

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE ARCILLA Y MINERALES
EN UN YACIMIENTO SOBRE EL DESARROLLO DE UN PROCESO DE
COMBUSTIÓN IN SITU**

MAYLIN DAYANA GARCIA MONTEJO

CHRISTIAN DAVID PATIÑO RAMIREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE ARCILLA Y MINERALES
EN UN YACIMIENTO SOBRE EL DESARROLLO DE UN PROCESO DE
COMBUSTIÓN IN SITU**

MAYLIN DAYANA GARCIA MONTEJO

CHRISTIAN DAVID PATIÑO RAMIREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

INGENIERO DE PETRÓLEOS

**M.Sc SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
DIRECTOR**

**Ing. LUIS ROBERTO OLIVEROS GÓMEZ
Co-DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A ti Dios por regalarme la oportunidad de ser una mejor persona cