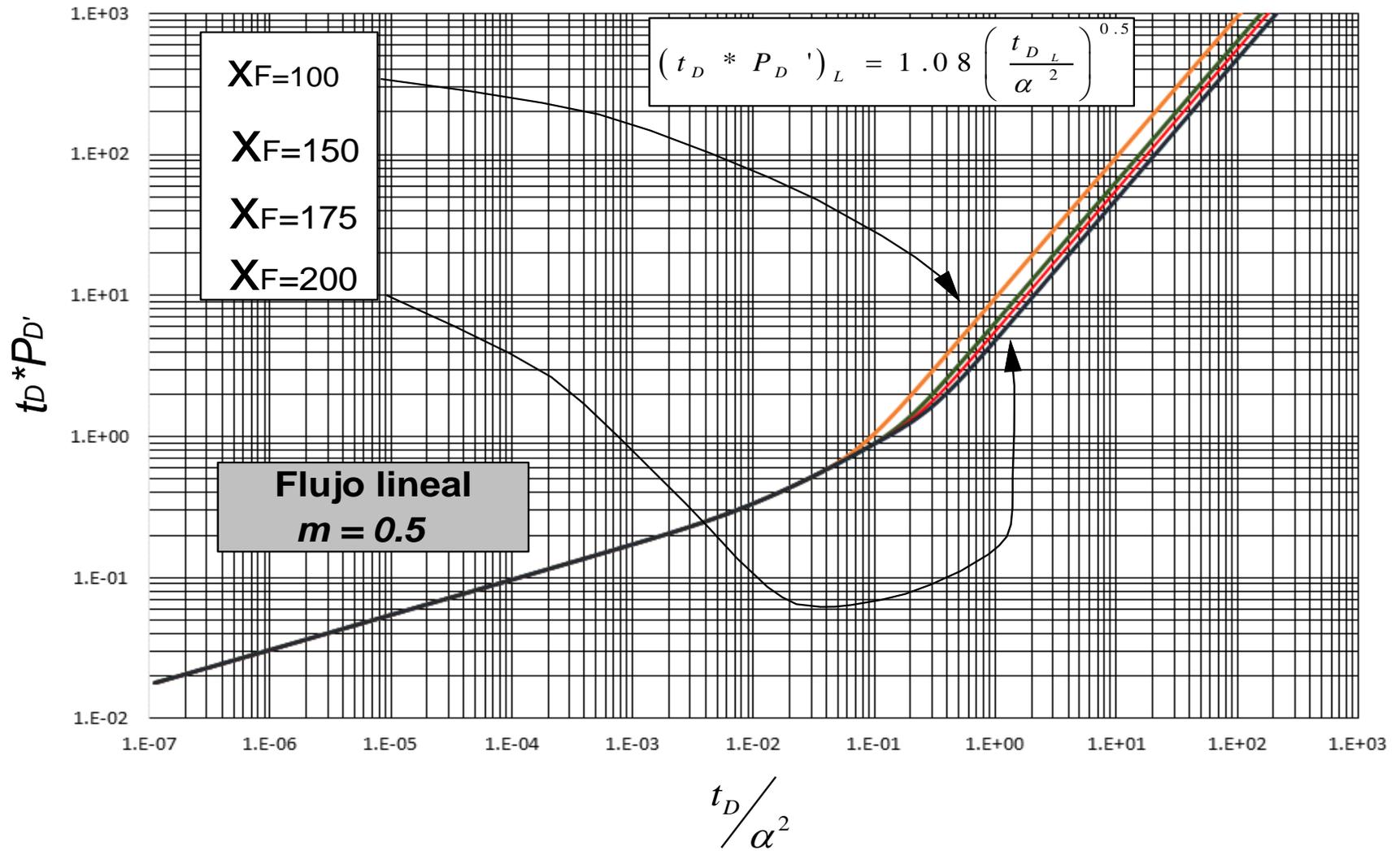


Figura 12. Análisis flujo lineal en yacimiento de comportamiento trilineal

Para hallar el daño del flujo lineal (S_L) se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 15 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$P'_{D_L} = 1.08 \left(\frac{1}{\alpha^2} \right)^{0.5} \frac{t_{D_L}^{0.5}}{t_{D_L}} \quad (21)$$

$$P'_{D_L} = 1.08 \alpha^{-1} t_{D_L}^{-0.5} \quad (22)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int P'_{D_L} = 1.08 \alpha^{-1} \int t_{D_L}^{-0.5} \quad (23)$$

$$P_{D_L} = 1.08 \alpha^{-1} \frac{t_{D_L}^{0.5}}{0.5} + S_L \quad (24)$$

Dividiendo la Ecuación 24 en Ecuación 15:

$$\frac{P_{D_L}}{(t_D * P_D')_L} = \frac{1.08 \alpha^{-1} \frac{t_{D_L}^{0.5}}{0.5} + S_L}{1.08 \left(\frac{t_{D_L}}{\alpha^2} \right)^{0.5}} \quad (25)$$

Despejando daño:

$$S_L = 1.08 \left(\frac{P'_{D_L}}{(t_D * P_D')_L} - 2 \right) \frac{t_{D_L}^{0.5}}{\alpha} \quad (26)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 1,4 y 5 en Ecuación 26:

$$S_L = \frac{1.08}{\alpha} \left(\frac{\frac{kh}{141.2q\mu B} \Delta P_L}{\frac{kh}{141.2q\mu B} (t^* \Delta P')_L} - 2 \right) \sqrt{\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2}} \quad (27)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_L = \frac{\pi}{179\alpha} \left(\frac{\Delta P_L}{(t^* \Delta P')_L} - 2 \right) \sqrt{\frac{k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2}} \quad (28)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
ΔP	Caída de presión, <i>psi</i>

2.3.2. Análisis Flujo Bilineal

El flujo Bilineal se caracteriza por tener una pendiente de 0.25 en un gráfico Log-Log. Este flujo corresponde a dos flujos lineales simultáneos (Bourdarot & Balvet,1998).

- Un flujo lineal compresible en la formación.
- Un flujo lineal incompresible en la fractura.

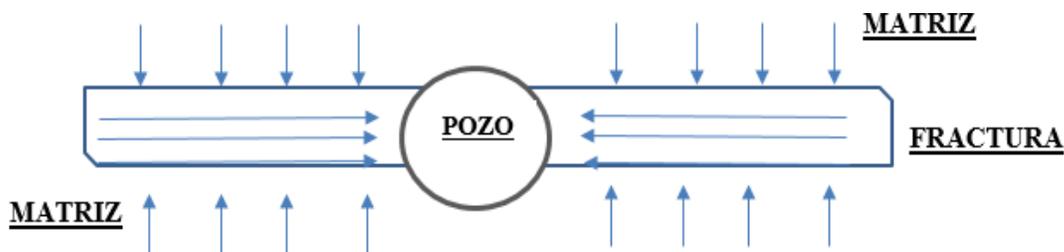


Figura 13. Esquema flujo Bilineal

Fuente: Bourdarot, Gilles, and Barbara Brown Balvet. 1998. Well testing: Interpretation methods: Editions Technip Paris, France.

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo bilineal denotado con el subíndice BL , es presentada a continuación:

$$(t_D^* P_D')_{BL} = 0.16 \left(\frac{t_{D_{BL}} k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \quad (29)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y 5:

$$\frac{kh}{141.2q\mu B} (t^* \Delta P')_{BL} = 0.16 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{BL}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \quad (30)$$

$$(t^* \Delta P')_{BL} = 22.59 \frac{q\mu B}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{BL} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I y_E} \right)^{0.25} \quad (31)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta P')_{BL} = 2.87 \frac{q\mu B}{k_I h} \left(\frac{t_{BL} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 y_E} \right)^{0.25} \quad (32)$$

Despejando conductividad de la fractura, se obtiene:

$$k_F w_F^{0.25} = 0.347 \frac{k_I h (t^* \Delta P')_{BL}}{q\mu B} \left(\frac{\phi \mu c t x_F^2 y_E}{t_{BL}} \right)^{0.25} \quad (33)$$

$$k_F w_F = \frac{\phi c t x_F^2 y_E}{69 \mu^3 t_{BL}} \left(\frac{k_I h (t^* \Delta P')_{BL}}{qB} \right)^4 \quad (34)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, md
h_I	Espesor del yacimiento interno, ft
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, $BOPD$
B_o	Factor volumétrico del crudo, $STB/bbls$

$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, cp
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	longitud media de la fractura, ft
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y
$k_F w_F$	Conductividad de la fractura

Para hallar el daño del flujo bilineal(S_{BL}) se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 29 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$(P_D')_{BL} = 0.16 \frac{t_{D_{BL}}^{0.25}}{t_{D_{BL}}} \left(\frac{k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \quad (35)$$

$$(P_D')_{BL} = 0.16 t_{D_{BL}}^{-0.75} \left(\frac{k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \quad (36)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int (P_D')_{BL} = 0.16 \left(\frac{k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \int t_{D_{BL}}^{-0.75} \quad (37)$$

$$P_{D_{BL}} = 0.16 \left(\frac{k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \frac{t_{D_{BL}}^{0.25}}{0.25} + S_{BL} \quad (38)$$

Dividiendo la Ecuación 38 en Ecuación 29:

$$\frac{P_{D_{BL}}}{(t_D^* P_D')_{BL}} = \frac{0.16 \left(\frac{k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \frac{t_{D_{BL}}^{0.25}}{0.25} + S_{BL}}{0.16 \left(\frac{t_{D_{BL}} k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25}} \quad (39)$$

Despejando daño:

$$S_{BL} = 0.16 \left(\frac{t_{D_{BL}} k_F w_F}{k_I y_E} \right)^{0.25} \left(\frac{P_{D_{BL}}}{(t_D^* P_D')_{BL}} - 4 \right) \quad (40)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 1, 4 y 5 en Ecuación 40:

$$S_{BL} = 0.16 \left(\frac{\frac{kh}{141.2q\mu B} \Delta P_{BL}}{\frac{kh}{141.2q\mu B} (t^* \Delta P')_{BL}} - 4 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k t_{BL} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I y_E} \right)^{0.25} \quad (41)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{BL} = \frac{\pi}{154} \left(\frac{\Delta P_{BL}}{(t^* \Delta P')_{BL}} - 4 \right) \left(\frac{t_{BL} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 y_E} \right)^{0.25} \quad (42)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y
$k_F w_F$	Conductividad de la fractura
ΔP	Caída de presión, <i>psi</i>

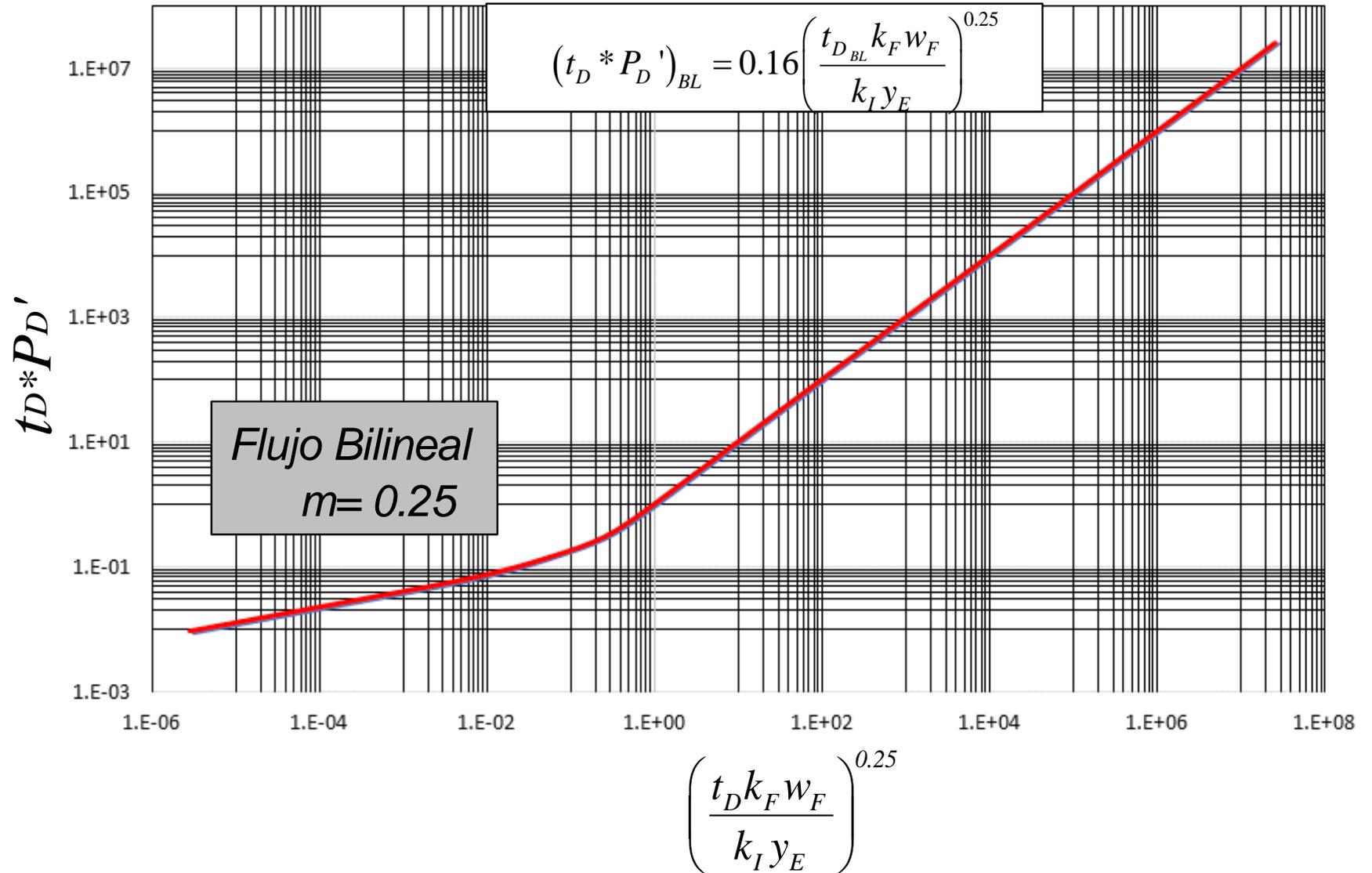


Figura 14. Análisis de flujo bilineal en yacimiento de comportamiento Trilineal.

2.3.3. Análisis Flujo Multilineal 1 (m=0.3)

Este flujo se caracteriza por tener una pendiente de 0.3 en un gráfico log-log, Se presenta a tiempos tempranos, en yacimientos con valores de α entre 0.3 y 0.9

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo multilineal 1 denotado con el subíndice $m1$, es presentada a continuación:

$$(t_D^* P_D')_{m1} = 0.3 \left(\frac{t_{Dm1} k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} (t^* \Delta P')_{m1} \quad (43)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y 5:

$$\frac{kh}{141.2 q \mu B} (t^* \Delta P')_{m1} = 0.3 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (44)$$

$$(t^* \Delta P')_{m1} = 42.36 \frac{q \mu B}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (45)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta P')_{m1} = 3.57 \frac{q \mu B}{k_I h} \left(\frac{t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 \alpha h} \right)^{0.3} \quad (46)$$

Despejando conductividad de la fractura, se obtiene:

$$k_F w_F^{0.3} = 0.282 \frac{k_I h (t^* \Delta P')_{m1}}{q \mu B} \left(\frac{\phi \mu c t x_F^2 \alpha h}{t_{m1}} \right)^{0.3} \quad (47)$$

$$k_F w_F = \frac{\pi}{214} \left(\frac{k_I (t^* \Delta P')_{m1}}{qB} \right)^3 \left(\frac{\phi c t x_F^2 \alpha}{t_{m1}} \right) \left(\frac{h^2}{\mu} \right)^2 \quad (48)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>BOPD</i>
B_o	Factor volumétrico del crudo, <i>STB/bbls</i>
$t^* \Delta P'$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y
$k_F w_F$	Conductividad de la fractura

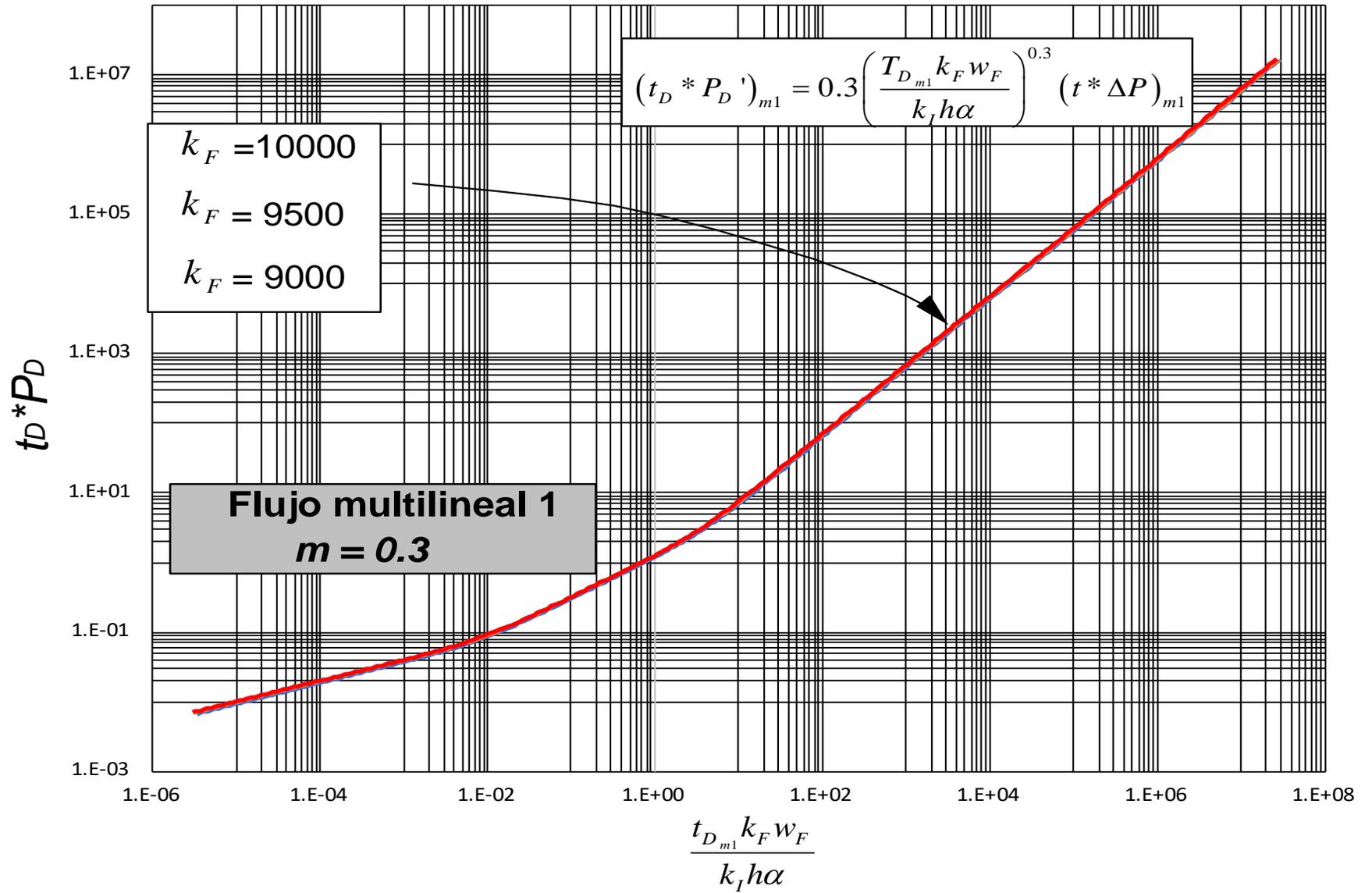


Figura 15. Análisis de flujo multilinear 1 (m=0.3) en yacimiento de comportamiento trilineal.

Con el fin de hallar el daño del flujo multilínea de pendiente 0.3 (S_{m1}), se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 43 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$(P_D')_{m1} = 0.3 \frac{t_{D_{m1}}^{0.3} \left(\frac{k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3}}{t_{D_{m1}}} \quad (49)$$

$$(P_D')_{m1} = 0.3 t_{D_{m1}}^{-0.7} \left(\frac{k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (50)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int (P_D')_{m1} = 0.3 \left(\frac{k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \int t_{D_{m1}}^{-0.7} \quad (51)$$

$$P_{D_{m1}} = 0.3 \left(\frac{k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \frac{t_{D_{m1}}^{0.3}}{0.3} + S_{m1} \quad (52)$$

Dividiendo la Ecuación 52 en Ecuación 43:

$$\frac{P_{D_{m1}}}{(t_D^* P_D')_{m1}} = \frac{0.3 \left(\frac{k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \frac{t_{D_{m1}}^{0.3}}{0.3} + S_{m1}}{0.3 \left(\frac{t_{D_{m1}} k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3}} \quad (53)$$

Despejando daño:

$$S_{m1} = 0.3 \left(\frac{t_{D_{m1}} k_F W_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \left(\frac{P_{D_{m1}}}{(t_D^* P_D')_{m1}} - 3.33 \right) \quad (54)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 1, 4 y 5 en Ecuación 54:

$$S_{m1} = 0.3 \left(\frac{\frac{k_I h_I}{141.2 q \mu B} \Delta P_{m1}}{\frac{kh}{141.2 q \mu B} (t^* \Delta P')_{m1}} - 3.33 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (55)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{m1} = \frac{\pi}{124} \left(\frac{\Delta P_{m1}}{(t^* \Delta P')_{m1}} - 3.33 \right) \left(\frac{t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 h \alpha} \right)^{0.3} \quad (56)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
$k_F w_F$	Conductividad de la fractura
ΔP	Caída de presión, <i>psi</i>

2.3.4. Análisis Flujo Multilineal 2 (m=0.6)

Este flujo se caracteriza por tener una pendiente de 0.6 en un gráfico, Se da en tiempos intermedios, en yacimientos que presenta valores de α entre 0.5 y 0.9.

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo multilineal 2 denotada con el subíndice $m2$, es presentada a continuación:

$$(t_D^* P_D')_{m2} = 2.7 \left(\frac{t_{Dm2} x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (57)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y 5:

$$\frac{kh}{141.2q\mu B} (t^* \Delta P')_{m2} = 2.7 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (58)$$

$$(t^* \Delta P')_{m2} = 381.24 \frac{q\mu B}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m2} x_F^{0.7}}{\phi \mu c t x_F^2 Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (59)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta P')_{m2} = 2.71 \frac{q\mu B}{k_I h} \left(\frac{t_{m2} k_I}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (60)$$

Despejando permeabilidad yacimiento interno, se obtiene:

$$k_I^{0.4} = 2.719 \frac{q\mu B}{h (t^* \Delta P')_{m2}} \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (61)$$

$$k_I = 12.2 \left(\frac{q\mu B}{h (t^* \Delta P')_{m2}} \right)^{2.5} \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{1.5} \quad (62)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>BOPD</i>
B_o	Factor volumétrico del crudo, <i>STB/bbls</i>
$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y

Con el fin de hallar el daño del flujo multilínea de pendiente 0.6 (S_{m2}), se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 57 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$(P_D')_{m2} = 2.7 \frac{t_{D_{m2}}^{0.6}}{t_{D_{m2}}} \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (63)$$

$$(P_D')_{m2} = 2.7 t_{D_{m2}}^{-0.4} \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (64)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int (P_D')_{m2} = 2.7 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \int t_{D_{m2}}^{-0.4} \quad (65)$$

$$P_{D_{m2}} = 2.7 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \frac{t_{D_{m2}}^{0.6}}{0.6} + S_{m2} \quad (66)$$

Dividiendo la Ecuación 66 en Ecuación 57:

$$\frac{P_{D_{m2}}}{(t_D * P_D')_{m2}} = \frac{2.7 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \frac{t_{D_{m2}}^{0.6}}{0.6} + S_{m2}}{2.7 \left(\frac{t_{D_{m2}} x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6}} \quad (67)$$

Despejando daño:

$$S_{m2} = 2.7 \left(\frac{t_{D_{m2}} x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \left(\frac{P_{D_{m2}}}{(t_D * P_D')_{m2}} - 1.7 \right) \quad (68)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 1,4 y 5 en Ecuación 68:

$$S_{m2} = 2.7 \left(\frac{\frac{k_I h_I}{141.2 q \mu B} \Delta P_{m2}}{\frac{kh}{141.2 q \mu B} (t^* \Delta P')_{m2}} - 1.7 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^2} \frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (69)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{m2} = \frac{1}{51.9} \left(\frac{\Delta P_{m2}}{(t^* \Delta P')_{m2}} - 1.7 \right) \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3}} \frac{k_I}{\alpha^{0.7} Y e^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (70)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
$k_F W_F$	Conductividad de la fractura
ΔP	Caída de presión, <i>psi</i>

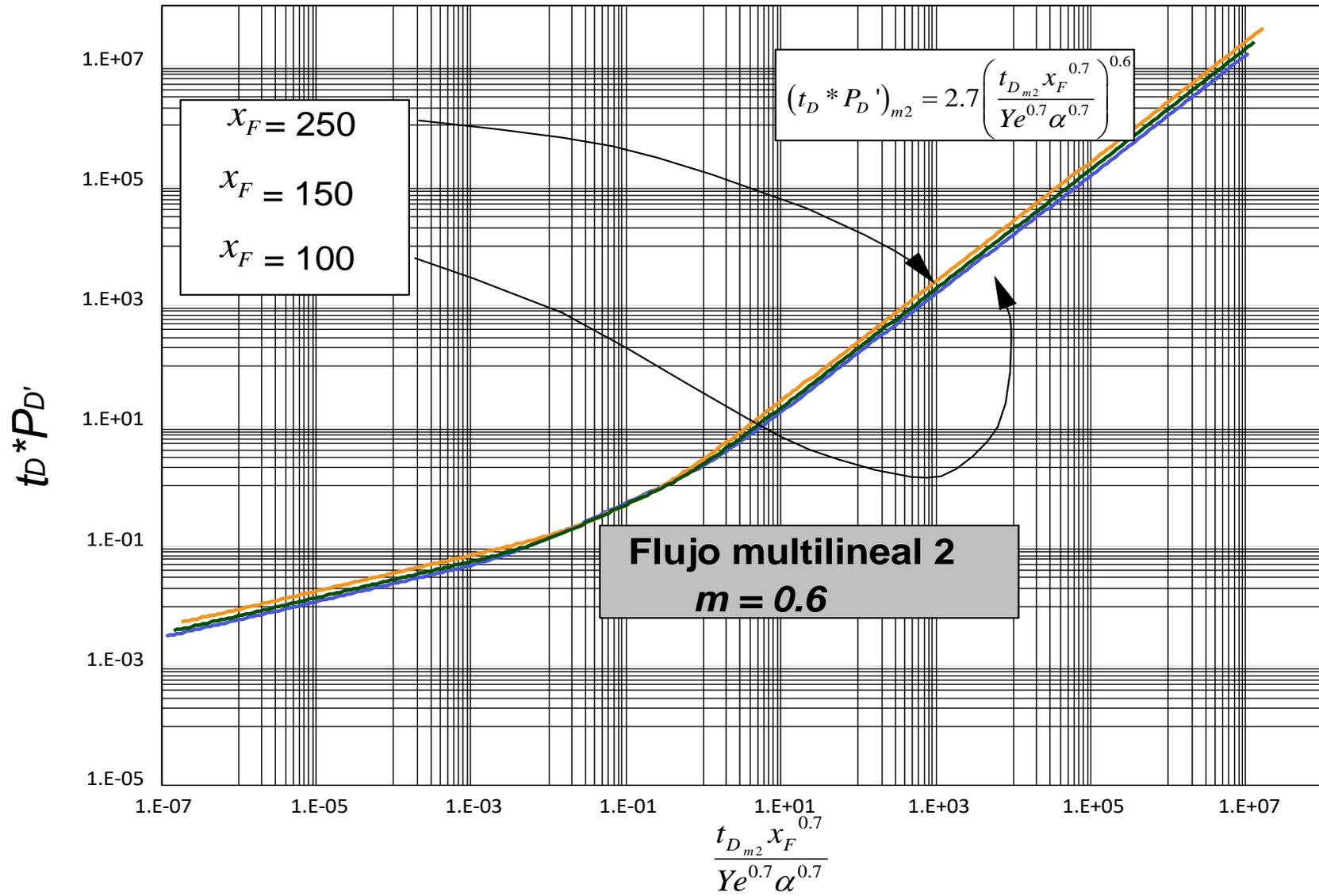


Figura 16. Análisis de flujo multilínea 2 ($m=0.6$) en yacimiento de comportamiento trilineal.

2.3.5. Análisis Flujo Multilineal 3 (m=0.8)

Este flujo se caracteriza por tener una pendiente de 0.8 en un gráfico log-log, Se presenta a tiempos intermedios, en yacimientos que tienen valores de α entre 0.3 y 0.4

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo multilineal 3 denotado con el subíndice $m3$, es presentada a continuación:

$$(t_D^* P_D')_{m3} = 31 \left(\frac{t_{Dm3} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (71)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y5:

$$\frac{kh}{141.2q\mu B} (t^* \Delta P')_{m3} = 31 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_i t_{m3}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (72)$$

$$(t^* \Delta P')_{m3} = 4377.2 \frac{q\mu B}{k_i h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_i t_{m3} x_F \alpha}{\phi \mu c t x_F^2 Y_E} \right)^{0.8} \quad (73)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta P')_{m3} = 5.999 \frac{q\mu B}{k_i^{0.2} h} \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (74)$$

Despejando permeabilidad del yacimiento interno, se obtiene:

$$k_I^{0.2} = 5.999 \frac{q\mu B}{(t^* \Delta P')_{m3} h} \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (75)$$

$$k_I = 7770.02 \left(\frac{q\mu B}{(t^* \Delta P')_{m3} h} \right)^5 \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^4 \quad (76)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>BOPD</i>
B_o	Factor volumétrico del crudo, <i>STB/bbls</i>
$t^* \Delta P'$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y

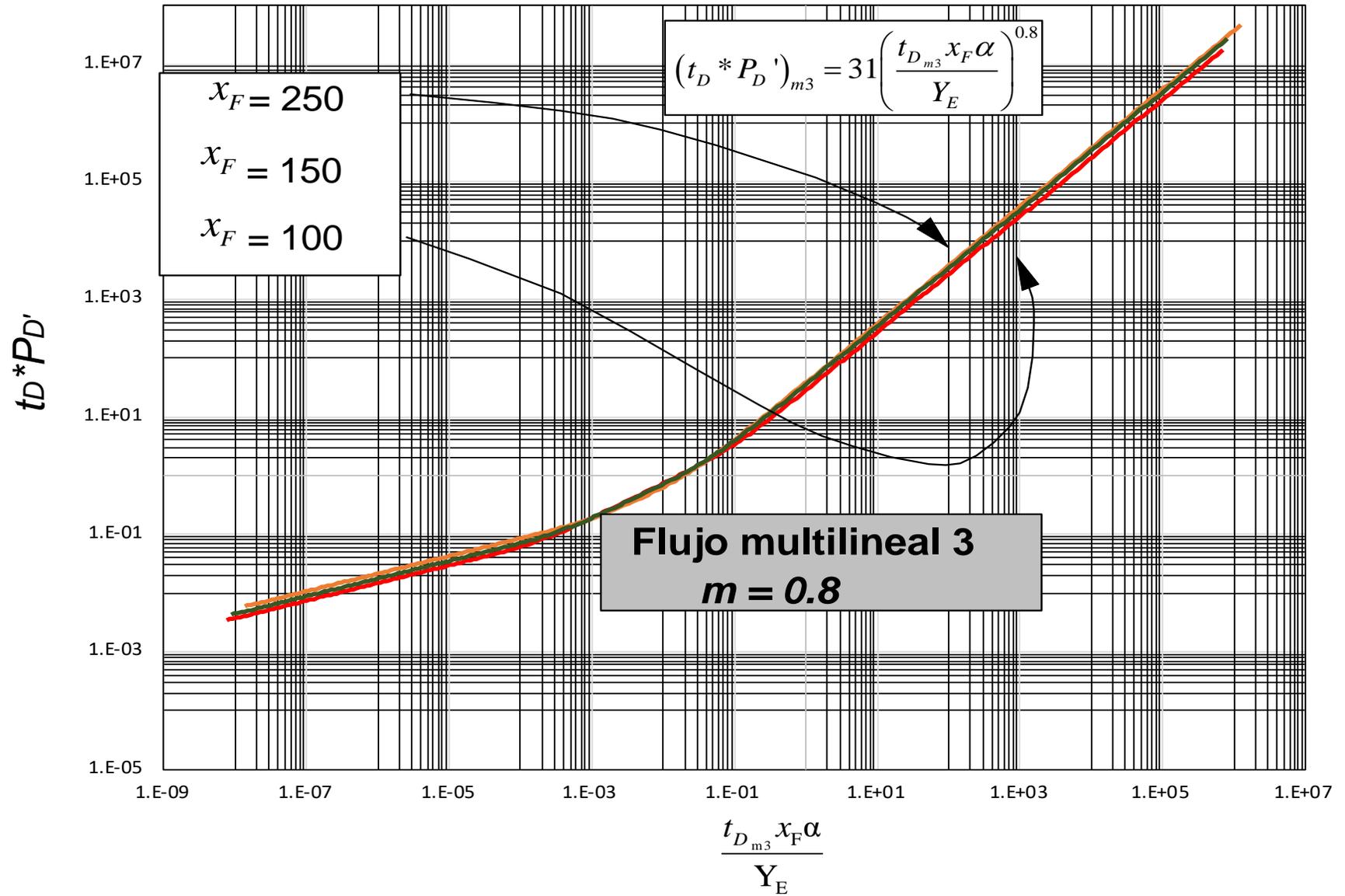


Figura 17. Análisis de flujo multilineal 3 ($m=0.8$) en yacimiento de comportamiento trilineal

Con el fin de hallar el daño del flujo multilínea de pendiente 0.8, se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 71 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$(P_D')_{m3} = 31 \frac{t_{Dm3}^{0.8}}{t_{Dm3}} \left(\frac{t_{Dm3} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (77)$$

$$(P_D')_{m3} = 31 t_{Dm3}^{-0.2} \left(\frac{t_{Dm3} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (78)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int (P_D')_{m3} = 31 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \int t_{Dm3}^{-0.2} \quad (79)$$

$$P_{Dm3} = 31 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \frac{t_{Dm3}^{0.8}}{0.8} + S_{m3} \quad (80)$$

Dividiendo la Ecuación 80 en Ecuación 71:

$$\frac{P_{Dm3}}{(t_D * P_D')_{m3}} = \frac{31 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \frac{t_{Dm3}^{0.8}}{0.8} + S_{m3}}{31 \left(\frac{t_{Dm3} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8}} \quad (81)$$

Despejando daño:

$$S_{m3} = 31 \left(\frac{t_{Dm3} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \left(\frac{P_{Dm3}}{(t_D * P_D')_{m3}} - 1.25 \right) \quad (82)$$

Reemplazando variables adimensionales, Ecuaciones 1,4 y 5 en Ecuación 82:

$$S_{m3} = 31 \left(\frac{\frac{k_l h_l}{141.2 q \mu B} \Delta P_{m3}}{\frac{kh}{141.2 q \mu B} (t^* \Delta P')_{m3}} - 1.25 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_l t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (83)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{m3} = \frac{\pi}{74} \left(\frac{\Delta P_{m3}}{(t^* \Delta P')_{m3}} - 1.25 \right) \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (84)$$

Donde:

$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección y, <i>ft</i>
ΔP	Caída de presión, <i>psi</i>

2.3.6. Análisis Flujo Pseudoestable

Este flujo se caracteriza por tener una pendiente de 1 en un gráfico log-log.

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo pseudoestable denotado con el subíndice *pss*, es presentada a continuación:

$$(t_D^* P_D')_{pss} = 1.21 \frac{t_{D_{pss}} x_F}{Y_e \alpha} \quad (85)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y 5:

$$\frac{kh}{141.2 q \mu B} (t^* \Delta P')_{pss} = 1.21 \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{pss}}{Y_e \alpha \phi \mu c t x_F} \right) \quad (86)$$

$$(t^* \Delta P')_{pss} = 170.85 \frac{q \mu B}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{pss}}{\phi \mu c t x_F Y_e \alpha} \right) \quad (87)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta P')_{pss} = 0.045 \frac{q\mu B}{h} \frac{t_{pss}}{\phi\mu c t x_F Y e \alpha} \quad (88)$$

Despejando longitud media de la fractura, se obtiene:

$$x_F = 0.045 \frac{qB}{h} \frac{t_{pss}}{\phi c t Y e \alpha (t^* \Delta P')_{pss}} \quad (89)$$

Donde:

h_I	Espesor del yacimiento interno,ft
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura ,BOPD
B_o	Factor volumétrico del crudo,STB/bbls
$t^* \Delta P$	Derivada de presión
μ	Viscosidad, cp
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno ,psi ⁻¹
x_F	Longitud media de la fractura, ft
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y

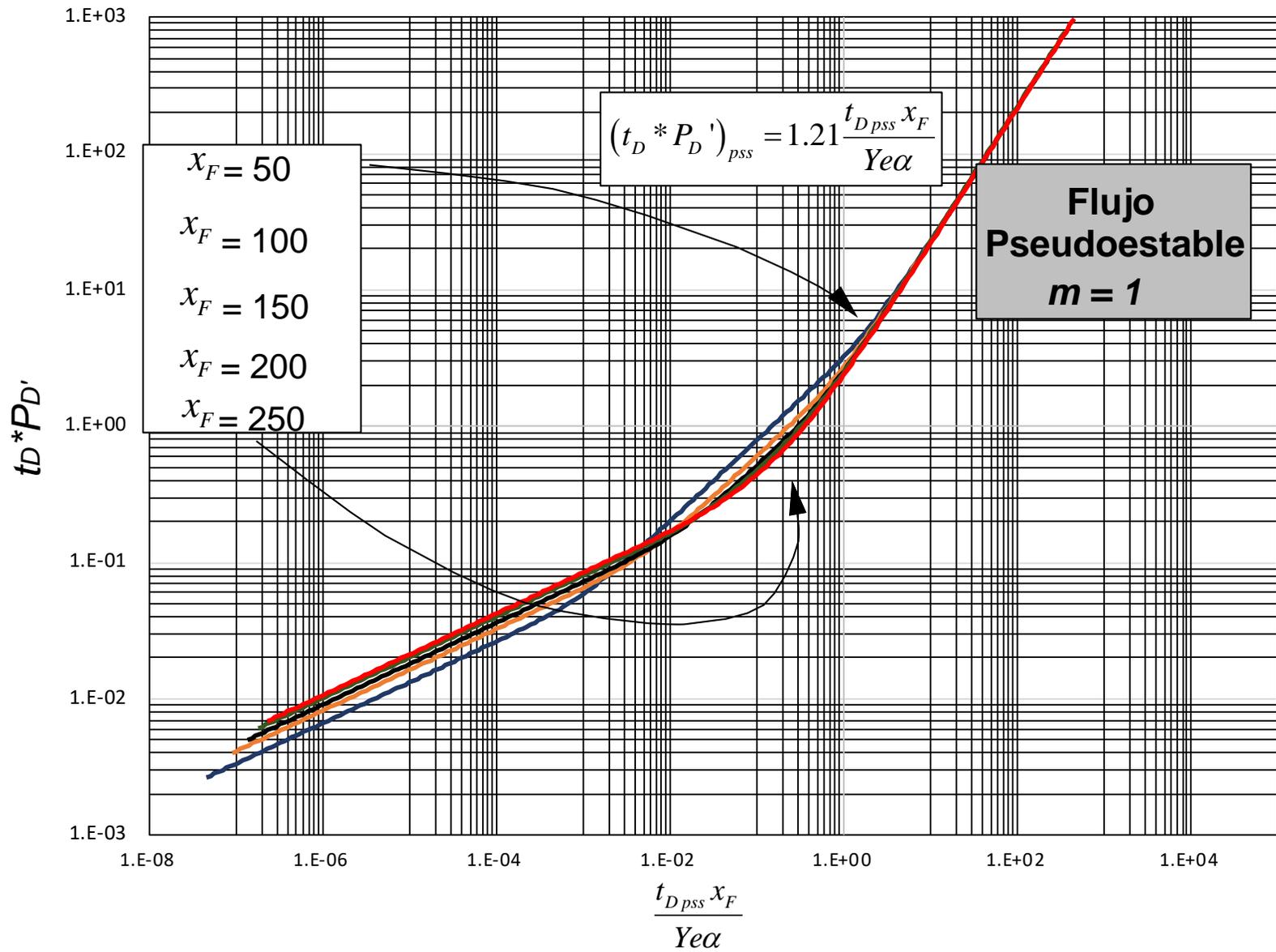


Figura18. Análisis de flujo Pseudoestable en yacimiento de comportamiento trilineal.

2.4. Ecuaciones de flujo en yacimientos de gas.

En estos yacimientos se presentan los mismos flujos anteriormente explicados, en esta parte se ingresa el término de pseudopresión desarrollado por Al-Husáiny (1996) para modelar el comportamiento de flujo de gas en el yacimiento.

2.4.1. Análisis Flujo lineal

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo lineal denotado con el subíndice L , es presentada a continuación:

$$\left(t_D * m(P)_D'\right)_L = 1.08 \left(\frac{t_{DL}}{\alpha^2}\right)^{0.5} \quad (90)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 2a y 4:

$$\frac{k_I h_I}{1422.54 q_{g,sc} T} \left(t^* \Delta m(P)_L'\right) = 1.08 \sqrt{\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2 \alpha^2}} \quad (91)$$

$$\left(t^* \Delta m(P)_L'\right) = 1536.3 \frac{q_{g,sc} T}{k_I h} \sqrt{\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2 \alpha^2}} \quad (92)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$\left(t^* \Delta m(P)_L'\right) = 24.94 \frac{q_{g,sc} T}{h} \sqrt{\frac{t_L}{\phi c t \mu k_I x_F^2 \alpha^2}} \quad (93)$$

Despejando permeabilidad del yacimiento interno, se obtiene:

$$k_I^{0.5} = 24.9 \frac{q_{g,sc} T}{h \left(t^* \Delta m(P)_L'\right)} \left(\frac{t_L}{\phi c t \mu x_F^2 \alpha^2}\right)^{0.5} \quad (94)$$

$$k_I = 622.4 \left(\frac{q_{F,sc} T}{h (t^* \Delta m(P))'_L} \right)^2 \left(\frac{t_L}{\phi c t \mu x_F^2 \alpha^2} \right) \quad (95)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>MScf/D</i>
T	Temperatura, <i>R°</i>
$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad

Para hallar el daño del flujo lineal se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación (90) por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$m(P)'_{D_L} = 1.08 \left(\frac{1}{\alpha^2} \right)^{0.5} \frac{t_{D_L}^{0.5}}{t_{D_L}} \quad (96)$$

$$m(P)'_{D_L} = 1.08 \alpha^{-1} t_{D_L}^{-0.5} \quad (97)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int m(P)'_{D_L} = 1.08 \alpha^{-1} \int t_{D_L}^{-0.5} \quad (98)$$

$$m(P)_{D_L} = 1.08 \alpha^{-1} \frac{t_{D_L}^{0.5}}{0.5} + S_L \quad (99)$$

Dividiendo la Ecuación 99 en Ecuación 90:

$$\frac{m(P)_{D_L}}{\left(t_D * m(P)_D\right)_L} = \frac{1.08 \alpha^{-1} \frac{t_{D_L}^{0.5}}{0.5} + S_L}{1.08 \left(\frac{t_{D_L}}{\alpha^2}\right)^{0.5}} \quad (100)$$

Despejando daño:

$$S_L = 1.08 \left(\frac{m(P)_{D_L}}{\left(t_D * m(P)_D\right)_L} - 2 \right) \frac{t_{D_L}^{0.5}}{\alpha} \quad (101)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 2a, 2b y 5 en Ecuación 101:

$$S_L = \frac{\pi}{179} \left(\frac{\frac{k_I h_I}{1422.54 q T} \Delta m(P)_L}{\frac{kh}{1422.54 q T} (t * \Delta m(P))_L} - 2 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2} \right)^{0.5} \frac{1}{\alpha} \quad (102)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_L = \frac{\pi}{179 \alpha} \left(\frac{\Delta m(P)_L}{(t * m(\Delta P))_L} - 2 \right) \sqrt{\frac{k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2}} \quad (103)$$

Donde:

h_I	Espesor del yacimiento interno, ft
k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, md
T	Temperatura °R
$t * \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	Longitud media de la factura, ft
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y
$\Delta m(P)$	Caída de pseudopresión, psi^2/cp

2.4.2. Análisis Flujo Bilineal

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo bilineal denotado con el subíndice BL , es presentada a continuación:

$$\left(t_D^* m(P)'_D\right)_{BL} = 0.14 \left(\frac{t_{D_{BL}} k_F w_F}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \quad (104)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 2b y 5:

$$\frac{k_I h_I}{1422.54 q_{Fsc} \mu T} \left(t^* \Delta m(P)'\right)_{BL} = 0.14 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{BL}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) k_F w_F}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \quad (105)$$

$$\left(t^* \Delta m(P)'\right)_{BL} = 199.15 \frac{q \mu T}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{BL} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I Y_E} \right)^{0.25} \quad (106)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$\left(t^* \Delta m(P)'\right)_{BL} = 25.37 \frac{q \mu T}{k_I h} \left(\frac{t_{BL} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 Y_E} \right)^{0.25} \quad (107)$$

Despejando conductividad de la fractura, se obtiene:

$$k_F w_F^{0.25} = 0.039 \frac{k_I h \left(t^* \Delta m(P)'\right)_{BL}}{q \mu T} \left(\frac{\phi \mu c t x_F^2 Y_E}{t_{BL}} \right)^{0.25} \quad (108)$$

$$k_F w_F = \frac{2.41 \times 10^{-6}}{\mu^3} \left(\frac{k_I h \left(t^* \Delta m(P)'\right)_{BL}}{q T} \right)^4 \left(\frac{\phi c t x_F^2 Y_E}{t_{BL}} \right) \quad (109)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>MScf/D</i>
T	Temperatura, <i>R°</i>
$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección <i>y</i> , <i>ft</i>
k_{FWF}	Conductividad de la fractura, <i>md-ft</i>

Para hallar el daño del flujo bilineal se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 29 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$m(P)'_{D_{BL}} = 0.16 \frac{t_{D_{BL}}^{0.25}}{t_{D_{BL}}} \left(\frac{k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \quad (110)$$

$$m(P)'_{D_{BL}} = 0.16 t_{D_{BL}}^{-0.75} \left(\frac{k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \quad (111)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int m(P)'_{D_{BL}} = 0.16 \left(\frac{k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \int t_{D_{BL}}^{-0.75} \quad (112)$$

$$m(P)_{D_{BL}} = 0.16 \left(\frac{k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \frac{t_{D_{BL}}^{0.25}}{0.25} + S_{BL} \quad (113)$$

Dividiendo la Ecuación 113 en Ecuación 104:

$$\frac{m(P)_{D_{BL}}}{(t_D * m(P)'_D)_{BL}} = \frac{0.16 \left(\frac{k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \frac{t_{D_{BL}}^{0.25}}{0.25} + S_{BL}}{0.16 \left(\frac{t_{D_{BL}} k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25}} \quad (114)$$

Despejando daño:

$$S_{BL} = 0.16 \left(\frac{t_{D_{BL}} k_F w_F \alpha}{k_I Y_E} \right)^{0.25} \left(\frac{m(P)_{D_{BL}}}{(t_D * m(P)'_D)_{BL}} - 4 \right) \quad (115)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 2a, 2b y 5 en Ecuación 115:

$$S_{BL} = 0.16 \left(\frac{\frac{k_I h_I}{1422.54 q \mu T} \Delta m(P)_{BL}}{\frac{kh}{1422.54 q \mu T} (t * \Delta m(P))'_{BL}} - 4 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{BL} k_F w_F \alpha}{\phi \mu c t x_F^2 k_I Y_E} \right)^{0.25} \quad (116)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{BL} = \frac{\pi}{154} \left(\frac{\Delta m(P)}{(t * \Delta m(P))'_{BL}} - 4 \right) \left(\frac{t_{BL} k_F w_F \alpha}{\phi \mu c t x_F^2 Y_E} \right)^{0.25} \quad (117)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, md
$t * \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	Longitud media de la fractura, ft
α	Coefficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y
$\Delta m(P)$	Caída de pseudopresión, psi^2/cp
k_{FWF}	Conductividad de la fractura, $md-ft$

2.4.3. Análisis Flujo Multilineal 1 (m=0.3)

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo multilineal 1 , es presentada a continuación:

$$\left(t_D^* m(P)'_D \right)_{m1} = 0.3 \left(\frac{t_{D_{m1}} k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (118)$$

Reemplazando Variables adimensionales, Ecuaciones. 2 a y 5:

$$\frac{kh}{1422.54qT} \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m1} = 0.3 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (119)$$

$$\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m1} = 426.7 \frac{qT}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (120)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m1} = 36 \frac{qT}{k_I h} \left(\frac{t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 \alpha h} \right)^{0.3} \quad (121)$$

Despejando conductividad de la fractura, se obtiene:

$$k_F w_F^{0.3} = 0.282 \frac{k_I h \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m1}}{qT} \left(\frac{\phi \mu c t x_F^2 \alpha h}{t_{m1}} \right)^{0.3} \quad (122)$$

$$k_F w_F = \frac{\pi}{214} \frac{\phi c t \mu x_F^2 \alpha}{t_{m1}} \left(\frac{k_I \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m1}}{qT} \right)^3 h^4 \quad (123)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>MScf/D</i>
T	Temperatura, <i>R°</i>
$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresion
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad
k_{FWF}	Conductividad de la fractura, <i>md-ft</i>

Con el fin de hallar el daño del flujo multilíneo de pendiente 0.3, se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 123 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$m(P)_{D_{m1}}' = 0.3 \frac{t_{D_{m1}}^{0.3}}{t_{D_{m1}}} \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (124)$$

$$m(P)_{D_{m1}}' = 0.3 t_{D_{m1}}^{-0.7} \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (125)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int m(P)_{D_{m1}}' = 0.3 \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \int t_{D_{m1}}^{-0.7} \quad (126)$$

$$m(P)_{D_{m1}} = 0.3 \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \frac{t_{D_{m1}}^{0.3}}{0.3} + S_{m1} \quad (127)$$

Dividiendo la Ecuación 127 en Ecuación 118:

$$\frac{m(P)_{D_{m1}}}{(t_D^* m(P)')_{m1}} = \frac{0.3 \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \frac{t_{D_{m1}}^{0.3}}{0.3} + S_{m1}}{0.3 \left(\frac{t_{D_{m1}} k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3}} \quad (128)$$

Despejando daño:

$$S_{m1} = 0.3 \left(\frac{t_{D_{m1}} k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \left(\frac{m(P)_{D_{m1}}}{(t_D^* m(P)')_{m1}} - 3.33 \right) \quad (129)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 2a, 2b y 5 en Ecuación 129:

$$S_{m1} = 0.3 \left(\frac{\frac{k_I h_I}{1422.54 q T} \Delta m(P)_{m1}}{\frac{kh}{1422.54 q T} (t^* \Delta m(P)')_{m1}} - 3.33 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 k_I h \alpha} \right)^{0.3} \quad (130)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{m1} = \frac{\pi}{124} \left(\frac{\Delta m(P)_{m1}}{(t^* \Delta m(P)')_{m1}} - 3.33 \right) \left(\frac{t_{m1} k_F w_F}{\phi \mu c t x_F^2 h \alpha} \right)^{0.3} \quad (131)$$

Donde:

$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	Longitud media de la fractura, ft
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y
h	Espesor yacimiento interno, ft
$\Delta m(P)$	Caída de pseudopresión, psi^2/cp
k_{FWF}	Conductividad de la fractura, $md-ft$

2.4.4. Análisis Flujo Multilineal 2 (m=0.6)

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo multilineal 2 , es presentada a continuación:

$$\left(t_D^* m(P)' \right)_{m2} = 2.7 \left(\frac{t_{D_{m2}} x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (132)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 2b y 5:

$$\frac{kh}{1422.54 qT} \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m2} = 2.7 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (133)$$

$$\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m2} = 3840.9 \frac{qT}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m2} x_F^{0.7}}{\phi \mu c t x_F^2 Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (134)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m2} = 27.35 \frac{qT}{k_I h} \left(\frac{t_{m2} k_I}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (135)$$

Despejando permeabilidad yacimiento interno, se obtiene:

$$k_I^{0.4} = 27.35 \frac{qT}{h \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m2}} \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (136)$$

$$k_I = 3911.9 \left(\frac{qT}{h \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m2}} \right)^{2.5} \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{1.5} \quad (137)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>MScf/D</i>
T	Temperatura, <i>R°</i>
$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño de yacimiento en dirección <i>y</i> , <i>ft</i>

Con el fin de hallar el daño del flujo multilínea de pendiente 0.6, se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 137 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$m(P)'_{D_{m2}} = 2.7 \frac{t_{D_{m2}}^{0.6}}{t_{D_{m2}}} \left(\frac{x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (138)$$

$$m(P)'_{D_{m2}} = 2.7 t_{D_{m2}}^{-0.4} \left(\frac{x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (139)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int m(P)'_{D_{m2}} = 2.7 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \int t_{D_{m2}}^{-0.4} \quad (140)$$

$$m(P)_{D_{m2}} = 2.7 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \frac{t_{D_{m2}}^{0.6}}{0.6} + S_{m2} \quad (141)$$

Dividiendo la Ecuación 141 en Ecuación 132:

$$\frac{m(P)'_{D_{m2}}}{(t_D * m(P)'_{D_{m2}})} = \frac{2.7 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \frac{t_{D_{m2}}^{0.6}}{0.6} + S_{m2}}{2.7 \left(\frac{t_{D_{m2}} x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6}} \quad (142)$$

Despejando daño:

$$S_{m2} = 2.7 \left(\frac{t_{D_{m2}} x_F^{0.7}}{Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \left(\frac{m(P)_{D_{m2}}}{(t_D * m(P)'_{D_{m2}})} - 1.7 \right) \quad (143)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 2a,2b y 5 en Ecuación 143:

$$S_{m2} = 2.7 \left(\frac{\frac{k_I h_I}{1422.54 q T} \Delta m(P)_{m2}}{\frac{kh}{1422.54 q T} (t * \Delta m(P)'_{m2})} - 1.7 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m2} x_F^{0.7}}{\phi \mu c t x_F^2 Ye^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (144)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{m2} = \frac{1}{51.9} \left(\frac{\Delta m(P)_{m2}}{(t * \Delta m(P)'_{m2})} - 1.7 \right) \left(\frac{t_{m2} k_I}{\phi \mu c t x_F^{1.3} \alpha^{0.7} Ye^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (145)$$

Donde:

$t * \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la factura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y
h	Espesor yacimiento interno, <i>ft</i>
$\Delta m(P)$	Caída de pseudopresión, <i>psi²/cp</i>

2.4.5. Análisis Flujo Multilineal 3 (m=0.8)

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo multilineal 3 , es presentada a continuación:

$$\left(t_D^* m(P)' \right)_{m3} = 31 \left(\frac{t_{D_{m3}} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (146)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 2b y 5:

$$\frac{kh}{1422.54 qT} \left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m3} = 31 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m3}}{\phi \mu c t x_F^2} \right) x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (147)$$

$$\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m3} = 44098.74 \frac{qT}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m3} x_F \alpha}{\phi \mu c t x_F^2 Y_E} \right)^{0.8} \quad (148)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m3} = 60.43 \frac{qT}{k_I^{0.2} h} \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (149)$$

Despejando permeabilidad del yacimiento interno, se obtiene:

$$k_I^{0.2} = 60.43 \frac{qT}{\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m3} h} \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (150)$$

$$k_I = 1.24 \times 10^{-7} \left(\frac{qT}{\left(t^* \Delta m(P)' \right)_{m3} h} \right)^5 \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^4 \quad (151)$$

Donde:

- k_I Permeabilidad del yacimiento interno, *md*
- h Espesor del yacimiento interno, *ft*

$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura ,MScf/D
T	Temperatura, R°
$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno , psi^{-1}
x_F	Longitud media de la factura, ft
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño de yacimiento en dirección y, ft

Con el fin de hallar el daño del flujo multilínea de pendiente 0.8, se realiza el siguiente procedimiento:

Se divide la Ecuación 151 por el tiempo adimensional, dando como resultado:

$$m(P)_{D_{m3}}' = 31 \frac{t_{D_{m3}}^{0.8}}{t_{D_{m3}}} \left(\frac{t_{D_{m3}} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (152)$$

$$m(P)_{D_{m3}}' = 31 t_{D_{m3}}^{-0.2} \left(\frac{t_{D_{m3}} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (153)$$

Integrando en ambos lados de la Ecuación:

$$\int m(P)_{D_{m3}}' = 31 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \int t_{D_{m3}}^{-0.2} \quad (154)$$

$$m(P)_{D_{m3}} = 31 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \frac{t_{D_{m3}}^{0.8}}{0.8} + S_{m3} \quad (155)$$

Dividiendo la Ecuación 155 en Ecuación 146:

$$\frac{m(P)_{D_{m3}}}{(t_D^* m(P)')_{m3}} = \frac{31 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \frac{t_{D_{m3}}^{0.8}}{0.8} + S_{m3}}{31 \left(\frac{t_{D_{m3}} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8}} \quad (156)$$

Despejando daño:

$$S_{m3} = 31 \left(\frac{t_{D_{m3}} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \left(\frac{m(P)_{m3}}{\left(t_D^* m(P)'_D \right)_{m3}} - 1.25 \right) \quad (157)$$

Remplazando variables adimensionales, Ecuaciones 2a, 2b y 5 en Ecuación 157:

$$S_{m3} = 31 \left(\frac{\frac{k_I h_I}{141.2 q T} \Delta m(P)_{m3}}{\frac{kh}{141.2 q T} (t^* \Delta m(P))'_{m3}} - 1.25 \right) \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F^2 Y_E} \right)^{0.8} \quad (158)$$

Simplificando y ordenando términos, se obtiene:

$$S_{m3} = \frac{\pi}{74} \left(\frac{\Delta m(P)_{m3}}{(t^* \Delta m(P))'_{m3}} - 1.25 \right) \left(\frac{t_{m3} \alpha}{\phi \mu c t x_F Y_E} \right)^{0.8} \quad (159)$$

Donde:

$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
μ	Viscosidad, cp
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
x_F	Longitud media de la fractura, ft
α	Coefficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y
h	Espesor yacimiento interno, ft
$\Delta m(P)$	Caída de pseudopresión, psi^2/cp

2.4.6. Análisis Flujo Pseudoestable

La Ecuación gobernante para el régimen del flujo Pseudoestable, es presentada a continuación:

$$\left(t_D^* m(P)'_D \right)_{pss} = 1.21 \frac{t_{D_{pss}} x_F}{Y_e \alpha} \quad (160)$$

Remplazando Variables adimensionales, Ecuaciones 4 y 5 :

$$\frac{kh}{1422.54qT} (t^* \Delta m(P))_{pss} = 1.21 \left(\frac{\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{pss}}{\phi \mu c t x_F} \right)}{Ye \alpha} \right) \quad (161)$$

$$(t^* \Delta m(P))_{pss} = 1721.2 \frac{qT}{k_I h} \left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{pss}}{\phi \mu c t x_F Ye \alpha} \right) \quad (162)$$

Reordenando y simplificando términos:

$$(t^* \Delta m(P))_{pss} = 0.45 \frac{qT}{h} \left(\frac{t_{pss}}{\phi \mu c t x_F Ye \alpha} \right) \quad (163)$$

Despejando longitud media de la fractura, se obtiene:

$$x_F = 0.45 \frac{qT}{h} \frac{t_{pss}}{\phi \mu c t Ye \alpha (t^* \Delta m(P))_{pss}} \quad (164)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
$q = q_{FSC}$	Caudal unitario de cada fractura, <i>MScf/D</i>
T	Temperatura, <i>R°</i>
$t^* \Delta m(P)'$	Derivada de pseudopresión
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	Longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	Coefficiente de difusividad
Ye	Tamaño de yacimiento en dirección <i>y</i> , <i>ft</i>

2.5. Puntos de intersección

Mediante los puntos de intersección hallamos dos parámetros importantes en el yacimiento como el tamaño de yacimiento en dirección y (Ye) y la permeabilidad de la fractura hidráulica (k_F), estas ecuaciones nos permiten comprobar el correcto funcionamiento de las ecuaciones de flujo al hacer una comparación entre los resultados obtenidos por ambos métodos, el procedimiento para obtener las ecuaciones de los puntos de intersección son los mismos tanto en yacimiento de aceite como de gas.

2.5.1. Intersección flujo lineal-pseudoestable

Igualando Ecuación 15 con la Ecuación 85:

$$1.08 \left(\frac{t_D}{\alpha^2} \right)^{0.5} = 1.21 \frac{x_F t_D}{ye \alpha} \quad (165)$$

En el flujo lineal y pseudoestable el tiempo de intersección es:

$$t_{D_{Lpssi}} = 0.7 \left(\frac{Ye}{x_F} \right)^2 \quad (166)$$

Reemplazando variables adimensionales en la Ecuación 166:

$$\frac{2.637 \times 10^{-4} k t_{Lpssi}}{\phi c t \mu x_F^2} = 0.7 \left(\frac{Ye}{x_F} \right)^2 \quad (167)$$

Despejando tamaño de yacimiento en dirección Y (Ye):

$$Ye = 1.9 \times 10^{-2} \left(\frac{k_I t_{Lpssi}}{\phi c t \mu} \right)^{0.5} \quad (168)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, md
μ	Viscosidad, cp
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, psi^{-1}
t_{LPSSI}	Tiempo de intersección flujo lineal y pseudoestable, hr

2.5.2. Intersección flujo multilínea 1(m=0.3)-multilínea 2(m=0.6)

Igualando Ecuación 43 con Ecuación 57:

$$0.3 \left(\frac{t_D k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} = 2.7 \left(\frac{t_D x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \quad (169)$$

En el flujo multilínea 1 y multilínea 2 el tiempo de intersección es:

$$t_{Dm1m2i} = 6.59 \times 10^{-4} \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right) \left(\frac{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}}{x_F^{0.7}} \right)^2 \quad (170)$$

Remplazando variables adimensionales en la Ecuación (170):

$$\frac{2.637 \times 10^{-4} k t_{m1m2i}}{\phi c t \mu x_F^2} = 149.38 \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^1 \left(\frac{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}}{x_F^{0.7}} \right)^2 \quad (171)$$

Despejando la permeabilidad de la fractura:

$$k_F = \frac{0.047 h t_{m1m2i}}{\mu c t \phi w_F} \left(\frac{k_I}{x_F^{0.3}} \right)^2 \left(\frac{Y e^{-0.7}}{\alpha^{0.2}} \right)^2 \quad (172)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
h_I	Espesor del yacimiento interno, <i>ft</i>
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
Ye	Tamaño del yacimiento en dirección Y
k_F	Permeabilidad de la fractura, <i>md</i>
w_F	Ancho de la fractura, <i>ft</i>

2.5.3. Intersección multilínea 1 (m=0.3) y multilínea 3 (m=0.8)

Igualando la Ecuación 43 con la Ecuación 71:

$$0.3 \left(\frac{t_D k_F w_F}{K_I h \alpha} \right)^{0.3} = 31 \left(\frac{t_{D_{m3}} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \quad (173)$$

En el flujo multilínea 1 y multilínea 3 el tiempo de intersección es:

$$\left(t_{D_{m1m3i}} \right)^{0.5} = 9.67 \times 10^{-3} \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \left(\frac{Y_e}{x_F \alpha} \right)^{0.8} \quad (174)$$

Remplazando variables adimensionales en la Ecuación 174

$$\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k_I t_{m1m3i}}{\phi c t \mu x_F^2} \right)^{0.5} = 9.67 \times 10^{-3} \left(\frac{k_F w_F}{k_I h \alpha} \right)^{0.3} \left(\frac{Y_e}{x_F \alpha} \right)^{0.8} \quad (175)$$

Despejando permeabilidad de la fractura:

$$k_F = 1.57 \times 10^{-4} \left(\frac{w_F}{h} \right)^{0.3} \left(\frac{Y_e}{\alpha^{1.37}} \right)^{0.8} \frac{\phi c t \mu x_F^{1.2}}{k_I^{1.3} t_{m1m3i}} \quad (176)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y
k_F	Permeabilidad de la fractura, <i>md</i>
w_F	Ancho de la fractura, <i>ft</i>
t_{m1m3i}	Tiempo de intersección flujo multilínea 1 y multilínea 3

2.5.4. Intersección flujo multilínea 2 (m=0.6) y flujo pseudoestable

Igualando Ecuación 57 con Ecuación 85:

$$2.7 \left(\frac{t_D x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} = 1.21 \frac{t_D x_F}{Y e \alpha} \quad (177)$$

En el multilínea 2 (m=0.6) y el flujo pseudoestable el tiempo de intersección es:

$$t_{D_{m2_{pssi}}}^{0.4} = 2.25 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \frac{Y e \alpha}{x_F} \quad (178)$$

Remplazando variables adimensionales en la Ecuación 178

$$\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k t_{m2_{pssi}}}{\phi c t \mu x_F^2} \right)^{0.4} = 2.25 \left(\frac{x_F^{0.7}}{Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{0.6} \frac{Y e \alpha}{x_F} \quad (179)$$

Despejando Ye de la Ecuación 179

$$Y e = \frac{8.52 \times 10^{-4} \alpha^{0.72} \left(\frac{k t_{m2_{pssi}}}{\phi c t \mu} \right)^{0.68}}{x_F^{0.34}} \quad (180)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la factura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
$Y e$	Tamaño del yacimiento en dirección Y
$t_{m2_{pssi}}$	Tiempo de intersección multilínea 2 y pseudoestable.

2.3.5. Intersección flujo multilínea 3 (m=0.8) y flujo pseudoestable

Igualando Ecuación 71 y Ecuación 85:

$$31 \left(\frac{t_{Dm3} x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} = 1.21 \frac{x_F t_D}{Y_e \alpha} \quad (181)$$

En el flujo multilínea 3 y el flujo pseudoestable el tiempo de intersección es:

$$t_{Dm3pssi}^{0.2} = 25.6 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \frac{Y_e \alpha}{x_F} \quad (182)$$

Remplazando variables adimensionales en Ecuación 182

$$\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k t_{m3pssi}}{\phi c t \mu x_F^2} \right)^{0.2} = 25.6 \left(\frac{x_F \alpha}{Y_E} \right)^{0.8} \frac{Y_e \alpha}{x_F} \quad (183)$$

Simplificando términos y despejando Y_e de la Ecuación 183

$$Y_e = \frac{2.07 \times 10^{-6}}{x_F^{0.2} \alpha^9} \left(\frac{k_I t_{m3pssi}}{\phi c t \mu} \right) \quad (184)$$

Donde:

k_I	Permeabilidad del yacimiento interno, <i>md</i>
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y
t_{m3pssi}	Tiempo de intersección multilínea 3 y pseudoestable.

2.5.6. Intersección flujo bilineal y flujo lineal

Igualando Ecuación 29 y Ecuación 85.

$$0.16 \left(\frac{t_D k_F w_F}{k_I Y_e} \right)^{0.25} = 1.08 \left(\frac{t_D}{\alpha^2} \right)^{0.5} \quad (185)$$

El tiempo de intersección entre los flujos es definido por:

$$t_{D_{BLLi}}^{0.25} = 0.14 \alpha \left(\frac{k_F w_F}{k_I Y_e} \right)^{0.25} \quad (186)$$

Remplazando variables adimensionales:

$$\left(\frac{2.637 \times 10^{-4} k t_{BLLi}}{\phi c t \mu x_F^2} \right)^{0.25} = 0.14 \alpha \left(\frac{k_F w_F}{k_I Y_e} \right)^{0.25} \quad (187)$$

Despejando Permeabilidad de la fractura:

$$k_F = 0.91 \frac{k_I^2 Y_e t_{BLLi}}{\alpha^4 \phi c t \mu w_F x_F^2} \quad (188)$$

Donde:

k_F	Permeabilidad de la fractura, <i>md</i>
μ	Viscosidad, <i>cp</i>
ϕ	Porosidad yacimiento interno
ct	Compresibilidad yacimiento interno, <i>psi⁻¹</i>
x_F	longitud media de la fractura, <i>ft</i>
α	coeficiente de difusividad
Y_e	Tamaño del yacimiento en dirección Y, <i>ft</i>
t_{BLLi}	Tiempo de intersección bilineal y lineal.
w_F	Ancho de la fractura, <i>ft</i>

Capítulo 3

Aplicación y verificación de las ecuaciones de caracterización del flujo trilineal

Para verificar y aplicar las ecuaciones de la sección 2 se tomó como caso base los datos del campo Barnett presentado por Brown et al. (2009); estos datos se ingresaron en el programa *TRILINEAR MODEL* simulando el comportamiento de la derivada de presión, posterior a esto se procedió a calcular los diferentes parámetros mediante las ecuaciones desarrolladas y por último se hizo la comparación de los resultados y la data existente con el fin de hallar el margen de error, la tabla de datos generada para cada prueba se presenta el Apéndice B.

3.1. Ejercicios de Aplicación para yacimientos de aceite

3.1.1. Prueba 1 ($\alpha=0.6$)

Se simuló una prueba de presión para un yacimiento con $\alpha=0.8$ en la cual se identificaron los regímenes de flujo presentes (Figura 19). Los datos de entrada se muestran en la tabla 1:

Tabla 1.Datos de entrada para prueba 1

PRUEBA 1	
α	0.6
x_e	275
$Y_{e, ft}$	90.3
$x_{F, ft}$	150
$w_{F, ft}$	0.01
h, ft	300
r_w, ft	0.25
k_F, md	10000
$k_{a, md}$	0.13
k_O, md	1E-6
$(\phi c_t)_a, psi^{-1}$	2E-4
ϕ_F	0.38
c_{tF}, psi^{-1}	1E-4
ϕ_O	0.04
n_F	15
d_F	200
μ, CP	0.3

$q_{F, \text{stb/d}}$	150
-----------------------	-----

Mediante los datos generados por el programa *Trilinear model* (Apéndice B) se genera una curva ΔP y $t^* \Delta P'$ (Figura 20); Posterior a esto se identifica los regímenes de flujos presentes y se evidencia que el caso que se presenta es el 3, donde a tiempos tempranos se presenta un flujo multilíneo $m=0.3$, seguido por un segundo flujo multilíneo de $m=0.6$ y por último un flujo pseudoestable (Figura 19).

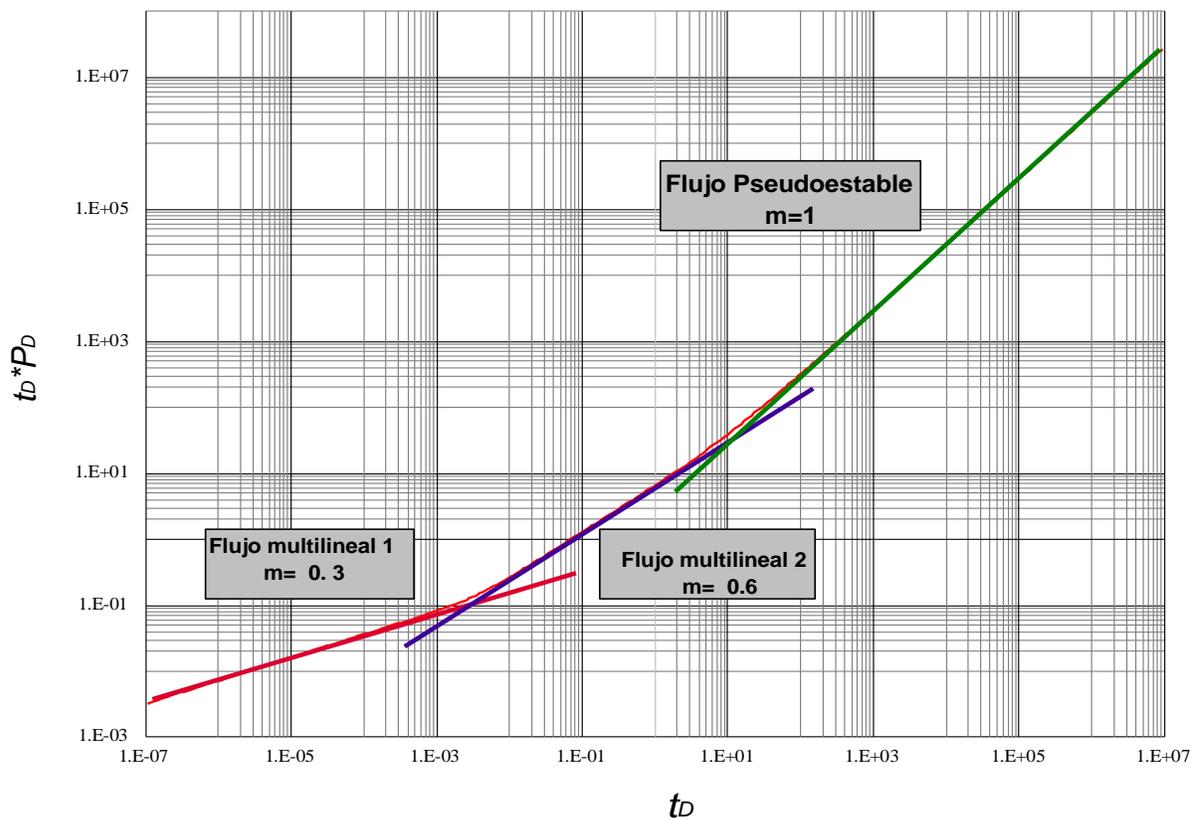


Figura 19. Identificación regímenes de flujo Prueba1.

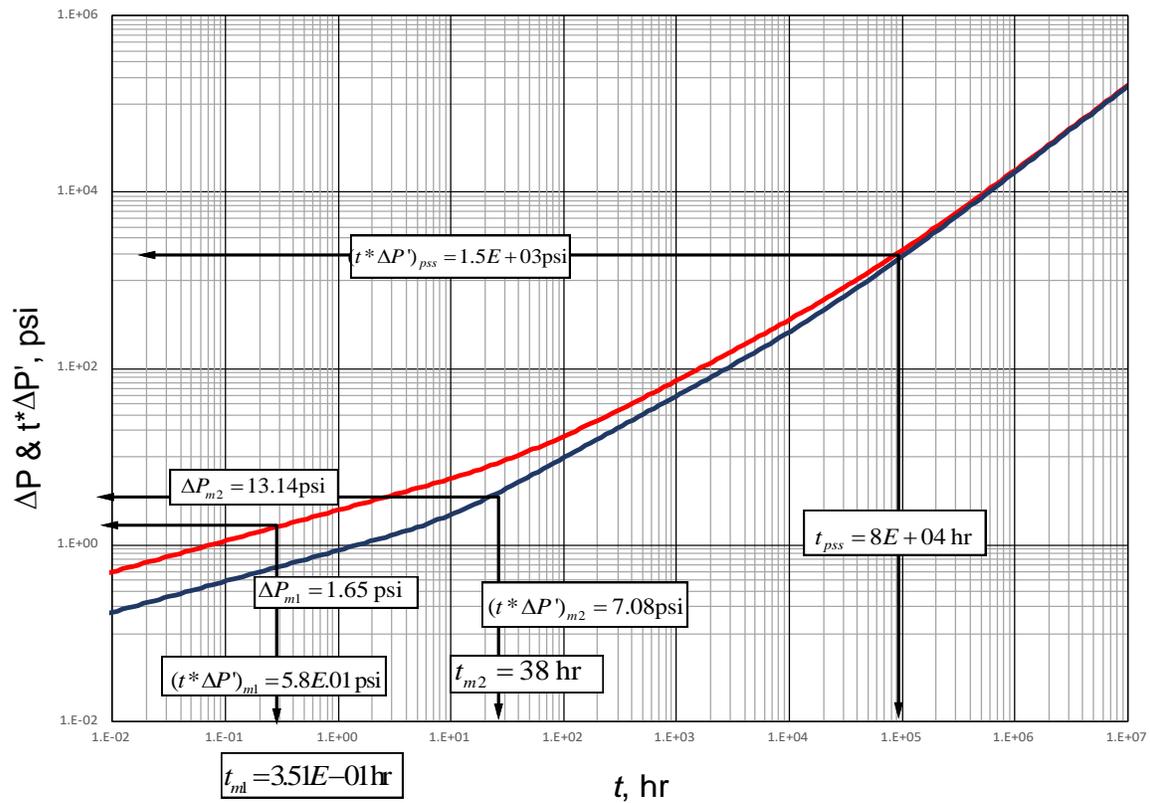


Figura 20. Presión y derivada de presión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 1)

Con el fin de hallar los parámetros del yacimiento mediante las ecuaciones desarrolladas aplicándose al respectivo régimen de flujo se realiza el siguiente procedimiento:

- I. Se lee en la gráfica los valores de los puntos característicos (Tabla 2) y sus tiempos de intersección (Tabla 3):

Tabla 2. Puntos característicos prueba 1

Régimen	Tiempo (hr)		Delta de presión (psi)		Derivada de presión (psi)	
	t_{m1}		ΔP_{m1}		$(t^* \Delta P')_{m1}$	
Multilineal 1 ($m=0.3$)	t_{m1}	$3.51E-01$	ΔP_{m1}	1.65	$(t^* \Delta P')_{m1}$	$5.80E-01$
Multilineal 2 ($m=0.6$)	t_{m2}	$6.8E+1$	ΔP_{m2}	13.14	$(t^* \Delta P')_{m2}$	7.08

Pseudoestable	t_{pss}	8E+04	ΔP_{pss}		$(t^* \Delta P')_{pss}$	1.5E+03
---------------	-----------	-------	------------------	--	-------------------------	---------

Tabla 3. Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 1

Intersección	$t_{intersección}$ (hr)
m1-m2	15
m2-pss	1.6E+4

II. Una vez identificados los puntos característicos se procede a hallar los parámetros en cada uno de los distintos flujos:

- Flujo Multilineal 1 (m=0.3)

Recordando la ecuación desarrollada para el flujo multilineal (m=0.3) (Ecuación 48):

$$k_F w_F = \frac{\pi}{214} \left(\frac{k_I (t^* \Delta P')_{m1}}{qB} \right)^3 \left(\frac{\phi c t x_F^2 \alpha}{t_{m1}} \right) \left(\frac{h^2}{\mu} \right)^2$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 2) y las variables conocidas (Tabla 1) en la ecuación 48:

$$k_F w_F = \frac{\pi}{214} \left(\frac{0.13 \times 5.80E-01}{150 \times 1.43} \right)^3 \times \left(\frac{2E-04 \times 150^2 \times 0.6}{3.51E-01} \right) \times \left(\frac{300^2}{0.02} \right)^2$$

$$k_F w_F = 99.32 \text{ md-ft}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 2) y las variables conocidas (Tabla 1) en la ecuación 56 se tiene:

$$S_{m1} = \frac{\pi}{124} \left(\frac{\Delta P}{(t^* \Delta P')} - 3.33 \right) \left(\frac{t_{m1}}{\phi \mu c t x_F^2} \frac{k_F w_F}{h \alpha} \right)^{0.3}$$

$$S_{m1} = \frac{\pi}{124} \left(\frac{1.65}{3.51E-01} - 3.33 \right) \left(\frac{3.51E-01 \times 100}{2E-04 \times 0.02 \times 300 \times 0.6 \times 150^2} \right)^{0.3}$$

$$S_{m1} = 0.043$$

○ Flujo Multilineal 2 (m=0.6)

Partiendo de la ecuación desarrollada para el flujo multilineal (m=0.6) (Ecuación 62):

$$k_I = 12.2 \left(\frac{q \mu B}{h (t^* \Delta P')_{m2}} \right)^{2.5} \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{1.5}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 2) y las variables conocidas (Tabla 1) en la ecuación 62:

$$k_I = 12.2 \left(\frac{150 \times 0.02 \times 1.43}{300 \times 7.08} \right)^{2.5} \times \left(\frac{6.8E+01}{2E-04 \times 0.02 \times 150^{1.3} \times 90.3^{0.7} \times 0.6^{0.7}} \right)^{1.5}$$

$$k_I = 0.135$$

Para hallar el daño se remplaza los puntos característicos (Tabla 2) y las variables conocidas (Tabla 1), en la ecuación 70:

$$S_{m2} = \frac{1}{51.9} \left(\frac{\Delta P}{(t^* \Delta P')} - 1.7 \right) \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3}} \frac{k_I}{\alpha^{0.7} Y e^{0.7}} \right)^{0.6}$$

$$S_{m2} = \frac{1}{51.9} \times \left(\frac{13.14}{7.08} - 1.7 \right) \times \left(\frac{6.81E+01 \times 0.13}{2E-04 \times 0.02 \times 90.3^{0.7} \times 0.6^{0.7} \times 150^{1.3}} \right)^{0.6}$$

$$S_{m2} = 0.07$$

- Flujo Pseudoestable (m=1)

Tomando como base la ecuación desarrollada para el flujo pseudoestable (m=1) (Ecuación 89):

$$x_F = 0.045 \frac{qB}{h} \frac{t_{pss}}{\phi c t Y e \alpha (t^* \Delta P')_{pss}}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 2) y las variables conocidas (Tabla 1) en la ecuación 89:

$$x_F = 0.045 \times \frac{150 \times 1.43}{300} \times \frac{8E+04}{2E-04 \times 90.3 \times 0.6 \times 1.5E+03}$$

$$x_F = 158 \text{ ft}$$

- III. Utilizando las ecuaciones de los puntos de intersección entre los regímenes de flujos se hallan los siguientes parámetros:

- Intersección primer flujo multilíneo (m=0.3) y segundo flujo multilíneo (m=0.6)

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla 1) y tiempos de intersección (Tabla 3) en la Ecuación 170, se obtiene:

$$k_F = \frac{0.047 h t_{m1m2i}}{\mu c t \phi w_F} \left(\frac{k_I}{x_F^{0.3}} \right)^2 \left(\frac{Y e^{-0.7}}{\alpha^{0.2}} \right)^2$$

$$k_F = \frac{0.047 \times 300 \times 15}{0.02 \times 2E-04 \times 0.01} \times \left(\frac{0.13}{150^{0.3}} \right)^2 \times \left(\frac{90.3^{-0.7}}{0.6^{0.2}} \right)^2$$

$$k_F = 9914.2 \text{ md}$$

- Intersección segundo flujo multilíneo ($m=0.3$) y flujo pseudoestable ($m=1$)

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla1) y tiempos de intersección (Tabla3) en la Ecuación 180, se obtiene:

$$Y_e = \frac{8.52 \times 10^{-4} \alpha^{0.72}}{x_F^{0.34}} \left(\frac{kt_{m2\text{psi}}}{\phi ct \mu} \right)^{0.68}$$

$$Y_e = \frac{8.52 \times 10^{-4} \times 0.6^{0.72}}{150^{0.34}} \times \left(\frac{0.13 \times 1.6E + 4}{2E - 04 \times 0.02} \right)^{0.68}$$

$$Y_e = 90.7 \text{ ft}$$

- IV. Una vez hallados los parámetros mediante las fórmulas desarrolladas, se procede a hacer la respectiva comparación con los valores reales (Tabla 4).

Tabla 4. Verificación porcentajes de error Prueba 2

Parámetro	Ecuación	Dato real	Dato calculado	Porcentaje de Error(%)
$k_{FWF,md-ft}$	48	100	99.32	0.68
k_I,md	62	0.13	0.139	6.9
$x_{F,ft}$	89	150	158	5.3
$k_{F,md}$	170	10000	9914.2	0.9
$Y_{E,ft}$	180	90.3	90.7	0.44

3.1.2. Prueba 2 ($\alpha=0.9$)

Se simuló una prueba de presión para un yacimiento con $\alpha=0.9$ en la cual se identificaron los regímenes de flujo presentes (Figura 21). Los datos de entrada se muestran en la tabla 5:

Tabla 5.Datos de entrada para prueba 2

PRUEBA 2	
α	0.9
x_e	275
$Y_{e, ft}$	90.3
$x_{F, ft}$	100
$w_{F, ft}$	0.01
h, ft	300
r_w, ft	0.25
k_F, md	9500
$k_{\alpha, md}$	0.13
k_O, md	1E-6
$(\phi c_t)_{\alpha, psi^{-1}}$	2E-4
ϕ_F	0.38
$c_{tF, psi^{-1}}$	1E-4
ϕ_O	0.04
n_F	15
d_F	200
μ, CP	0.3
$q_{F, stb/d}$	150

Mediante los datos generados por el programa *Trilinear model* (Apéndice B) se genera una curva ΔP y $t^*\Delta P'$ (Figura 22); Posterior a esto se identifica los regímenes de flujos presentes y se evidencia que el caso que se presenta es el 3, donde a tiempos tempranos se presenta un flujo multilíneo $m=0.3$, seguido por un segundo flujo multilíneo de $m=0.6$ y por último un flujo pseudoestable. (Figura 21).

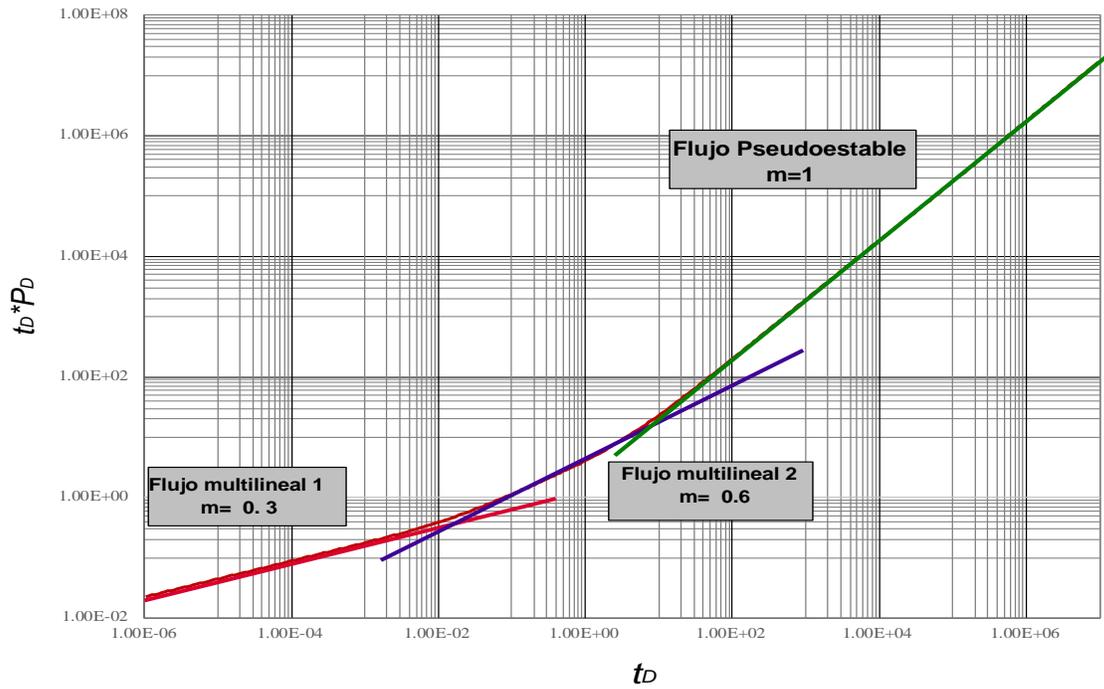


Figura 21. Identificación regímenes de flujo Prueba 2

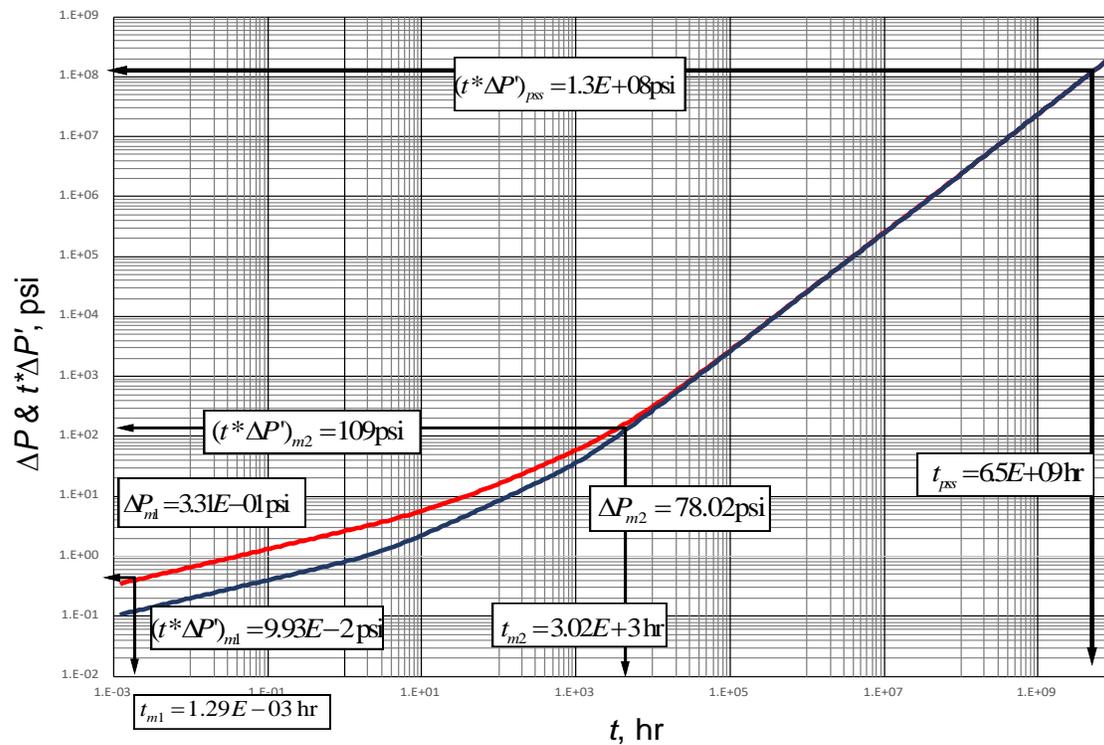


Figura 22. Presión y derivada de presión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 2)

Con el fin de hallar los parámetros del yacimiento mediante las ecuaciones desarrolladas se realiza el siguiente procedimiento:

- I. Se lee en la gráfica lo valores de los puntos característicos (Tabla 6) y sus tiempos de intersección (Tabla 7):

Tabla 6. Puntos característicos prueba 2

Régimen	Tiempo (hr)		Delta de presión (psi)		Derivada de presión (psi)	
Multilineal 1 (m=0.3)	t_{m1}	1.29E-03	ΔP_{m1}	3.31E-01	$(t^*\Delta P')_{m1}$	9.93E-02
Multilineal 2 (m=0.6)	t_{m2}	3.02E+03	ΔP_{m2}	79.13	$(t^*\Delta P')_{m2}$	109.8
Pseudoestable	t_{pss}	6.5E+09	ΔP_{pss}		$(t^*\Delta P')_{pss}$	1.3E+08

Tabla 7. Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 2

Intersección	t intersección (hr)
m1-m2	13
m2-pss	8E+3

- II. Una vez identificados los puntos característicos se procede a hallar los parámetros en cada uno de los distintos flujos:
- III.

- Flujo Multilineal 1 (m=0.3)

Recordando la ecuación desarrollada para el flujo multilineal (m=0.3) (Ecuación 48):

$$k_F w_F = \frac{\pi}{214} \left(\frac{k_I (t^* \Delta P')_{m1}}{qB} \right)^3 \left(\frac{\phi c t x_F^2 \alpha}{t_{m1}} \right) \left(\frac{h^2}{\mu} \right)^2$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 6) y las variables conocidas (Tabla 5) en la ecuación 48:

$$k_F w_F = \frac{\pi}{214} \left(\frac{0.13 \times 9.93E-02}{150 \times 1.43} \right)^3 \times \left(\frac{2E-04 \times 100^2 \times 0.9}{1.29E-03} \right) \times \left(\frac{300^2}{0.02} \right)^2$$

$$k_F w_F = 90.4 \text{ md-ft}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 6) y las variables conocidas (Tabla 5) en la ecuación 56 se tiene:

$$S_{m1} = \frac{\pi}{124} \left(\frac{\Delta P}{(t^* \Delta P')} - 3.33 \right) \left(\frac{t_{m1}}{\phi \mu c t x_F^2} \frac{k_F w_F}{h \alpha} \right)^{0.3}$$

$$S_{m1} = \frac{\pi}{124} \times \left(\frac{3.31E-01}{9.93E-02} - 3.33 \right) \times \left(\frac{1.29E-03 \times 95}{2E-04 \times 0.02 \times 300 \times 0.9 \times 100^2} \right)^{0.3}$$

$$S_{m1} = -4.45E-05$$

○ Flujo Multilineal 2 (m=0.6)

Partiendo de la ecuación desarrollada para el flujo multilineal (m=0.6) (Ecuación 62):

$$k_I = 12.2 \left(\frac{q \mu B}{h (t^* \Delta P')_{m2}} \right)^{2.5} \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3} Y e^{0.7} \alpha^{0.7}} \right)^{1.5}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 6) y las variables conocidas (Tabla 5) en la ecuación 62:

$$k_I = 12.2 \left(\frac{150 \times 0.02 \times 1.43}{300 \times 79.13} \right)^{2.5} \times \left(\frac{3.022E+03}{2E-04 \times 0.02 \times 100^{1.3} \times 90.3^{0.7} \times 0.9^{0.7}} \right)^{1.5}$$

$$k_I = 0.138 \text{ md}$$

Para hallar el daño se reemplaza los puntos característicos (Tabla 6) y las variables conocidas (Tabla 5), en la ecuación 70:

$$S_{m2} = \frac{1}{51.9} \left(\frac{\Delta P}{(t^* \Delta P')} - 1.7 \right) \left(\frac{t_{m2}}{\phi \mu c t x_F^{1.3}} \frac{k_I}{\alpha^{0.7} Y e^{0.7}} \right)^{0.6}$$

$$S_{m2} = \frac{1}{51.9} \left(\frac{109.84}{79.3} - 1.7 \right) \left(\frac{3.022E+03*0.13}{2E-04*0.02*90.3^{0.7}*0.9^{0.7}*100^{1.3}} \right)^{0.6}$$

$$S_{m2} = -1.58$$

o Flujo Pseudoestable (m=1)

Tomando como base la ecuación desarrollada para el flujo pseudoestable (m=1) (Ecuación 89):

$$x_F = 0.045 \frac{qB}{h} \frac{t_{pss}}{\phi c t Y e \alpha (t^* \Delta P')_{pss}}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 6) y las variables conocidas (Tabla 5) en la ecuación 89:

$$x_F = 0.045 \frac{150 \times 1.43}{300} \times \frac{6.5E+09}{2E-04 \times 90.3 \times 0.9 \times 1.3E+08}$$

$$x_F = 98.9 \text{ ft}$$

IV. Utilizando las ecuaciones de los puntos de intersección entre los regímenes de flujos se hallan los siguientes parámetros:

o Intersección primer flujo multilíneo (m=0.3) y segundo flujo multilíneo (m=0.6)

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla 5) y tiempos de intersección (Tabla 7) en la Ecuación 170, se obtiene:

$$k_F = \frac{0.047 h t_{m1m2i}}{\mu c t \phi w_F} \left(\frac{k_I}{x_F^{0.3}} \right)^2 \left(\frac{Y e^{-0.7}}{\alpha^{0.2}} \right)^2$$

$$k_F = \frac{0.047 * 300 * 13}{0.02 * 2E - 04 * 0.01} \left(\frac{0.13}{100^{0.3}} \right)^2 \left(\frac{90.3^{-0.7}}{0.9^{0.2}} \right)^2$$

$$k_F = 9316 \text{ md}$$

- Intersección segundo flujo multilíneo (m=0.3) y flujo pseudoestable (m=1)

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla 5) y tiempos de intersección (Tabla 7) en la Ecuación 180, se obtiene:

$$Y_e = \frac{8.52 \times 10^{-4} \alpha^{0.72}}{x_F^{0.34}} \left(\frac{kt_{m2psi}}{\phi ct \mu} \right)^{0.68}$$

$$Y_e = \frac{8.52 \times 10^{-4} \times 0.9^{0.72}}{100^{0.34}} \left(\frac{0.13 \times 8E + 3}{2E - 04 \times 0.02} \right)^{0.68}$$

$$Y_e = 87.03 \text{ ft}$$

- V. Una vez hallados los parámetros mediante las fórmulas desarrolladas, se procede a hacer la respectiva comparación con los valores reales con el fin de confirmar que la ecuación desarrollada presente un error menor al 10% (Tabla 8).

Tabla 8. Verificación porcentajes de error Prueba 2

Parámetro	Ecuación	Dato real	Dato calculado	Porcentaje de Error (%)
$k_{FWF,md-ft}$	48	95	90.4	1.10
$k_{I,md}$	62	0.13	0.138	6.15
$x_{F,ft}$	89	100	98.9	1.1
$k_{F,md}$	170	9500	9316	1.9
$Y_{E,ft}$	180	90.3	87.3	3.3

3.1.3. Prueba 3 ($\alpha=1$)

Se simuló una prueba de presión para un yacimiento con $\alpha=1$ en la cual se identificaron los regímenes de flujo presentes (Figura 23). Los datos de entrada se muestran en la tabla 9:

Tabla 9.Datos de entrada para prueba 3

PRUEBA 3	
α	1
x_e	275
$Y_{e, ft}$	90.3
$x_{F, ft}$	150
$w_{F, ft}$	0.01
h, ft	300
r_w, ft	0.25
k_F, md	10000
$k_{\alpha, md}$	0.13
k_O, md	1E-6
$(\phi c_t)_{\alpha, psi^{-1}}$	2E-4
ϕ_F	0.38
$c_{tF, psi^{-1}}$	1E-4
ϕ_O	0.04
n_F	15
d_F	200
μ, CP	0.3
$Q_{F, stb/d}$	150

Mediante los datos generados por el programa *Trilinear model* (Apéndice B) se genera una curva ΔP y $t^*\Delta P'$ (Figura 24); Posterior a esto se identifica los regímenes de flujos presentes y se evidencia que el caso que se presenta es el 4, donde a tiempos tempranos se presenta un flujo Bilineal $m=0.25$, seguido por un segundo flujo lineal de $m=0.5$ y por último un flujo pseudoestable. (Figura 23).

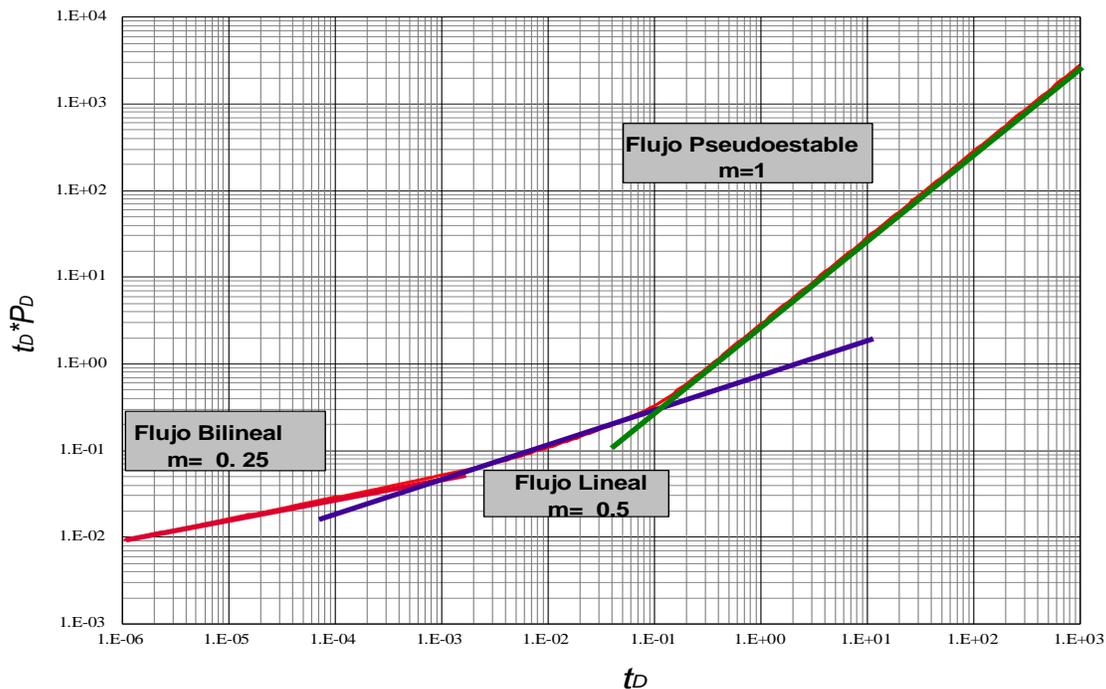


Figura 23. Identificación regímenes de flujo Prueba 3

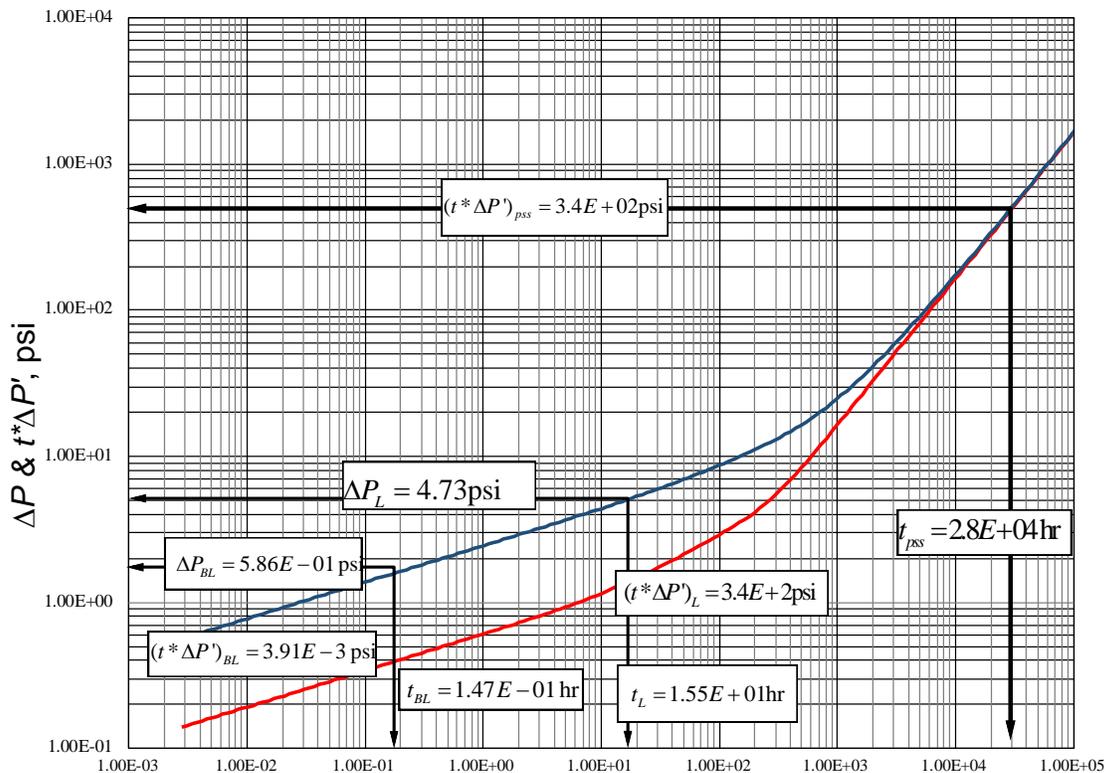


Figura 24. Presión y derivada de presión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 3)

Con el fin de hallar los parámetros del yacimiento mediante las ecuaciones desarrolladas se realiza el siguiente procedimiento:

- I. Se lee en la gráfica los valores de los puntos característicos (Tabla 10) y sus tiempos de intersección (Tabla 11):

Tabla 10. Puntos característicos prueba 3

Régimen	Tiempo (hr)		Delta de presión (psi)		Derivada de presión (psi)	
Bilineal (m=0.25)	t_{BL}	1.47E-01	ΔP_{BL}	5.86E-01	$(t^* \Delta P')_{BL}$	3.91E-03
Lineal (m=0.5)	t_L	1.55E+01	ΔP_L	4.73	$(t^* \Delta P')_L$	1.28
Pseudoestable	t_{pss}	2.8E+04	ΔP_{pss}		$(t^* \Delta P')_{pss}$	3.4E+02

Tabla 11. Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 3

Intersección	t intersección (hr)
BL-L	6.5
L-Pss	700

- II. Una vez identificados los puntos característicos se procede a hallar los parámetros en cada uno de los distintos flujos:

- Flujo Bilineal (m=0.25)

Recordando la ecuación desarrollada para el flujo Bilineal (m=0.25) (Ecuación 34):

$$k_F w_F = \frac{\phi c t x_F^2 \alpha y_E}{44 \mu^3 t_{BL}} \left(\frac{k_I h (t^* \Delta P')_{BL}}{qB} \right)^4$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 10) y las variables conocidas (Tabla 9) en la ecuación 34:

$$k_F w_F = \frac{2E-04 \times 150^2 \times 90.3}{69 \times 0.02^3 \times 3.91E-3} \left(\frac{0.13 \times 300 \times 1.47E-01}{150 \times 1.43} \right)^4$$

$$k_F w_F = 97 \text{ md} - \text{ft}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 10) y las variables conocidas (Tabla 9) en la ecuación 42 se tiene:

$$S_{BL} = \frac{\pi}{154} \left(\frac{\Delta P}{(t^* \Delta P')} - 4 \right) \left(\frac{t_{BL}}{\phi \mu c t x_F^2} \frac{k_F w_F \alpha}{y_E} \right)^{0.25}$$

$$S_{BL} = \frac{\pi}{154} \times \left(\frac{5.86E-01}{1.46E-03} - 4 \right) \times \left(\frac{3.91E-03 \times 100}{2E-04 \times 0.02 \times 90.3 \times 150^2} \right)^{0.25}$$

$$S_{BL} = 2.12$$

- Flujo Lineal (m=0.5)

Partiendo de la ecuación desarrollada para el flujo Lineal (m=0.5) (Ecuación 20):

$$k_I = 2\pi \frac{t_L \mu}{\phi c t} \left(\frac{qB}{h(t^* \Delta P')_L x_F \alpha} \right)^2$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 10) y las variables conocidas (Tabla 9) en la ecuación 20:

$$k_I = 2\pi \times \frac{1.55E+01 \times 0.02}{2E-04} \left(\frac{150 \times 1.43}{300 \times 1.28 \times 150} \right)^2$$

$$k_I = 0.135 \text{ md}$$

Para hallar el daño se reemplaza los puntos característicos (Tabla 10) y las variables conocidas (Tabla 9), en la ecuación 70:

$$S_L = \frac{\pi}{179\alpha} \left(\frac{\Delta P}{(t^* \Delta P')} - 2 \right) \sqrt{\frac{k_I t_L}{\phi \mu c t x_F^2}}$$

$$S_L = \frac{\pi}{179} \times \left(\frac{4.73}{1.28} - 2 \right) \times \sqrt{\frac{0.13 \times 1.55E + 01}{2E - 04 \times 0.02 \times 150^2}}$$

$$S_L = 0.14$$

- Flujo Pseudoestable (m=1)

Tomando como base la ecuación desarrollada para el flujo pseudoestable (m=1) (Ecuación 89):

$$x_F = 0.045 \frac{qB}{h} \frac{t_{pss}}{\phi c t Y e \alpha (t^* \Delta P')_{pss}}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 10) y las variables conocidas (Tabla 9) en la ecuación 89:

$$x_F = 0.045 \frac{150 \times 1.43}{300} \times \frac{2.8E + 04}{2E - 04 \times 90.3 \times 3.4E + 02}$$

$$x_F = 146.7 \text{ ft}$$

III. Utilizando las ecuaciones de los puntos de intersección entre los regímenes de flujos se hallan los siguientes parámetros:

- Intersección primer flujo Bilineal y segundo flujo Lineal

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla 9) y tiempos de intersección (Tabla 11) en la Ecuación 188, se obtiene:

$$k_F = 0.91 \frac{k_I^2 y_e t_{BLLi}}{\alpha^5 \phi c t \mu w_F x_F^2}$$

$$k_F = 0.91 \frac{0.13^2 \times 90.3 \times 6.5}{2E - 4 \times 0.02 \times 0.01 \times 150^2}$$

$$k_F = 10033 \text{ md}$$

- Intersección segundo flujo Lineal (m=0.5) y flujo pseudoestable (m=1)

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla 9) y tiempos de intersección (Tabla 11) en la Ecuación 168, se obtiene:

$$Y_e = 1.9 \times 10^{-2} \left(\frac{k_I t_{Lpssi}}{\phi c t \mu} \right)^{0.5}$$

$$Y_e = 1.9 \times 10^{-2} \left(\frac{0.13 \times 700}{2E - 04 \times 0.02} \right)^{0.5}$$

$$Y_e = 90.6 \text{ ft}$$

IV. Una vez hallados los parámetros mediante las fórmulas desarrolladas, se procede a hacer la respectiva comparación con los valores reales con el fin de confirmar que la ecuación desarrollada presente un error menor al 10% (Tabla 12).

Tabla 12. Verificación porcentajes de error Prueba 3

Parámetro	Ecuación	Dato real	Dato calculado	Porcentaje de Error (%)
$k_{FWF,md-ft}$	34	100	97	3
$k_{I,md}$	20	0.13	0.135	3.84
$x_{F,ft}$	89	150	146.7	2.2
$k_{F,md}$	188	10000	10033	0.33
$Y_{E,ft}$	168	90.3	90.6	0.3

3.2. Ejercicios de Aplicación para yacimientos de Gas

3.2.1. Prueba 4 ($\alpha=0.2$)

Se simuló una prueba de presión para un yacimiento de gas con $\alpha=0.2$ en la cual se identificaron los regímenes de flujo presentes (Figura 25). Los datos de entrada se muestran en la tabla 13:

Tabla 13.Datos de entrada para prueba 4

PRUEBA 4	
α	0.2
x_e	275
$Y_{e, ft}$	50
x_F, ft	100
w_F, ft	0.01
h, ft	250
r_w, ft	0.25
k_F, md	3000
$k_{\alpha, md}$	0.13
k_O, md	1E-6
$(\phi C_t)_{\alpha, psi^{-1}}$	2E-4
ϕ_F	0.38
$C_{tF, psi^{-1}}$	1E-5
ϕ_O	4E-3
n_F	200
d_F	100
μ, CP	0.02
$q_F, Mscf/d$	100
T, R°	600
SG	0.05

Mediante los datos generados por el programa *Trilinear model* (Apéndice B) se genera una curva $\Delta m(P)$ y $t^* \Delta m(P)'$ (Figura 26); Posterior a esto se identifica los regímenes de flujos presentes y se evidencia que el caso que se presenta es el 1, donde a tiempos tempranos se presenta un flujo lineal $m=0.5$ seguido de un flujo pseudoestable. (Figura 25).

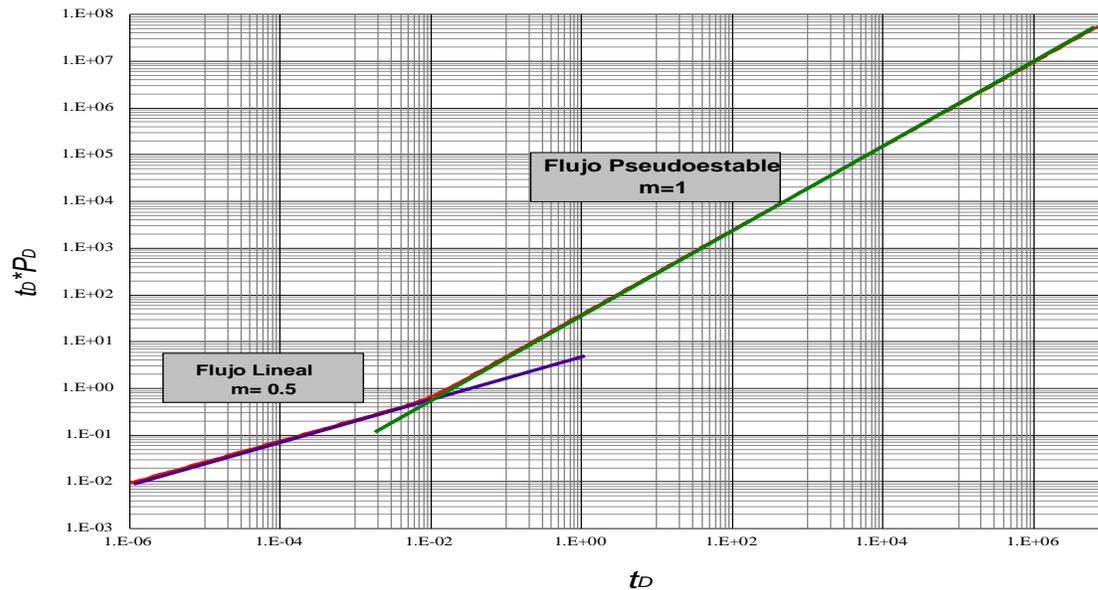


Figura 25. Identificación regímenes de flujo prueba 4

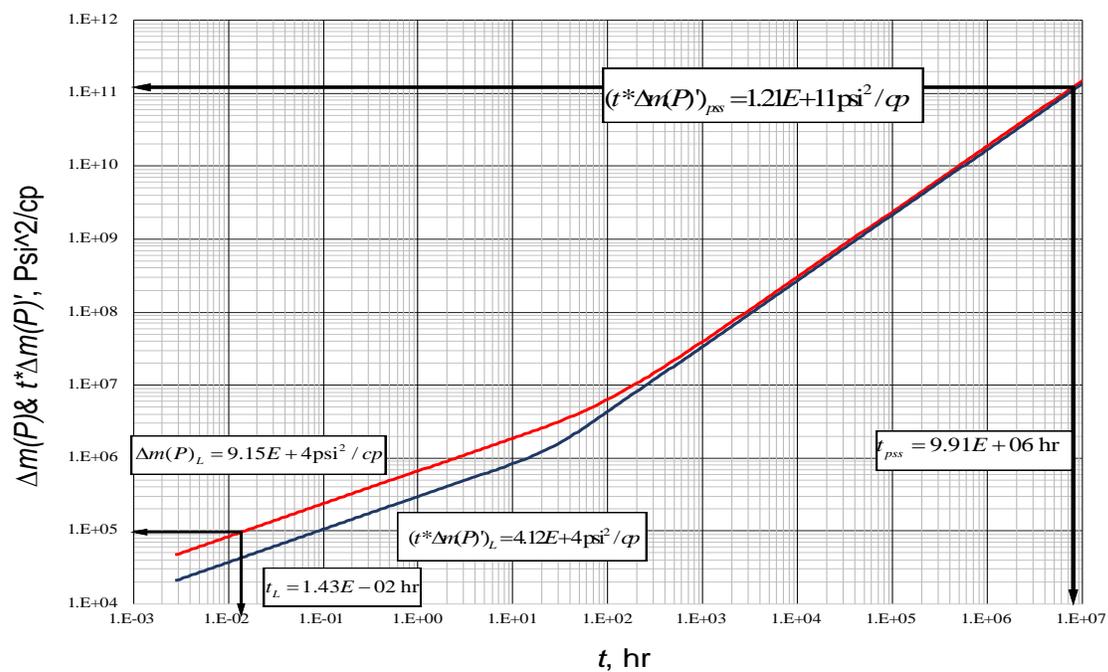


Figura 26. Pseudopresión y derivada de pseudopresión vs. tiempo en un gráfico log-log (Prueba 4)

Con el fin de hallar los parámetros del yacimiento mediante las ecuaciones desarrolladas se realiza el siguiente procedimiento:

- I. Se lee en la gráfica los valores de los puntos característicos (Tabla 14) y sus tiempos de intersección (Tabla 15):

Tabla 14. Puntos característicos prueba 4

Régimen	Tiempo (hr)		Delta de presión (psi)		Derivada de presión (psi)	
Lineal (m=0.5)	t_L	1.43E-02	$\Delta m(P)_L$	9.15E+04	$(t*\Delta m(P)')_L$	4.12E+04
Pseudoestable	t_{pss}	9.91E+6	$\Delta m(P)_{pss}$		$(t*\Delta m(P)')_{pss}$	1.21E+11

Tabla 15. Tiempos de intersección entre regímenes de flujo, Prueba 4

Intersección	t intersección (hr)
L-Pss	200

- II. Una vez identificados los puntos característicos se procede a hallar los parámetros en cada uno de los distintos flujos:

- Flujo Lineal (m=0.5)

Partiendo de la ecuación desarrollada para el flujo multilínea (m=0.5) (Ecuación 95):

$$k_I = 622.4 \left(\frac{q_{F,sc} T}{h(t*\Delta m(P)')_L} \right)^2 \left(\frac{t_L}{\phi c t \mu x_F^2 \alpha^2} \right)$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 14) y las variables conocidas (Tabla 13) en la ecuación 95:

$$k_I = 622.4 \left(\frac{100 \times 600}{300 \times 4.12E+04} \right)^2 \left(\frac{1.43E-02}{2E-04 \times 100^2 \times 0.2^2 \times 0.02} \right)$$

$$k_I = 0.131 \text{ md}$$

Para hallar el daño se reemplaza los puntos característicos (Tabla 14) y las variables conocidas (Tabla 13), en la ecuación 103:

$$S_L = \frac{\pi}{179\alpha} \left(\frac{\Delta m(P)_L}{(t^* m(\Delta P))_L} - 2 \right) \sqrt{\frac{k_f t_L}{\phi \mu c t x_F^2}}$$

$$S_L = \frac{\pi}{179} \times \left(\frac{9.15E+4}{4.12E+4} - 2 \right) \times \sqrt{\frac{0.13 \times 1.43E-03}{2E-04 \times 0.02 \times 100^2}}$$

$$S_L = 1.8E-5$$

○ Flujo Pseudoestable (m=1)

Tomando como base la ecuación desarrollada para el flujo pseudoestable (m=1) (Ecuación 164):

$$x_F = 0.45 \frac{qT}{h} \frac{t_{pss}}{\phi \mu c Y e \alpha (t^* \Delta m(P))_{pss}}$$

Remplazando los puntos característicos (Tabla 14) y las variables conocidas (Tabla 13) en la ecuación 89:

$$x_F = 0.45 \times \frac{100 \times 600}{300} \times \frac{9.91E+06}{2E-04 \times 50 \times 0.02 \times 0.2 \times 1.21E+11}$$

$$x_F = 100.8 \text{ ft}$$

III. Utilizando las ecuaciones de los puntos de intersección entre los regímenes de flujos se hallan los siguientes parámetros:

- Intersección Flujo Lineal (m=0.5) y flujo pseudoestable (m=1)

Remplazando los parámetros conocidos (Tabla 13) y tiempos de intersección (Tabla 15) en la Ecuación 168, se obtiene:

$$Y_e = 1.9 \times 10^{-2} \left(\frac{k_I t_{L_{pssi}}}{\phi c t \mu} \right)^{0.5}$$

$$Y_e = 1.9 \times 10^{-2} \times \left(\frac{0.13 \times 700}{2E-04 \times 0.02} \right)^{0.5}$$

$$Y_e = 48.4 \text{ ft}$$

IV. Una vez hallados los parámetros mediante las fórmulas desarrolladas, se procede a hacer la respectiva comparación con los valores reales con el fin de confirmar que la ecuación desarrollada presente un error menor al 10% (Tabla 12).

Tabla 16. Verificación porcentajes de error Prueba 4

Parámetro	Ecuación	Dato real	Dato calculado	Porcentaje de Error (%)
$k_{I,md}$	95	0.13	0.131	0.76
$x_{F,ft}$	164	100	100.8	0.8
$Y_{E,ft}$	168	50	48.4	3.2

CONCLUSIONES

Mediante el modelo trilineal de difusión anómala y la aplicación de la metodología TDS se desarrollaron ecuaciones para la caracterización de los flujos presentes tales como permeabilidad del yacimiento interno o fractura natural (k_I), tamaño del yacimiento en dirección y (y_e), conductividad de la fractura hidráulica (k_{FWF}), longitud media de fractura hidráulica (x_F) y permeabilidad de la fractura (k_F), estos parámetros fueron hallados posteriormente mediante la aplicación de ejercicios sintéticos comprobando que en todos los casos se presentan entre un margen de error tolerable, cabe recalcar que los ejercicios en los cuales se ingresaban valores de α posicionados en los extremos de los rangos determinados en cada uno de los casos, presentan mayor error que en los datos localizados en el intermedio del intervalo definido.

En las ecuaciones anteriormente mencionadas se tiene en cuenta la complejidad de la configuración del yacimiento y la heterogeneidad del flujo con el ingreso del parámetro α , identificada como la variable más influyente en el comportamiento de la derivada de presión y en orden de los flujos. Valores de α cercanos a cero indican poco aporte de la matriz con altas interrupciones de flujo, lo que causa que la respuesta de presión sea dominada por la fractura y se presente solo dos regímenes de flujo (Caso 1), valores intermedios de α ($0.3 \geq \alpha \leq 0.9$) no indican preferencia de flujo por ningún de los elementos de sistema, en estos casos se presentan tres regímenes de flujo por la interacción entre matriz y fracturas (Caso 2 y Caso 3), valores de α mayores o iguales a 1 indican un sistema homogéneo y densamente fracturado lo que arrojan un caso (Caso 4) con un comportamiento parecido a los obtenidos por el modelo trilineal de dual porosidad, la presencia de estos casos con la variación de los flujos demuestra la versatilidad que presenta el modelo para simular diferentes escenarios con formas de yacimiento complejas y flujos de velocidad heterogénea, haciendo posible una predicción más real, sin necesidad de estudios extensos de caracterización y rugosidad de cálculos.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Hussainy, R., & Humphreys, N. (1996). Reservoir management: principles and practices. *Journal of Petroleum Technology*, 48(12), 1-129.
- Araujo, H., Lacentre, P., Zapata, T., Del Monte, A., Dzelalija, F., Gilman, J., ... Ozkan, E. (2004, January 1). Dynamic Behavior of Discrete Fracture Network (DFN) Models. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/91940-MS
- Bourdarot, G., & Balvet, B. B. (1998). Well testing: Interpretation methods. Paris, France: Editions Technip.
- Brown, M. L., Ozkan, E., Raghavan, R. S., & Kazemi, H. (2009, January 1). Practical Solutions for Pressure Transient Responses of Fractured Horizontal Wells in Unconventional Reservoirs. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/125043-MS
- Chang, J., & Yortsos, Y. C. (1990, March 1). Pressure Transient Analysis of Fractal Reservoirs. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/18170-PA
- Escobar, M. F. (2009). Análisis moderno de pruebas de presión. Editorial Universidad Surcolombiana.
- Kazemi, H. (1969). Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution. *Society of petroleum engineers Journal*, 9(04), 451-462.
- Kuchuk, F., & Biryukov, D. (2015). Pressure-transient tests and flow regimes in fractured reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 18(02), 187-204.
- Mandelbrot, B. B. (1982). The fractal Geometry of. *Nature*, 394-397
- Ozkan, E., Brown, M. L., Raghavan, R. S., & Kazemi, H. (2009, January 1). Comparison of Fractured Horizontal-Well Performance in Conventional and Unconventional Reservoirs. Society of Petroleum Engineers.
- Ozcan, O., Sarak, H., Ozkan, E., & Raghavan, R. S. (2014, October 27). A Trilinear Flow Model for a Fractured Horizontal Well in a Fractal Unconventional Reservoir. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/170971-MS
- Poon, D. (1995, January 1). Transient Pressure Analysis of Fractal Reservoirs. *Petroleum Society of Canada*. doi:10.2118/95-34

Raghavan, R. S., Chen, C.-C., & Agarwal, B. (1997, September 1). An Analysis of Horizontal Wells Intercepted by Multiple Fractures. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/27652-PA

Raghavan, R., Chen, C.-C., & Agarwal, B. (2019, April 22). Evaluation of fractured rocks through anomalous diffusion. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/195305-PA

Van Everdingen, A. F., & Hurst, W. (1949). The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Journal of Petroleum Technology*, 1(12), 305-324.

Warren, J. E., & Root, P. J. (1963, September 1). The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/426-PA

ANEXOS

APÉNDICE A: Solución analítica del modelo trilineal de difusión anómala

La solución para el reservorio externo en el modelo trilineal de difusión anómala es la misma para el modelo trilineal de dual-porosidad, modelo que se ha mencionado en trabajos anteriores por lo tanto no será repetida su demostración, en cuanto la solución al flujo lineal del yacimiento interno será presentada a continuación:

Partiendo de la ecuación temporal-fraccionaria de difusión anómala:

$$\frac{\partial p_{ID}}{\partial x_D} + \frac{\partial^2 p_{ID}}{\partial y_D^2} = \left(\frac{x_F^2}{n_\alpha} \right)^{1-\alpha} \frac{\partial^\alpha p_{ID}}{\partial t_D^\alpha} \quad (\text{A.1})$$

Se introduce las condiciones de flujo en la frontera del yacimiento interno y externo

$$\frac{\partial^{1-\alpha}}{\partial t_D^{1-\alpha}} \left(\frac{\partial p_{ID}}{\partial x_D} \right)_{x_D=1} = \frac{\lambda_O}{\lambda_\alpha} \left(\frac{x_F^2}{n_\alpha} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{\partial^\alpha p_{OD}}{\partial x_D} \right)_{x_D=1} \quad (\text{A.2})$$

Aplicando la transformada de Laplace en las Ecuaciones A.1 y A.2 respectivamente:

$$\frac{d\tilde{p}_{ID}}{dx_D} + \frac{d^2 \tilde{p}_{ID}}{dy_D^2} = \left(\frac{x_F^2}{n_\alpha} \right)^{1-\alpha} s^\alpha \tilde{p}_{ID} \quad (\text{A.3})$$

Y

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}_{ID}}{\partial x_D} \right)_{x_D=1} = s^{-(1-\alpha)} \frac{\lambda_O}{\lambda_\alpha} \left(\frac{x_F^2}{n_\alpha} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{\partial p_{OD}}{\partial x_D} \right)_{x_D=1} \quad (\text{A.4})$$

Teniendo en cuenta la siguiente Ecuación A.5

$$\left(\frac{\partial p_{OD}}{\partial x_D} \right)_{x_D=1} = -\beta_O \tilde{p}_{ID} \quad (\text{A.5})$$

Sustituyendo la Ecuación A.4 y la Ecuación A.5 en la Ecuación A.3

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}_{ID}}{\partial y_D^2} - \alpha_o \tilde{p}_{ID} = 0 \quad (\text{A.6})$$

Donde se asume para el flujo lineal que $(\tilde{p}_{ID})_{x_D} = 1 = p_{ID}$

$$\alpha_o = \left(\frac{x_F^2}{n_\alpha} \right)^{1-\alpha} s^\alpha \left[1 + \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_\alpha} s^1 \beta_o \right) \right] \quad (\text{A.7})$$

Las soluciones para las condiciones internas y externas de frontera para el yacimiento interno son dadas respectivamente por las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}_{ID}}{\partial y_D} \right)_{y_D=y_{eD}} = 0 \quad (\text{A.8})$$

Y

$$(\tilde{p}_{ID})_{y_D=w_{D/2}} = (\tilde{p}_{FD})_{y_D=w_{D/2}} \quad (\text{A.9})$$

Luego, la solución de las condiciones de fronteras presentadas en las Ecuaciones A.6, A.7 y A.8 es:

$$(\tilde{p}_{ID})_{y_D=w_{D/2}} = (\tilde{p}_{FD})_{y_D=w_{D/2}} \frac{\cosh \left[\sqrt{\alpha_o} (y_{eD} - y_D) \right]}{\cosh \left[\sqrt{\alpha_o} (y_{eD} - w_D / 2) \right]} \quad (\text{A.10})$$

Para completar la solución del modelo t_{DA} , la solución del yacimiento interno (A.10) debe acoplarse con la solución de la fractura hidráulica. La ecuación de difusividad de la fractura hidráulica es dada, en términos adimensionales, por:

$$\left(\frac{\partial^2 p_{FD}}{\partial x_D^2} \right) + \frac{2}{w_D} \left(\frac{\partial p_{FD}}{\partial y_D} \right)_{y_D=w_{D/2}} = \frac{1}{\eta_{FD}} \left(\frac{\partial p_{FD}}{\partial t_D} \right) \quad (\text{A.11})$$

Usando la condición de continuidad de flujo en las condiciones de frontera de la fractura hidráulica y el yacimiento interno:

$$\left(\frac{\partial p_{FD}}{\partial y_D} \right)_{y_D=w_D/2} = \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_F} \left(\frac{n_\alpha}{x_F^2} \right)^{1-\alpha} \frac{\partial^{1-\alpha}}{\partial t_D^{1-\alpha}} \left(\frac{\partial p_{ID}}{\partial y_D} \right)_{y_D=w_D/2} \quad (\text{A.12})$$

Aplicando la transformada de Laplace en la Ecuación A.11

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}_{FD}}{\partial x_D^2} - \alpha_F \tilde{p}_{FD} = 0 \quad (\text{A.13})$$

Sustituyendo la Ecuación A.10 en A.13

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}_{ID}}{\partial y_D} \right)_{y_D=w_D/2} = -\beta_F \tilde{p}_{FD} \quad (\text{A.14})$$

Asumiendo que el flujo linear en la fractura hidráulica está dado por $p_{FD} = (p_{FD})_{y_D = w_D/2}$

$$\beta_F = \sqrt{\alpha_O} \tanh \sqrt{\alpha_O} (y_{eD} - w_D / 2) \quad (\text{A.15})$$

Y

$$\alpha_F = \frac{2}{w_D} \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_F} \left(\frac{n_\alpha}{x_F^2} \right)^{1-\alpha} s^{(1-\alpha)} \beta_F + \frac{1}{\eta_{FD}} s \quad (\text{A.16})$$

La condición externa de frontera de la fractura hidráulica está dada por:

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}_{FD}}{\partial x_D} \right)_{x_D=1} = 0 \quad (\text{A.17})$$

El flujo constante que pasa de la fractura a pozo horizontal cumple con la siguiente condición de frontera interna:

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}_{FD}}{\partial x_D} \right)_{x_D=0} = - \frac{\pi}{sC_{FD}} \quad (\text{A.18})$$

La solución a las condiciones de flujo especificada en las Ecuaciones A.13,A.17 Y A.18, está dada por:

$$p_{FD} = \frac{\pi}{sC_{FD}\sqrt{\alpha_F}} \frac{\cosh\left[\sqrt{\alpha_F}(1-x_D)\right]}{\sinh\left[\sqrt{\alpha_O}\right]} \quad (\text{A.19})$$

Asumiendo que la presión entre la fractura hidráulica y el pozo es la misma que la interface entre la fractura hidráulica y el pozo ($x_D = 0$), la presión del pozo se obtiene:

$$\tilde{p}_{WD} = (\tilde{p}_{FD})_{x_D=0} = \frac{\pi}{sC_{FD}\sqrt{\alpha_F} \tanh(\sqrt{\alpha_F})} \quad (\text{A.20})$$

APÉNDICE B: Data de pruebas de presión utilizadas en las pruebas de verificación.

1.Data de presión para yacimiento de aceite (Prueba1)

t_D	P_D	$t_D * P_D$	t,hr	$\Delta m(P), \text{psi}^2/\text{cp}$	$t * \Delta m(P)', \text{psi}^2/\text{cp}$	$\Delta P, \text{psi}$	$t * \Delta P', \text{psi}$
1.03E-03	2.18E-01	7.68E-02	2.71E+00	4.77E+05	1.68E+05	3.39E+00	1.19E+00
1.15E-03	2.26E-01	7.99E-02	3.01E+00	4.95E+05	1.75E+05	3.52E+00	1.24E+00
1.28E-03	2.35E-01	8.32E-02	3.36E+00	5.15E+05	1.82E+05	3.65E+00	1.29E+00
1.42E-03	2.44E-01	8.68E-02	3.74E+00	5.35E+05	1.90E+05	3.79E+00	1.35E+00
5.17E-03	3.96E-01	1.61E-01	1.36E+01	8.65E+05	3.51E+05	6.14E+00	2.49E+00
5.75E-03	4.13E-01	1.71E-01	1.51E+01	9.04E+05	3.74E+05	6.42E+00	2.66E+00
6.41E-03	4.32E-01	1.82E-01	1.68E+01	9.46E+05	3.99E+05	6.72E+00	2.83E+00
7.13E-03	4.53E-01	1.95E-01	1.87E+01	9.90E+05	4.26E+05	7.03E+00	3.02E+00
7.94E-03	4.74E-01	2.08E-01	2.09E+01	1.04E+06	4.55E+05	7.37E+00	3.23E+00
8.84E-03	4.97E-01	2.23E-01	2.32E+01	1.09E+06	4.87E+05	7.73E+00	3.46E+00
9.85E-03	5.22E-01	2.38E-01	2.59E+01	1.14E+06	5.22E+05	8.11E+00	3.70E+00
1.10E-02	5.49E-01	2.56E-01	2.88E+01	1.20E+06	5.59E+05	8.52E+00	3.97E+00
1.22E-02	5.77E-01	2.74E-01	3.21E+01	1.26E+06	6.00E+05	8.97E+00	4.26E+00
1.36E-02	6.08E-01	2.95E-01	3.57E+01	1.33E+06	6.44E+05	9.44E+00	4.58E+00
4.43E-02	1.14E+00	6.62E-01	1.16E+02	2.50E+06	1.45E+06	1.78E+01	1.03E+01
4.94E-02	1.22E+00	7.13E-01	1.30E+02	2.66E+06	1.56E+06	1.89E+01	1.11E+01
5.50E-02	1.30E+00	7.69E-01	1.44E+02	2.84E+06	1.68E+06	2.01E+01	1.19E+01
6.12E-02	1.38E+00	8.28E-01	1.61E+02	3.02E+06	1.81E+06	2.15E+01	1.29E+01
6.81E-02	1.47E+00	8.93E-01	1.79E+02	3.23E+06	1.95E+06	2.29E+01	1.39E+01
7.59E-02	1.57E+00	9.62E-01	1.99E+02	3.44E+06	2.11E+06	2.45E+01	1.49E+01
8.45E-02	1.68E+00	1.04E+00	2.22E+02	3.68E+06	2.27E+06	2.61E+01	1.61E+01
9.40E-02	1.80E+00	1.12E+00	2.47E+02	3.93E+06	2.45E+06	2.79E+01	1.74E+01
1.05E-01	1.92E+00	1.21E+00	2.75E+02	4.21E+06	2.64E+06	2.99E+01	1.87E+01
1.17E-01	2.06E+00	1.30E+00	3.06E+02	4.50E+06	2.84E+06	3.20E+01	2.02E+01
1.30E-01	2.20E+00	1.40E+00	3.41E+02	4.82E+06	3.06E+06	3.42E+01	2.18E+01
1.45E-01	2.36E+00	1.51E+00	3.79E+02	5.16E+06	3.30E+06	3.66E+01	2.34E+01
1.61E-01	2.53E+00	1.63E+00	4.23E+02	5.53E+06	3.56E+06	3.93E+01	2.53E+01
1.79E-01	2.71E+00	1.75E+00	4.70E+02	5.93E+06	3.84E+06	4.21E+01	2.73E+01
2.00E-01	2.90E+00	1.89E+00	5.24E+02	6.35E+06	4.14E+06	4.51E+01	2.94E+01
2.22E-01	3.12E+00	2.04E+00	5.83E+02	6.82E+06	4.46E+06	4.84E+01	3.17E+01
2.47E-01	3.34E+00	2.20E+00	6.49E+02	7.31E+06	4.81E+06	5.19E+01	3.41E+01
2.75E-01	3.59E+00	2.37E+00	7.23E+02	7.85E+06	5.18E+06	5.57E+01	3.68E+01
5.01E+00	2.67E+01	1.97E+01	1.32E+04	5.85E+07	4.30E+07	4.15E+02	3.05E+02
5.58E+00	2.89E+01	2.14E+01	1.47E+04	6.33E+07	4.69E+07	4.49E+02	3.33E+02

6.21E+00	3.13E+01	2.34E+01	1.63E+04	6.85E+07	5.11E+07	4.86E+02	3.63E+02
6.92E+00	3.39E+01	2.55E+01	1.82E+04	7.43E+07	5.58E+07	5.27E+02	3.96E+02
7.70E+00	3.68E+01	2.79E+01	2.02E+04	8.05E+07	6.10E+07	5.72E+02	4.33E+02
8.58E+00	3.99E+01	3.05E+01	2.25E+04	8.74E+07	6.67E+07	6.20E+02	4.73E+02
9.55E+00	4.34E+01	3.34E+01	2.51E+04	9.48E+07	7.30E+07	6.73E+02	5.18E+02
1.06E+01	4.71E+01	3.65E+01	2.79E+04	1.03E+08	7.99E+07	7.32E+02	5.68E+02
1.18E+01	5.12E+01	4.00E+01	3.11E+04	1.12E+08	8.76E+07	7.95E+02	6.22E+02
1.32E+01	5.57E+01	4.39E+01	3.46E+04	1.22E+08	9.61E+07	8.65E+02	6.82E+02
1.47E+01	6.06E+01	4.82E+01	3.85E+04	1.33E+08	1.06E+08	9.42E+02	7.49E+02
5.33E+01	1.78E+02	1.55E+02	1.40E+05	3.88E+08	3.39E+08	2.76E+03	2.40E+03
5.93E+01	1.95E+02	1.71E+02	1.56E+05	4.27E+08	3.75E+08	3.03E+03	2.66E+03
6.61E+01	2.14E+02	1.89E+02	1.73E+05	4.69E+08	4.14E+08	3.33E+03	2.94E+03
7.36E+01	2.36E+02	2.09E+02	1.93E+05	5.16E+08	4.58E+08	3.66E+03	3.25E+03
8.19E+01	2.59E+02	2.32E+02	2.15E+05	5.67E+08	5.07E+08	4.03E+03	3.60E+03
9.12E+01	2.85E+02	2.57E+02	2.39E+05	6.25E+08	5.62E+08	4.43E+03	3.99E+03
1.02E+02	3.14E+02	2.84E+02	2.67E+05	6.88E+08	6.22E+08	4.88E+03	4.41E+03
1.13E+02	3.47E+02	3.15E+02	2.97E+05	7.58E+08	6.89E+08	5.38E+03	4.89E+03
3.69E+02	1.04E+03	9.84E+02	9.68E+05	2.27E+09	2.15E+09	1.61E+04	1.53E+04
7.03E+02	1.92E+03	1.84E+03	1.84E+06	4.20E+09	4.03E+09	2.98E+04	2.86E+04
7.82E+02	2.13E+03	2.05E+03	2.05E+06	4.65E+09	4.48E+09	3.30E+04	3.18E+04
8.71E+02	2.36E+03	2.27E+03	2.29E+06	5.16E+09	4.97E+09	3.66E+04	3.53E+04
9.70E+02	2.62E+03	2.52E+03	2.55E+06	5.72E+09	5.52E+09	4.06E+04	3.92E+04
1.08E+03	2.90E+03	2.80E+03	2.83E+06	6.35E+09	6.13E+09	4.51E+04	4.35E+04
3.16E+03	8.22E+03	8.01E+03	8.30E+06	1.80E+10	1.75E+10	1.28E+05	1.24E+05
3.52E+03	9.12E+03	8.90E+03	9.24E+06	2.00E+10	1.95E+10	1.42E+05	1.38E+05
8.32E+03	2.11E+04	2.08E+04	2.18E+07	4.62E+10	4.55E+10	3.28E+05	3.23E+05
9.26E+03	2.35E+04	2.32E+04	2.43E+07	5.14E+10	5.07E+10	3.65E+05	3.60E+05
1.03E+04	2.61E+04	2.58E+04	2.71E+07	5.71E+10	5.64E+10	4.06E+05	4.00E+05
1.15E+04	2.90E+04	2.87E+04	3.01E+07	6.35E+10	6.27E+10	4.51E+05	4.45E+05
1.28E+04	3.23E+04	3.19E+04	3.36E+07	7.06E+10	6.98E+10	5.01E+05	4.96E+05
1.42E+04	3.59E+04	3.55E+04	3.74E+07	7.85E+10	7.77E+10	5.57E+05	5.52E+05
1.58E+04	3.99E+04	3.95E+04	4.16E+07	8.73E+10	8.65E+10	6.20E+05	6.14E+05
1.76E+04	4.44E+04	4.40E+04	4.63E+07	9.71E+10	9.63E+10	6.89E+05	6.84E+05
1.96E+04	4.94E+04	4.90E+04	5.16E+07	1.08E+11	1.07E+11	7.67E+05	7.61E+05
2.19E+04	5.49E+04	5.45E+04	5.74E+07	1.20E+11	1.19E+11	8.53E+05	8.47E+05
2.44E+04	6.11E+04	6.07E+04	6.40E+07	1.34E+11	1.33E+11	9.49E+05	9.43E+05
2.71E+04	6.80E+04	6.76E+04	7.12E+07	1.49E+11	1.48E+11	1.06E+06	1.05E+06
1.10E+05	2.73E+05	2.73E+05	2.88E+08	5.97E+11	5.97E+11	4.24E+06	4.24E+06

1.22E+05	3.04E+05	3.04E+05	3.21E+08	6.65E+11	6.65E+11	4.72E+06	4.72E+06
1.36E+05	3.38E+05	3.38E+05	3.57E+08	7.40E+11	7.40E+11	5.25E+06	5.25E+06
1.51E+05	3.77E+05	3.77E+05	3.97E+08	8.24E+11	8.24E+11	5.85E+06	5.85E+06
1.69E+05	4.19E+05	4.19E+05	4.42E+08	9.17E+11	9.17E+11	6.51E+06	6.51E+06
1.88E+05	4.67E+05	4.67E+05	4.93E+08	1.02E+12	1.02E+12	7.25E+06	7.25E+06
2.09E+05	5.19E+05	5.20E+05	5.49E+08	1.14E+12	1.14E+12	8.07E+06	8.07E+06
2.33E+05	5.78E+05	5.79E+05	6.11E+08	1.27E+12	1.27E+12	8.98E+06	8.99E+06
2.59E+05	6.44E+05	6.44E+05	6.80E+08	1.41E+12	1.41E+12	1.00E+07	1.00E+07
2.88E+05	7.17E+05	7.17E+05	7.57E+08	1.57E+12	1.57E+12	1.11E+07	1.11E+07
3.21E+05	7.98E+05	7.99E+05	8.43E+08	1.75E+12	1.75E+12	1.24E+07	1.24E+07
3.58E+05	8.88E+05	8.89E+05	9.39E+08	1.94E+12	1.95E+12	1.38E+07	1.38E+07

2.Data de presión para yacimiento de aceite (Prueba 2)

t_D	P_D	$t_D * P_D$	t, hr	$\Delta m(P), psi^2/cp$	$t * \Delta m(P)', psi^2/cp$	$\Delta P, psi$	$t * \Delta P', psi$
1.10E-06	2.13E-02	6.39E-03	1.29E-03	4.65E+04	1.40E+04	3.30E-01	9.93E-02
1.22E-06	2.19E-02	6.59E-03	1.42E-03	4.79E+04	1.44E+04	3.40E-01	1.02E-01
4.04E-06	3.14E-02	9.43E-03	4.72E-03	6.87E+04	2.06E+04	4.88E-01	1.47E-01
4.47E-06	3.23E-02	9.72E-03	5.21E-03	7.08E+04	2.13E+04	5.02E-01	1.51E-01
4.94E-06	3.33E-02	1.00E-02	5.76E-03	7.29E+04	2.19E+04	5.18E-01	1.56E-01
5.45E-06	3.43E-02	1.03E-02	6.36E-03	7.51E+04	2.26E+04	5.33E-01	1.60E-01
6.03E-06	3.54E-02	1.06E-02	7.03E-03	7.74E+04	2.33E+04	5.50E-01	1.65E-01
6.66E-06	3.65E-02	1.10E-02	7.77E-03	7.98E+04	2.40E+04	5.66E-01	1.70E-01
7.36E-06	3.76E-02	1.13E-02	8.58E-03	8.22E+04	2.47E+04	5.84E-01	1.75E-01
8.13E-06	3.87E-02	1.16E-02	9.48E-03	8.47E+04	2.54E+04	6.01E-01	1.81E-01
8.98E-06	3.99E-02	1.20E-02	1.05E-02	8.73E+04	2.62E+04	6.20E-01	1.86E-01
9.92E-06	4.11E-02	1.23E-02	1.16E-02	8.99E+04	2.70E+04	6.39E-01	1.92E-01
1.10E-05	4.24E-02	1.27E-02	1.28E-02	9.27E+04	2.78E+04	6.58E-01	1.98E-01
1.21E-05	4.36E-02	1.31E-02	1.41E-02	9.55E+04	2.87E+04	6.78E-01	2.04E-01
1.34E-05	4.50E-02	1.35E-02	1.56E-02	9.84E+04	2.96E+04	6.99E-01	2.10E-01
1.48E-05	4.63E-02	1.39E-02	1.73E-02	1.01E+05	3.04E+04	7.20E-01	2.16E-01
4.90E-05	6.64E-02	1.99E-02	5.71E-02	1.45E+05	4.36E+04	1.03E+00	3.10E-01
5.41E-05	6.84E-02	2.05E-02	6.31E-02	1.50E+05	4.49E+04	1.06E+00	3.19E-01
5.98E-05	7.05E-02	2.12E-02	6.98E-02	1.54E+05	4.63E+04	1.09E+00	3.29E-01
6.61E-05	7.26E-02	2.18E-02	7.71E-02	1.59E+05	4.77E+04	1.13E+00	3.39E-01
7.30E-05	7.48E-02	2.25E-02	8.52E-02	1.64E+05	4.92E+04	1.16E+00	3.49E-01
8.07E-05	7.71E-02	2.31E-02	9.41E-02	1.69E+05	5.06E+04	1.20E+00	3.60E-01
8.91E-05	7.95E-02	2.39E-02	1.04E-01	1.74E+05	5.22E+04	1.23E+00	3.70E-01
9.85E-05	8.19E-02	2.46E-02	1.15E-01	1.79E+05	5.38E+04	1.27E+00	3.82E-01

1.09E-04	8.44E-02	2.53E-02	1.27E-01	1.85E+05	5.54E+04	1.31E+00	3.93E-01
1.20E-04	8.69E-02	2.61E-02	1.40E-01	1.90E+05	5.71E+04	1.35E+00	4.05E-01
1.33E-04	8.96E-02	2.69E-02	1.55E-01	1.96E+05	5.88E+04	1.39E+00	4.18E-01
1.47E-04	9.23E-02	2.77E-02	1.71E-01	2.02E+05	6.06E+04	1.43E+00	4.30E-01
1.62E-04	9.51E-02	2.85E-02	1.89E-01	2.08E+05	6.24E+04	1.48E+00	4.43E-01
1.79E-04	9.80E-02	2.94E-02	2.09E-01	2.14E+05	6.43E+04	1.52E+00	4.57E-01
1.98E-04	1.01E-01	3.03E-02	2.31E-01	2.21E+05	6.63E+04	1.57E+00	4.71E-01
2.19E-04	1.04E-01	3.12E-02	2.55E-01	2.28E+05	6.83E+04	1.62E+00	4.85E-01
1.46E-03	1.85E-01	5.74E-02	1.70E+00	4.04E+05	1.26E+05	2.87E+00	8.91E-01
1.61E-03	1.90E-01	5.96E-02	1.88E+00	4.17E+05	1.30E+05	2.96E+00	9.25E-01
1.78E-03	1.96E-01	6.19E-02	2.07E+00	4.30E+05	1.35E+05	3.05E+00	9.61E-01
1.96E-03	2.03E-01	6.44E-02	2.29E+00	4.44E+05	1.41E+05	3.15E+00	1.00E+00
2.17E-03	2.09E-01	6.70E-02	2.53E+00	4.58E+05	1.47E+05	3.25E+00	1.04E+00
5.33E-03	2.83E-01	1.01E-01	6.22E+00	6.19E+05	2.21E+05	4.40E+00	1.57E+00
1.45E-02	4.16E-01	1.73E-01	1.69E+01	9.10E+05	3.78E+05	6.46E+00	2.69E+00
1.60E-02	4.34E-01	1.83E-01	1.86E+01	9.49E+05	4.00E+05	6.74E+00	2.84E+00
1.76E-02	4.53E-01	1.94E-01	2.06E+01	9.90E+05	4.24E+05	7.03E+00	3.01E+00
1.95E-02	4.73E-01	2.05E-01	2.28E+01	1.03E+06	4.49E+05	7.34E+00	3.19E+00
2.15E-02	4.94E-01	2.17E-01	2.51E+01	1.08E+06	4.76E+05	7.67E+00	3.38E+00
2.38E-02	5.16E-01	2.30E-01	2.78E+01	1.13E+06	5.04E+05	8.01E+00	3.58E+00
2.63E-02	5.40E-01	2.44E-01	3.07E+01	1.18E+06	5.34E+05	8.38E+00	3.79E+00
1.43E-01	1.25E+00	6.68E-01	1.67E+02	2.74E+06	1.46E+06	1.95E+01	1.04E+01
1.58E-01	1.32E+00	7.09E-01	1.85E+02	2.89E+06	1.55E+06	2.05E+01	1.10E+01
1.75E-01	1.39E+00	7.52E-01	2.04E+02	3.05E+06	1.65E+06	2.17E+01	1.17E+01
1.93E-01	1.47E+00	7.99E-01	2.26E+02	3.22E+06	1.75E+06	2.29E+01	1.24E+01
2.14E-01	1.55E+00	8.48E-01	2.49E+02	3.40E+06	1.85E+06	2.41E+01	1.32E+01
8.64E-01	3.44E+00	2.08E+00	1.01E+03	7.53E+06	4.56E+06	5.34E+01	3.24E+01
9.55E-01	3.66E+00	2.24E+00	1.11E+03	8.00E+06	4.91E+06	5.68E+01	3.48E+01
1.06E+00	3.89E+00	2.42E+00	1.23E+03	8.50E+06	5.29E+06	6.04E+01	3.76E+01
1.17E+00	4.14E+00	2.61E+00	1.36E+03	9.05E+06	5.71E+06	6.42E+01	4.05E+01
1.29E+00	4.41E+00	2.82E+00	1.50E+03	9.64E+06	6.18E+06	6.84E+01	4.39E+01
1.42E+00	4.70E+00	3.06E+00	1.66E+03	1.03E+07	6.69E+06	7.30E+01	4.75E+01
1.57E+00	5.02E+00	3.32E+00	1.84E+03	1.10E+07	7.26E+06	7.79E+01	5.15E+01
1.74E+00	5.36E+00	3.61E+00	2.03E+03	1.17E+07	7.89E+06	8.32E+01	5.60E+01
3.86E+00	9.52E+00	7.32E+00	4.50E+03	2.08E+07	1.60E+07	1.48E+02	1.14E+02
4.27E+00	1.03E+01	8.03E+00	4.98E+03	2.25E+07	1.76E+07	1.60E+02	1.25E+02
4.71E+00	1.11E+01	8.81E+00	5.50E+03	2.43E+07	1.93E+07	1.73E+02	1.37E+02
5.21E+00	1.20E+01	9.68E+00	6.08E+03	2.63E+07	2.12E+07	1.87E+02	1.50E+02

5.75E+00	1.30E+01	1.06E+01	6.71E+03	2.85E+07	2.33E+07	2.03E+02	1.65E+02
6.36E+00	1.42E+01	1.17E+01	7.42E+03	3.10E+07	2.56E+07	2.20E+02	1.82E+02
7.03E+00	1.54E+01	1.29E+01	8.20E+03	3.37E+07	2.81E+07	2.39E+02	2.00E+02
7.76E+00	1.67E+01	1.41E+01	9.06E+03	3.66E+07	3.09E+07	2.60E+02	2.20E+02
8.58E+00	1.82E+01	1.56E+01	1.00E+04	3.98E+07	3.41E+07	2.83E+02	2.42E+02
9.48E+00	1.98E+01	1.71E+01	1.11E+04	4.34E+07	3.75E+07	3.08E+02	2.66E+02
1.05E+01	2.16E+01	1.89E+01	1.22E+04	4.73E+07	4.13E+07	3.36E+02	2.93E+02
1.16E+01	2.36E+01	2.08E+01	1.35E+04	5.16E+07	4.55E+07	3.67E+02	3.23E+02
1.28E+01	2.58E+01	2.29E+01	1.49E+04	5.64E+07	5.01E+07	4.00E+02	3.56E+02
1.41E+01	2.82E+01	2.52E+01	1.65E+04	6.16E+07	5.52E+07	4.37E+02	3.92E+02
1.56E+01	3.08E+01	2.78E+01	1.82E+04	6.74E+07	6.09E+07	4.78E+02	4.32E+02
1.72E+01	3.37E+01	3.07E+01	2.01E+04	7.38E+07	6.71E+07	5.24E+02	4.76E+02
1.91E+01	3.69E+01	3.38E+01	2.22E+04	8.08E+07	7.40E+07	5.74E+02	5.25E+02
6.97E+01	1.26E+02	1.22E+02	8.13E+04	2.75E+08	2.66E+08	1.95E+03	1.89E+03
7.70E+01	1.38E+02	1.34E+02	8.99E+04	3.03E+08	2.93E+08	2.15E+03	2.08E+03
8.51E+01	1.52E+02	1.48E+02	9.93E+04	3.33E+08	3.24E+08	2.37E+03	2.30E+03
9.40E+01	1.68E+02	1.63E+02	1.10E+05	3.67E+08	3.58E+08	2.61E+03	2.54E+03
1.04E+02	1.85E+02	1.80E+02	1.21E+05	4.05E+08	3.95E+08	2.87E+03	2.80E+03
1.15E+02	2.04E+02	1.99E+02	1.34E+05	4.46E+08	4.36E+08	3.17E+03	3.09E+03
1.27E+02	2.25E+02	2.20E+02	1.48E+05	4.91E+08	4.81E+08	3.49E+03	3.42E+03
1.40E+02	2.48E+02	2.43E+02	1.64E+05	5.42E+08	5.31E+08	3.85E+03	3.77E+03
1.55E+02	2.73E+02	2.68E+02	1.81E+05	5.97E+08	5.86E+08	4.24E+03	4.16E+03
1.71E+02	3.01E+02	2.96E+02	2.00E+05	6.59E+08	6.47E+08	4.68E+03	4.60E+03
1.89E+02	3.32E+02	3.27E+02	2.21E+05	7.27E+08	7.15E+08	5.16E+03	5.07E+03
2.09E+02	3.66E+02	3.61E+02	2.44E+05	8.01E+08	7.89E+08	5.69E+03	5.60E+03
2.31E+02	4.04E+02	3.98E+02	2.69E+05	8.84E+08	8.71E+08	6.28E+03	6.19E+03
2.55E+02	4.46E+02	4.40E+02	2.98E+05	9.75E+08	9.62E+08	6.92E+03	6.83E+03
2.82E+02	4.92E+02	4.85E+02	3.29E+05	1.08E+09	1.06E+09	7.64E+03	7.54E+03
6.92E+02	1.19E+03	1.18E+03	8.07E+05	2.61E+09	2.58E+09	1.85E+04	1.83E+04
7.64E+02	1.32E+03	1.30E+03	8.92E+05	2.88E+09	2.85E+09	2.04E+04	2.02E+04
8.45E+02	1.45E+03	1.44E+03	9.86E+05	3.18E+09	3.15E+09	2.26E+04	2.23E+04
9.33E+02	1.60E+03	1.59E+03	1.09E+06	3.51E+09	3.47E+09	2.49E+04	2.47E+04
1.03E+03	1.77E+03	1.75E+03	1.20E+06	3.87E+09	3.83E+09	2.75E+04	2.72E+04
1.14E+03	1.95E+03	1.93E+03	1.33E+06	4.27E+09	4.23E+09	3.03E+04	3.00E+04
1.26E+03	2.16E+03	2.13E+03	1.47E+06	4.72E+09	4.67E+09	3.35E+04	3.31E+04
1.39E+03	2.38E+03	2.35E+03	1.62E+06	5.20E+09	5.15E+09	3.69E+04	3.66E+04
2.80E+03	4.74E+03	4.68E+03	3.26E+06	1.04E+10	1.02E+10	7.36E+04	7.26E+04
3.09E+03	5.23E+03	5.16E+03	3.61E+06	1.14E+10	1.13E+10	8.12E+04	8.01E+04

3.41E+03	5.77E+03	5.68E+03	3.98E+06	1.26E+10	1.24E+10	8.96E+04	8.83E+04
3.77E+03	6.36E+03	6.27E+03	4.40E+06	1.39E+10	1.37E+10	9.88E+04	9.73E+04
4.17E+03	7.02E+03	6.91E+03	4.86E+06	1.54E+10	1.51E+10	1.09E+05	1.07E+05
4.61E+03	7.74E+03	7.61E+03	5.37E+06	1.69E+10	1.67E+10	1.20E+05	1.18E+05
5.09E+03	8.54E+03	8.39E+03	5.94E+06	1.87E+10	1.84E+10	1.33E+05	1.30E+05
5.62E+03	9.42E+03	9.25E+03	6.56E+06	2.06E+10	2.02E+10	1.46E+05	1.44E+05
4.14E+04	6.62E+04	6.52E+04	4.83E+07	1.45E+11	1.43E+11	1.03E+06	1.01E+06
4.57E+04	7.30E+04	7.20E+04	5.33E+07	1.60E+11	1.58E+11	1.13E+06	1.12E+06
5.05E+04	8.05E+04	7.95E+04	5.89E+07	1.76E+11	1.74E+11	1.25E+06	1.24E+06
1.67E+05	2.64E+05	2.63E+05	1.95E+08	5.77E+11	5.76E+11	4.10E+06	4.09E+06
1.85E+05	2.92E+05	2.91E+05	2.16E+08	6.38E+11	6.36E+11	4.53E+06	4.52E+06
2.04E+05	3.22E+05	3.21E+05	2.38E+08	7.04E+11	7.03E+11	5.00E+06	4.99E+06
2.26E+05	3.56E+05	3.55E+05	2.63E+08	7.78E+11	7.77E+11	5.52E+06	5.52E+06
2.49E+05	3.93E+05	3.92E+05	2.91E+08	8.59E+11	8.59E+11	6.10E+06	6.10E+06
2.75E+05	4.34E+05	4.34E+05	3.21E+08	9.49E+11	9.49E+11	6.74E+06	6.73E+06
3.04E+05	4.79E+05	4.79E+05	3.55E+08	1.05E+12	1.05E+12	7.44E+06	7.44E+06
3.36E+05	5.29E+05	5.29E+05	3.92E+08	1.16E+12	1.16E+12	8.22E+06	8.22E+06
3.72E+05	5.85E+05	5.85E+05	4.34E+08	1.28E+12	1.28E+12	9.08E+06	9.08E+06
4.11E+05	6.46E+05	6.46E+05	4.79E+08	1.41E+12	1.41E+12	1.00E+07	1.00E+07
4.54E+05	7.14E+05	7.14E+05	5.29E+08	1.56E+12	1.56E+12	1.11E+07	1.11E+07
5.01E+05	7.89E+05	7.89E+05	5.85E+08	1.73E+12	1.73E+12	1.22E+07	1.23E+07
5.54E+05	8.71E+05	8.72E+05	6.46E+08	1.91E+12	1.91E+12	1.35E+07	1.35E+07
1.83E+06	2.88E+06	2.89E+06	2.14E+09	6.30E+12	6.32E+12	4.48E+07	4.48E+07
2.03E+06	3.18E+06	3.19E+06	2.36E+09	6.97E+12	6.98E+12	4.95E+07	4.95E+07
2.24E+06	3.52E+06	3.52E+06	2.61E+09	7.70E+12	7.71E+12	5.46E+07	5.47E+07
2.47E+06	3.89E+06	3.89E+06	2.89E+09	8.50E+12	8.52E+12	6.04E+07	6.05E+07
2.73E+06	4.29E+06	4.30E+06	3.19E+09	9.40E+12	9.41E+12	6.67E+07	6.68E+07
3.02E+06	4.75E+06	4.75E+06	3.52E+09	1.04E+13	1.04E+13	7.37E+07	7.38E+07
3.34E+06	5.24E+06	5.25E+06	3.89E+09	1.15E+13	1.15E+13	8.14E+07	8.16E+07
3.69E+06	5.79E+06	5.80E+06	4.30E+09	1.27E+13	1.27E+13	9.00E+07	9.02E+07
9.05E+06	1.42E+07	1.42E+07	1.06E+10	3.11E+13	3.12E+13	2.21E+08	2.21E+08
1.00E+07	1.57E+07	1.57E+07	1.17E+10	3.44E+13	3.44E+13	2.44E+08	2.45E+08

3.Data de presión para yacimiento de aceite (Prueba 3)

t_D	P_D	$t_D * P_D$	t,hr	$\Delta m(P), \text{psi}^2/\text{cp}$	$t * \Delta m(P)', \text{psi}^2/\text{cp}$	$\Delta P, \text{psi}$	$t * \Delta P', \text{psi}$
1.10E-06	3.50E-02	8.80E-03	2.90E-03	7.66E+04	1.92E+04	5.44E-01	1.37E-01
1.22E-06	3.59E-02	9.02E-03	3.21E-03	7.86E+04	1.97E+04	5.58E-01	1.40E-01
1.35E-06	3.68E-02	9.25E-03	3.54E-03	8.06E+04	2.02E+04	5.72E-01	1.44E-01
1.49E-06	3.78E-02	9.48E-03	3.91E-03	8.26E+04	2.07E+04	5.86E-01	1.47E-01
1.65E-06	3.87E-02	9.72E-03	4.32E-03	8.47E+04	2.13E+04	6.01E-01	1.51E-01
1.82E-06	3.97E-02	9.96E-03	4.78E-03	8.68E+04	2.18E+04	6.17E-01	1.55E-01
2.01E-06	4.07E-02	1.02E-02	5.28E-03	8.90E+04	2.23E+04	6.32E-01	1.59E-01
2.22E-06	4.17E-02	1.05E-02	5.83E-03	9.13E+04	2.29E+04	6.48E-01	1.63E-01
2.45E-06	4.28E-02	1.07E-02	6.44E-03	9.36E+04	2.35E+04	6.65E-01	1.67E-01
2.71E-06	4.39E-02	1.10E-02	7.12E-03	9.60E+04	2.41E+04	6.81E-01	1.71E-01
3.00E-06	4.50E-02	1.13E-02	7.87E-03	9.84E+04	2.47E+04	6.99E-01	1.75E-01
3.31E-06	4.61E-02	1.16E-02	8.69E-03	1.01E+05	2.53E+04	7.16E-01	1.80E-01
3.66E-06	4.73E-02	1.19E-02	9.61E-03	1.03E+05	2.59E+04	7.35E-01	1.84E-01
4.04E-06	4.85E-02	1.22E-02	1.06E-02	1.06E+05	2.66E+04	7.53E-01	1.89E-01
4.47E-06	4.97E-02	1.25E-02	1.17E-02	1.09E+05	2.73E+04	7.72E-01	1.94E-01
4.94E-06	5.10E-02	1.28E-02	1.30E-02	1.12E+05	2.79E+04	7.92E-01	1.98E-01
5.45E-06	5.23E-02	1.31E-02	1.43E-02	1.14E+05	2.87E+04	8.12E-01	2.03E-01
6.03E-06	5.36E-02	1.34E-02	1.58E-02	1.17E+05	2.94E+04	8.32E-01	2.09E-01
6.66E-06	5.49E-02	1.38E-02	1.75E-02	1.20E+05	3.01E+04	8.53E-01	2.14E-01
7.36E-06	5.63E-02	1.41E-02	1.93E-02	1.23E+05	3.09E+04	8.75E-01	2.19E-01
8.13E-06	5.78E-02	1.45E-02	2.13E-02	1.26E+05	3.17E+04	8.97E-01	2.25E-01
8.98E-06	5.92E-02	1.48E-02	2.36E-02	1.30E+05	3.25E+04	9.20E-01	2.30E-01
9.92E-06	6.07E-02	1.52E-02	2.61E-02	1.33E+05	3.33E+04	9.43E-01	2.36E-01
1.10E-05	6.23E-02	1.56E-02	2.88E-02	1.36E+05	3.41E+04	9.67E-01	2.42E-01
1.21E-05	6.38E-02	1.60E-02	3.18E-02	1.40E+05	3.50E+04	9.91E-01	2.48E-01
1.34E-05	6.54E-02	1.64E-02	3.51E-02	1.43E+05	3.59E+04	1.02E+00	2.55E-01
1.48E-05	6.71E-02	1.68E-02	3.88E-02	1.47E+05	3.68E+04	1.04E+00	2.61E-01
1.63E-05	6.88E-02	1.72E-02	4.29E-02	1.51E+05	3.77E+04	1.07E+00	2.68E-01
1.81E-05	7.05E-02	1.77E-02	4.74E-02	1.54E+05	3.86E+04	1.10E+00	2.74E-01
2.00E-05	7.23E-02	1.81E-02	5.24E-02	1.58E+05	3.96E+04	1.12E+00	2.81E-01
2.20E-05	7.42E-02	1.86E-02	5.79E-02	1.62E+05	4.06E+04	1.15E+00	2.88E-01
2.44E-05	7.60E-02	1.90E-02	6.40E-02	1.66E+05	4.16E+04	1.18E+00	2.96E-01
2.69E-05	7.79E-02	1.95E-02	7.07E-02	1.71E+05	4.27E+04	1.21E+00	3.03E-01
2.97E-05	7.99E-02	2.00E-02	7.81E-02	1.75E+05	4.38E+04	1.24E+00	3.11E-01
3.29E-05	8.19E-02	2.05E-02	8.63E-02	1.79E+05	4.49E+04	1.27E+00	3.19E-01
3.63E-05	8.40E-02	2.10E-02	9.53E-02	1.84E+05	4.60E+04	1.30E+00	3.27E-01

4.01E-05	8.61E-02	2.16E-02	1.05E-01	1.88E+05	4.72E+04	1.34E+00	3.35E-01
4.43E-05	8.83E-02	2.21E-02	1.16E-01	1.93E+05	4.83E+04	1.37E+00	3.43E-01
4.90E-05	9.05E-02	2.27E-02	1.29E-01	1.98E+05	4.96E+04	1.41E+00	3.52E-01
5.41E-05	9.28E-02	2.32E-02	1.42E-01	2.03E+05	5.08E+04	1.44E+00	3.61E-01
5.98E-05	9.52E-02	2.38E-02	1.57E-01	2.08E+05	5.21E+04	1.48E+00	3.70E-01
6.61E-05	9.76E-02	2.44E-02	1.73E-01	2.13E+05	5.34E+04	1.52E+00	3.79E-01
7.30E-05	1.00E-01	2.50E-02	1.92E-01	2.19E+05	5.48E+04	1.55E+00	3.89E-01
8.07E-05	1.03E-01	2.57E-02	2.12E-01	2.24E+05	5.61E+04	1.59E+00	3.99E-01
8.91E-05	1.05E-01	2.63E-02	2.34E-01	2.30E+05	5.76E+04	1.63E+00	4.09E-01
9.85E-05	1.08E-01	2.70E-02	2.59E-01	2.36E+05	5.90E+04	1.67E+00	4.19E-01
1.09E-04	1.11E-01	2.77E-02	2.86E-01	2.42E+05	6.05E+04	1.72E+00	4.30E-01
1.20E-04	1.13E-01	2.84E-02	3.16E-01	2.48E+05	6.20E+04	1.76E+00	4.40E-01
1.33E-04	1.16E-01	2.91E-02	3.49E-01	2.54E+05	6.36E+04	1.81E+00	4.52E-01
1.47E-04	1.19E-01	2.98E-02	3.85E-01	2.61E+05	6.52E+04	1.85E+00	4.63E-01
1.62E-04	1.22E-01	3.06E-02	4.26E-01	2.67E+05	6.69E+04	1.90E+00	4.75E-01
1.79E-04	1.25E-01	3.13E-02	4.70E-01	2.74E+05	6.85E+04	1.95E+00	4.87E-01
1.98E-04	1.28E-01	3.21E-02	5.20E-01	2.81E+05	7.03E+04	1.99E+00	4.99E-01
2.19E-04	1.32E-01	3.29E-02	5.74E-01	2.88E+05	7.21E+04	2.04E+00	5.12E-01
2.42E-04	1.35E-01	3.38E-02	6.35E-01	2.95E+05	7.39E+04	2.10E+00	5.25E-01
2.67E-04	1.38E-01	3.46E-02	7.01E-01	3.03E+05	7.57E+04	2.15E+00	5.38E-01
2.95E-04	1.42E-01	3.55E-02	7.75E-01	3.10E+05	7.77E+04	2.20E+00	5.51E-01
3.26E-04	1.45E-01	3.64E-02	8.56E-01	3.18E+05	7.96E+04	2.26E+00	5.65E-01
3.60E-04	1.49E-01	3.73E-02	9.46E-01	3.26E+05	8.17E+04	2.32E+00	5.80E-01
3.98E-04	1.53E-01	3.83E-02	1.05E+00	3.35E+05	8.37E+04	2.38E+00	5.95E-01
4.40E-04	1.57E-01	3.93E-02	1.15E+00	3.43E+05	8.59E+04	2.44E+00	6.10E-01
4.86E-04	1.61E-01	4.03E-02	1.28E+00	3.52E+05	8.81E+04	2.50E+00	6.25E-01
5.37E-04	1.65E-01	4.13E-02	1.41E+00	3.61E+05	9.03E+04	2.56E+00	6.41E-01
5.93E-04	1.69E-01	4.24E-02	1.56E+00	3.70E+05	9.27E+04	2.62E+00	6.58E-01
6.56E-04	1.73E-01	4.35E-02	1.72E+00	3.79E+05	9.51E+04	2.69E+00	6.75E-01
7.24E-04	1.78E-01	4.46E-02	1.90E+00	3.89E+05	9.75E+04	2.76E+00	6.92E-01
8.00E-04	1.82E-01	4.57E-02	2.10E+00	3.99E+05	1.00E+05	2.83E+00	7.11E-01
8.84E-04	1.87E-01	4.70E-02	2.32E+00	4.09E+05	1.03E+05	2.90E+00	7.29E-01
9.77E-04	1.92E-01	4.82E-02	2.57E+00	4.19E+05	1.05E+05	2.97E+00	7.49E-01
1.08E-03	1.96E-01	4.95E-02	2.83E+00	4.30E+05	1.08E+05	3.05E+00	7.69E-01
1.19E-03	2.01E-01	5.08E-02	3.13E+00	4.41E+05	1.11E+05	3.13E+00	7.90E-01
1.32E-03	2.07E-01	5.22E-02	3.46E+00	4.52E+05	1.14E+05	3.21E+00	8.11E-01
1.46E-03	2.12E-01	5.37E-02	3.82E+00	4.63E+05	1.17E+05	3.29E+00	8.34E-01
1.61E-03	2.17E-01	5.52E-02	4.23E+00	4.75E+05	1.21E+05	3.37E+00	8.57E-01

1.78E-03	2.23E-01	5.68E-02	4.67E+00	4.87E+05	1.24E+05	3.46E+00	8.82E-01
1.96E-03	2.29E-01	5.84E-02	5.16E+00	5.00E+05	1.28E+05	3.55E+00	9.07E-01
2.17E-03	2.34E-01	6.01E-02	5.70E+00	5.13E+05	1.32E+05	3.64E+00	9.34E-01
2.40E-03	2.41E-01	6.19E-02	6.30E+00	5.26E+05	1.35E+05	3.74E+00	9.62E-01
2.65E-03	2.47E-01	6.38E-02	6.96E+00	5.40E+05	1.40E+05	3.83E+00	9.91E-01
2.93E-03	2.53E-01	6.58E-02	7.69E+00	5.54E+05	1.44E+05	3.93E+00	1.02E+00
3.24E-03	2.60E-01	6.79E-02	8.50E+00	5.69E+05	1.48E+05	4.04E+00	1.05E+00
3.58E-03	2.67E-01	7.01E-02	9.39E+00	5.84E+05	1.53E+05	4.14E+00	1.09E+00
3.95E-03	2.74E-01	7.24E-02	1.04E+01	5.99E+05	1.58E+05	4.25E+00	1.12E+00
4.37E-03	2.81E-01	7.48E-02	1.15E+01	6.15E+05	1.64E+05	4.37E+00	1.16E+00
4.82E-03	2.89E-01	7.74E-02	1.27E+01	6.32E+05	1.69E+05	4.49E+00	1.20E+00
5.33E-03	2.97E-01	8.01E-02	1.40E+01	6.49E+05	1.75E+05	4.61E+00	1.24E+00
5.89E-03	3.05E-01	8.30E-02	1.55E+01	6.67E+05	1.82E+05	4.73E+00	1.29E+00
6.51E-03	3.13E-01	8.60E-02	1.71E+01	6.85E+05	1.88E+05	4.87E+00	1.34E+00
7.19E-03	3.22E-01	8.92E-02	1.89E+01	7.04E+05	1.95E+05	5.00E+00	1.39E+00
7.94E-03	3.31E-01	9.26E-02	2.09E+01	7.24E+05	2.03E+05	5.14E+00	1.44E+00
8.78E-03	3.41E-01	9.62E-02	2.30E+01	7.45E+05	2.10E+05	5.29E+00	1.49E+00
9.70E-03	3.50E-01	1.00E-01	2.55E+01	7.66E+05	2.19E+05	5.44E+00	1.55E+00
1.07E-02	3.60E-01	1.04E-01	2.81E+01	7.89E+05	2.28E+05	5.60E+00	1.62E+00
1.18E-02	3.71E-01	1.08E-01	3.11E+01	8.12E+05	2.37E+05	5.76E+00	1.68E+00
1.31E-02	3.82E-01	1.13E-01	3.43E+01	8.36E+05	2.47E+05	5.94E+00	1.75E+00
1.45E-02	3.94E-01	1.18E-01	3.79E+01	8.61E+05	2.57E+05	6.11E+00	1.83E+00
1.60E-02	4.06E-01	1.23E-01	4.19E+01	8.87E+05	2.68E+05	6.30E+00	1.90E+00
1.76E-02	4.18E-01	1.28E-01	4.63E+01	9.15E+05	2.80E+05	6.50E+00	1.99E+00
1.95E-02	4.31E-01	1.33E-01	5.12E+01	9.43E+05	2.92E+05	6.70E+00	2.07E+00
2.15E-02	4.45E-01	1.39E-01	5.66E+01	9.73E+05	3.05E+05	6.91E+00	2.16E+00
2.38E-02	4.59E-01	1.46E-01	6.25E+01	1.00E+06	3.19E+05	7.13E+00	2.26E+00
2.63E-02	4.74E-01	1.52E-01	6.91E+01	1.04E+06	3.33E+05	7.36E+00	2.36E+00
2.91E-02	4.90E-01	1.59E-01	7.63E+01	1.07E+06	3.48E+05	7.61E+00	2.47E+00
3.21E-02	5.06E-01	1.66E-01	8.43E+01	1.11E+06	3.64E+05	7.86E+00	2.58E+00
3.55E-02	5.23E-01	1.74E-01	9.32E+01	1.14E+06	3.81E+05	8.12E+00	2.70E+00
3.92E-02	5.41E-01	1.82E-01	1.03E+02	1.18E+06	3.98E+05	8.40E+00	2.83E+00
4.33E-02	5.59E-01	1.91E-01	1.14E+02	1.22E+06	4.17E+05	8.69E+00	2.96E+00
4.79E-02	5.79E-01	2.00E-01	1.26E+02	1.27E+06	4.38E+05	8.99E+00	3.11E+00
5.29E-02	5.99E-01	2.10E-01	1.39E+02	1.31E+06	4.59E+05	9.30E+00	3.26E+00
5.84E-02	6.20E-01	2.21E-01	1.53E+02	1.36E+06	4.83E+05	9.63E+00	3.43E+00
6.46E-02	6.43E-01	2.33E-01	1.70E+02	1.41E+06	5.09E+05	9.98E+00	3.61E+00
7.13E-02	6.66E-01	2.46E-01	1.87E+02	1.46E+06	5.38E+05	1.03E+01	3.82E+00

7.88E-02	6.91E-01	2.60E-01	2.07E+02	1.51E+06	5.70E+05	1.07E+01	4.05E+00
8.71E-02	7.17E-01	2.77E-01	2.29E+02	1.57E+06	6.06E+05	1.11E+01	4.30E+00
9.62E-02	7.46E-01	2.96E-01	2.53E+02	1.63E+06	6.47E+05	1.16E+01	4.59E+00
1.06E-01	7.76E-01	3.17E-01	2.79E+02	1.70E+06	6.93E+05	1.20E+01	4.92E+00
1.17E-01	8.08E-01	3.41E-01	3.08E+02	1.77E+06	7.45E+05	1.26E+01	5.29E+00
1.30E-01	8.43E-01	3.68E-01	3.41E+02	1.84E+06	8.05E+05	1.31E+01	5.71E+00
1.43E-01	8.81E-01	3.99E-01	3.77E+02	1.93E+06	8.72E+05	1.37E+01	6.19E+00
1.58E-01	9.22E-01	4.34E-01	4.16E+02	2.02E+06	9.49E+05	1.43E+01	6.74E+00
1.75E-01	9.67E-01	4.73E-01	4.60E+02	2.12E+06	1.04E+06	1.50E+01	7.35E+00
1.93E-01	1.02E+00	5.18E-01	5.08E+02	2.22E+06	1.13E+06	1.58E+01	8.04E+00
2.14E-01	1.07E+00	5.68E-01	5.61E+02	2.34E+06	1.24E+06	1.66E+01	8.82E+00
2.36E-01	1.13E+00	6.24E-01	6.20E+02	2.47E+06	1.36E+06	1.76E+01	9.69E+00
2.61E-01	1.20E+00	6.86E-01	6.85E+02	2.62E+06	1.50E+06	1.86E+01	1.07E+01
2.88E-01	1.27E+00	7.56E-01	7.57E+02	2.77E+06	1.65E+06	1.97E+01	1.17E+01
3.19E-01	1.35E+00	8.34E-01	8.37E+02	2.95E+06	1.82E+06	2.09E+01	1.29E+01
3.52E-01	1.43E+00	9.20E-01	9.24E+02	3.14E+06	2.01E+06	2.23E+01	1.43E+01
3.89E-01	1.53E+00	1.02E+00	1.02E+03	3.35E+06	2.22E+06	2.38E+01	1.58E+01
4.30E-01	1.64E+00	1.12E+00	1.13E+03	3.58E+06	2.45E+06	2.54E+01	1.74E+01
4.75E-01	1.75E+00	1.24E+00	1.25E+03	3.84E+06	2.71E+06	2.73E+01	1.92E+01
5.25E-01	1.88E+00	1.37E+00	1.38E+03	4.12E+06	2.99E+06	2.93E+01	2.13E+01
5.80E-01	2.03E+00	1.51E+00	1.52E+03	4.44E+06	3.31E+06	3.15E+01	2.35E+01
6.41E-01	2.19E+00	1.67E+00	1.68E+03	4.78E+06	3.65E+06	3.40E+01	2.59E+01
7.08E-01	2.36E+00	1.85E+00	1.86E+03	5.17E+06	4.04E+06	3.67E+01	2.87E+01
7.82E-01	2.56E+00	2.04E+00	2.05E+03	5.59E+06	4.46E+06	3.97E+01	3.17E+01
8.64E-01	2.77E+00	2.25E+00	2.27E+03	6.06E+06	4.93E+06	4.30E+01	3.50E+01
9.55E-01	3.00E+00	2.49E+00	2.51E+03	6.57E+06	5.45E+06	4.67E+01	3.87E+01
1.06E+00	3.27E+00	2.75E+00	2.77E+03	7.14E+06	6.02E+06	5.07E+01	4.27E+01
1.17E+00	3.55E+00	3.04E+00	3.06E+03	7.77E+06	6.65E+06	5.52E+01	4.72E+01
1.29E+00	3.87E+00	3.36E+00	3.38E+03	8.47E+06	7.35E+06	6.01E+01	5.22E+01
1.42E+00	4.22E+00	3.71E+00	3.74E+03	9.24E+06	8.12E+06	6.56E+01	5.76E+01
1.57E+00	4.61E+00	4.10E+00	4.13E+03	1.01E+07	8.97E+06	7.16E+01	6.37E+01
1.74E+00	5.04E+00	4.53E+00	4.56E+03	1.10E+07	9.91E+06	7.83E+01	7.04E+01
1.92E+00	5.52E+00	5.01E+00	5.04E+03	1.21E+07	1.09E+07	8.57E+01	7.77E+01
2.12E+00	6.04E+00	5.53E+00	5.57E+03	1.32E+07	1.21E+07	9.38E+01	8.59E+01
2.34E+00	6.62E+00	6.11E+00	6.15E+03	1.45E+07	1.34E+07	1.03E+02	9.49E+01
2.59E+00	7.26E+00	6.75E+00	6.80E+03	1.59E+07	1.48E+07	1.13E+02	1.05E+02
2.86E+00	7.97E+00	7.46E+00	7.51E+03	1.74E+07	1.63E+07	1.24E+02	1.16E+02
3.16E+00	8.75E+00	8.24E+00	8.30E+03	1.91E+07	1.80E+07	1.36E+02	1.28E+02

3.49E+00	9.61E+00	9.10E+00	9.17E+03	2.10E+07	1.99E+07	1.49E+02	1.41E+02
3.86E+00	1.06E+01	1.01E+01	1.01E+04	2.31E+07	2.20E+07	1.64E+02	1.56E+02
4.27E+00	1.16E+01	1.11E+01	1.12E+04	2.54E+07	2.43E+07	1.80E+02	1.73E+02
4.71E+00	1.28E+01	1.23E+01	1.24E+04	2.80E+07	2.69E+07	1.98E+02	1.91E+02
5.21E+00	1.41E+01	1.36E+01	1.37E+04	3.08E+07	2.97E+07	2.18E+02	2.11E+02
5.75E+00	1.55E+01	1.50E+01	1.51E+04	3.39E+07	3.28E+07	2.41E+02	2.33E+02
6.36E+00	1.71E+01	1.66E+01	1.67E+04	3.73E+07	3.62E+07	2.65E+02	2.57E+02
7.03E+00	1.88E+01	1.83E+01	1.84E+04	4.11E+07	4.00E+07	2.92E+02	2.84E+02
7.76E+00	2.07E+01	2.02E+01	2.04E+04	4.53E+07	4.42E+07	3.22E+02	3.14E+02
8.58E+00	2.28E+01	2.23E+01	2.25E+04	4.99E+07	4.89E+07	3.54E+02	3.47E+02
9.48E+00	2.52E+01	2.47E+01	2.49E+04	5.50E+07	5.40E+07	3.91E+02	3.83E+02
1.05E+01	2.77E+01	2.73E+01	2.75E+04	6.07E+07	5.96E+07	4.31E+02	4.23E+02
1.16E+01	3.06E+01	3.01E+01	3.04E+04	6.69E+07	6.59E+07	4.75E+02	4.68E+02
1.28E+01	3.37E+01	3.33E+01	3.36E+04	7.38E+07	7.28E+07	5.24E+02	5.17E+02
1.41E+01	3.72E+01	3.68E+01	3.71E+04	8.14E+07	8.04E+07	5.78E+02	5.71E+02
1.56E+01	4.11E+01	4.06E+01	4.10E+04	8.99E+07	8.88E+07	6.38E+02	6.31E+02
1.72E+01	4.53E+01	4.49E+01	4.53E+04	9.92E+07	9.81E+07	7.04E+02	6.97E+02
1.91E+01	5.00E+01	4.96E+01	5.00E+04	1.09E+08	1.08E+08	7.77E+02	7.70E+02
2.11E+01	5.52E+01	5.47E+01	5.53E+04	1.21E+08	1.20E+08	8.58E+02	8.50E+02
2.33E+01	6.09E+01	6.05E+01	6.11E+04	1.33E+08	1.32E+08	9.47E+02	9.39E+02
2.57E+01	6.73E+01	6.68E+01	6.75E+04	1.47E+08	1.46E+08	1.04E+03	1.04E+03
2.84E+01	7.43E+01	7.38E+01	7.46E+04	1.62E+08	1.61E+08	1.15E+03	1.15E+03
3.14E+01	8.20E+01	8.15E+01	8.24E+04	1.79E+08	1.78E+08	1.27E+03	1.27E+03
3.47E+01	9.05E+01	9.01E+01	9.10E+04	1.98E+08	1.97E+08	1.41E+03	1.40E+03
3.83E+01	1.00E+02	9.95E+01	1.01E+05	2.19E+08	2.18E+08	1.55E+03	1.55E+03
4.23E+01	1.10E+02	1.10E+02	1.11E+05	2.41E+08	2.40E+08	1.71E+03	1.71E+03
4.68E+01	1.22E+02	1.21E+02	1.23E+05	2.67E+08	2.66E+08	1.89E+03	1.89E+03
5.17E+01	1.35E+02	1.34E+02	1.36E+05	2.94E+08	2.93E+08	2.09E+03	2.08E+03
5.71E+01	1.49E+02	1.48E+02	1.50E+05	3.25E+08	3.24E+08	2.31E+03	2.30E+03
6.31E+01	1.64E+02	1.64E+02	1.66E+05	3.59E+08	3.58E+08	2.55E+03	2.54E+03
6.97E+01	1.81E+02	1.81E+02	1.83E+05	3.97E+08	3.95E+08	2.82E+03	2.81E+03
7.70E+01	2.00E+02	2.00E+02	2.02E+05	4.38E+08	4.37E+08	3.11E+03	3.10E+03
8.51E+01	2.21E+02	2.21E+02	2.23E+05	4.84E+08	4.82E+08	3.43E+03	3.43E+03
9.40E+01	2.44E+02	2.44E+02	2.47E+05	5.34E+08	5.33E+08	3.79E+03	3.78E+03
1.04E+02	2.70E+02	2.69E+02	2.73E+05	5.90E+08	5.89E+08	4.19E+03	4.18E+03
1.15E+02	2.98E+02	2.97E+02	3.01E+05	6.52E+08	6.50E+08	4.63E+03	4.62E+03
1.27E+02	3.29E+02	3.28E+02	3.33E+05	7.20E+08	7.18E+08	5.11E+03	5.10E+03
1.40E+02	3.63E+02	3.62E+02	3.68E+05	7.95E+08	7.93E+08	5.64E+03	5.63E+03

4.Data de presión para yacimiento de gas (Prueba 4)

t_D	P_D	$t_D * P_D$	t,hr	$\Delta m(P), \text{psi}^2/\text{cp}$	$t * \Delta m(P)', \text{psi}^2/\text{cp}$	$\Delta P, \text{psi}$
2.04E-02	9.17E-03	2.90E-03	4.46E+04	2.01E+04	3.17E-01	1.42E-01
2.13E-02	9.59E-03	3.21E-03	4.66E+04	2.10E+04	3.31E-01	1.49E-01
2.23E-02	1.00E-02	3.54E-03	4.88E+04	2.20E+04	3.46E-01	1.56E-01
2.33E-02	1.05E-02	3.91E-03	5.10E+04	2.30E+04	3.62E-01	1.63E-01
2.44E-02	1.10E-02	4.32E-03	5.34E+04	2.40E+04	3.79E-01	1.71E-01
2.55E-02	1.15E-02	4.78E-03	5.58E+04	2.51E+04	3.96E-01	1.78E-01
2.67E-02	1.20E-02	5.28E-03	5.84E+04	2.63E+04	4.15E-01	1.87E-01
2.79E-02	1.26E-02	5.83E-03	6.11E+04	2.75E+04	4.34E-01	1.95E-01
2.92E-02	1.31E-02	6.44E-03	6.39E+04	2.87E+04	4.53E-01	2.04E-01
8.97E-02	4.04E-02	7.81E-02	1.96E+05	8.83E+04	1.39E+00	6.27E-01
9.38E-02	4.22E-02	8.63E-02	2.05E+05	9.24E+04	1.46E+00	6.56E-01
9.81E-02	4.42E-02	9.53E-02	2.15E+05	9.66E+04	1.52E+00	6.86E-01
1.03E-01	4.62E-02	1.05E-01	2.25E+05	1.01E+05	1.59E+00	7.17E-01
1.07E-01	4.83E-02	1.16E-01	2.35E+05	1.06E+05	1.67E+00	7.50E-01
1.12E-01	5.05E-02	1.29E-01	2.46E+05	1.11E+05	1.74E+00	7.85E-01
1.17E-01	5.28E-02	1.42E-01	2.57E+05	1.16E+05	1.82E+00	8.21E-01
1.23E-01	5.53E-02	1.57E-01	2.69E+05	1.21E+05	1.91E+00	8.59E-01
1.28E-01	5.78E-02	1.73E-01	2.81E+05	1.26E+05	2.00E+00	8.98E-01
1.34E-01	6.05E-02	1.92E-01	2.94E+05	1.32E+05	2.09E+00	9.39E-01
1.41E-01	6.32E-02	2.12E-01	3.08E+05	1.38E+05	2.18E+00	9.82E-01
1.47E-01	6.62E-02	2.34E-01	3.22E+05	1.45E+05	2.28E+00	1.03E+00
1.54E-01	6.92E-02	2.59E-01	3.36E+05	1.51E+05	2.39E+00	1.07E+00
1.61E-01	7.24E-02	2.86E-01	3.52E+05	1.58E+05	2.50E+00	1.12E+00
1.68E-01	7.57E-02	3.16E-01	3.68E+05	1.66E+05	2.61E+00	1.18E+00
1.76E-01	7.92E-02	3.49E-01	3.85E+05	1.73E+05	2.73E+00	1.23E+00
1.84E-01	8.28E-02	3.85E-01	4.03E+05	1.81E+05	2.86E+00	1.29E+00
1.92E-01	8.66E-02	4.26E-01	4.21E+05	1.89E+05	2.99E+00	1.35E+00
6.77E-01	3.04E-01	6.96E+00	1.48E+06	6.65E+05	1.05E+01	4.72E+00
7.08E-01	3.18E-01	7.69E+00	1.55E+06	6.96E+05	1.10E+01	4.94E+00
7.40E-01	3.33E-01	8.50E+00	1.62E+06	7.28E+05	1.15E+01	5.17E+00
7.74E-01	3.48E-01	9.39E+00	1.69E+06	7.62E+05	1.20E+01	5.41E+00

8.10E-01	3.65E-01	1.04E+01	1.77E+06	7.98E+05	1.26E+01	5.67E+00
8.47E-01	3.82E-01	1.15E+01	1.85E+06	8.37E+05	1.32E+01	5.94E+00
8.86E-01	4.01E-01	1.27E+01	1.94E+06	8.78E+05	1.38E+01	6.23E+00
9.26E-01	4.22E-01	1.40E+01	2.03E+06	9.23E+05	1.44E+01	6.55E+00
9.69E-01	4.44E-01	1.55E+01	2.12E+06	9.72E+05	1.51E+01	6.90E+00
1.01E+00	4.69E-01	1.71E+01	2.22E+06	1.03E+06	1.58E+01	7.28E+00
1.06E+00	4.96E-01	1.89E+01	2.32E+06	1.08E+06	1.65E+01	7.70E+00
1.11E+00	5.26E-01	2.09E+01	2.43E+06	1.15E+06	1.73E+01	8.17E+00
1.17E+00	5.59E-01	2.30E+01	2.55E+06	1.22E+06	1.81E+01	8.69E+00
1.22E+00	5.97E-01	2.55E+01	2.68E+06	1.31E+06	1.90E+01	9.27E+00
1.28E+00	6.38E-01	2.81E+01	2.81E+06	1.40E+06	1.99E+01	9.92E+00
1.35E+00	6.85E-01	3.11E+01	2.95E+06	1.50E+06	2.10E+01	1.06E+01
1.42E+00	7.37E-01	3.43E+01	3.11E+06	1.61E+06	2.21E+01	1.14E+01
1.50E+00	7.95E-01	3.79E+01	3.27E+06	1.74E+06	2.32E+01	1.24E+01
1.58E+00	8.60E-01	4.19E+01	3.45E+06	1.88E+06	2.45E+01	1.34E+01
1.67E+00	9.32E-01	4.63E+01	3.65E+06	2.04E+06	2.59E+01	1.45E+01
3.38E+00	2.43E+00	1.39E+02	7.38E+06	5.32E+06	5.24E+01	3.78E+01
3.63E+00	2.66E+00	1.53E+02	7.94E+06	5.82E+06	5.64E+01	4.13E+01
3.91E+00	2.91E+00	1.70E+02	8.55E+06	6.37E+06	6.07E+01	4.52E+01
4.21E+00	3.18E+00	1.87E+02	9.21E+06	6.96E+06	6.54E+01	4.94E+01
4.54E+00	3.48E+00	2.07E+02	9.94E+06	7.62E+06	7.06E+01	5.41E+01
4.91E+00	3.81E+00	2.29E+02	1.07E+07	8.33E+06	7.62E+01	5.92E+01
5.30E+00	4.17E+00	2.53E+02	1.16E+07	9.12E+06	8.24E+01	6.47E+01
5.74E+00	4.56E+00	2.79E+02	1.26E+07	9.97E+06	8.91E+01	7.08E+01
6.21E+00	4.99E+00	3.08E+02	1.36E+07	1.09E+07	9.65E+01	7.75E+01
1.85E+01	1.60E+01	1.13E+03	4.04E+07	3.51E+07	2.87E+02	2.49E+02
2.01E+01	1.75E+01	1.25E+03	4.41E+07	3.84E+07	3.13E+02	2.72E+02
2.20E+01	1.92E+01	1.38E+03	4.81E+07	4.20E+07	3.41E+02	2.98E+02
2.40E+01	2.10E+01	1.52E+03	5.24E+07	4.59E+07	3.72E+02	3.26E+02
2.62E+01	2.29E+01	1.68E+03	5.72E+07	5.02E+07	4.06E+02	3.56E+02
2.85E+01	2.51E+01	1.86E+03	6.25E+07	5.49E+07	4.43E+02	3.90E+02
3.12E+01	2.75E+01	2.05E+03	6.82E+07	6.01E+07	4.84E+02	4.27E+02
3.40E+01	3.00E+01	2.27E+03	7.44E+07	6.57E+07	5.29E+02	4.67E+02
3.72E+01	3.29E+01	2.51E+03	8.13E+07	7.19E+07	5.77E+02	5.10E+02
4.06E+01	3.60E+01	2.77E+03	8.88E+07	7.86E+07	6.30E+02	5.58E+02
4.43E+01	3.93E+01	3.06E+03	9.70E+07	8.60E+07	6.89E+02	6.11E+02
4.84E+01	4.30E+01	3.38E+03	1.06E+08	9.41E+07	7.52E+02	6.68E+02
5.29E+01	4.71E+01	3.74E+03	1.16E+08	1.03E+08	8.22E+02	7.31E+02

5.78E+01	5.15E+01	4.13E+03	1.27E+08	1.13E+08	8.98E+02	8.00E+02
6.32E+01	5.63E+01	4.56E+03	1.38E+08	1.23E+08	9.82E+02	8.75E+02
6.91E+01	6.16E+01	5.04E+03	1.51E+08	1.35E+08	1.07E+03	9.57E+02
7.55E+01	6.74E+01	5.57E+03	1.65E+08	1.47E+08	1.17E+03	1.05E+03
2.88E+02	2.59E+02	2.49E+04	6.31E+08	5.67E+08	4.48E+03	4.02E+03
3.15E+02	2.83E+02	2.75E+04	6.90E+08	6.20E+08	4.90E+03	4.40E+03
3.45E+02	3.10E+02	3.04E+04	7.54E+08	6.78E+08	5.36E+03	4.81E+03
3.77E+02	3.39E+02	3.36E+04	8.25E+08	7.42E+08	5.86E+03	5.27E+03
4.13E+02	3.71E+02	3.71E+04	9.03E+08	8.11E+08	6.41E+03	5.76E+03
4.51E+02	4.06E+02	4.10E+04	9.87E+08	8.88E+08	7.01E+03	6.30E+03
4.94E+02	4.44E+02	4.53E+04	1.08E+09	9.71E+08	7.67E+03	6.89E+03
5.40E+02	4.85E+02	5.00E+04	1.18E+09	1.06E+09	8.38E+03	7.54E+03
5.90E+02	5.31E+02	5.53E+04	1.29E+09	1.16E+09	9.17E+03	8.25E+03
6.46E+02	5.81E+02	6.11E+04	1.41E+09	1.27E+09	1.00E+04	9.02E+03
6.64E+03	5.97E+03	8.18E+05	1.45E+10	1.31E+10	1.03E+05	9.27E+04
7.26E+03	6.53E+03	9.03E+05	1.59E+10	1.43E+10	1.13E+05	1.01E+05
7.94E+03	7.14E+03	9.98E+05	1.74E+10	1.56E+10	1.23E+05	1.11E+05
8.69E+03	7.80E+03	1.10E+06	1.90E+10	1.71E+10	1.35E+05	1.21E+05
9.50E+03	8.53E+03	1.22E+06	2.08E+10	1.87E+10	1.48E+05	1.33E+05
1.04E+04	9.33E+03	1.35E+06	2.27E+10	2.04E+10	1.61E+05	1.45E+05
1.14E+04	1.02E+04	1.49E+06	2.49E+10	2.23E+10	1.77E+05	1.58E+05
1.24E+04	1.12E+04	1.64E+06	2.72E+10	2.44E+10	1.93E+05	1.73E+05
1.36E+04	1.22E+04	1.82E+06	2.97E+10	2.67E+10	2.11E+05	1.89E+05
1.49E+04	1.33E+04	2.01E+06	3.25E+10	2.92E+10	2.31E+05	2.07E+05
1.63E+04	1.46E+04	2.22E+06	3.56E+10	3.19E+10	2.52E+05	2.26E+05
1.78E+04	1.59E+04	2.45E+06	3.89E+10	3.49E+10	2.76E+05	2.48E+05
1.94E+04	1.74E+04	2.71E+06	4.25E+10	3.81E+10	3.02E+05	2.71E+05
2.13E+04	1.91E+04	2.99E+06	4.65E+10	4.17E+10	3.30E+05	2.96E+05
2.32E+04	2.08E+04	3.31E+06	5.08E+10	4.56E+10	3.61E+05	3.24E+05
7.41E+04	6.64E+04	1.21E+07	1.62E+11	1.45E+11	1.15E+06	1.03E+06
8.10E+04	7.26E+04	1.34E+07	1.77E+11	1.59E+11	1.26E+06	1.13E+06
8.86E+04	7.94E+04	1.48E+07	1.94E+11	1.74E+11	1.38E+06	1.23E+06
9.69E+04	8.68E+04	1.63E+07	2.12E+11	1.90E+11	1.50E+06	1.35E+06
1.06E+05	9.49E+04	1.80E+07	2.32E+11	2.08E+11	1.65E+06	1.47E+06
1.16E+05	1.04E+05	1.99E+07	2.53E+11	2.27E+11	1.80E+06	1.61E+06
1.27E+05	1.14E+05	2.20E+07	2.77E+11	2.48E+11	1.97E+06	1.76E+06
1.39E+05	1.24E+05	2.43E+07	3.03E+11	2.72E+11	2.15E+06	1.93E+06
1.51E+05	1.36E+05	2.69E+07	3.31E+11	2.97E+11	2.35E+06	2.11E+06

1.66E+05	1.49E+05	2.97E+07	3.62E+11	3.25E+11	2.57E+06	2.31E+06
1.81E+05	1.63E+05	3.28E+07	3.96E+11	3.56E+11	2.81E+06	2.53E+06
1.98E+05	1.78E+05	3.62E+07	4.33E+11	3.89E+11	3.08E+06	2.76E+06
2.17E+05	1.95E+05	4.00E+07	4.74E+11	4.26E+11	3.36E+06	3.02E+06
2.37E+05	2.13E+05	4.42E+07	5.18E+11	4.66E+11	3.68E+06	3.31E+06
2.59E+05	2.33E+05	4.89E+07	5.67E+11	5.10E+11	4.03E+06	3.62E+06
2.83E+05	2.55E+05	5.40E+07	6.20E+11	5.57E+11	4.40E+06	3.96E+06
3.10E+05	2.79E+05	5.97E+07	6.78E+11	6.10E+11	4.82E+06	4.33E+06
3.39E+05	3.05E+05	6.59E+07	7.42E+11	6.67E+11	5.27E+06	4.74E+06
3.71E+05	3.34E+05	7.29E+07	8.11E+11	7.30E+11	5.76E+06	5.18E+06
4.06E+05	3.65E+05	8.05E+07	8.88E+11	7.98E+11	6.30E+06	5.67E+06
4.44E+05	3.99E+05	8.90E+07	9.71E+11	8.74E+11	6.89E+06	6.20E+06
4.85E+05	4.37E+05	9.83E+07	1.06E+12	9.56E+11	7.54E+06	6.78E+06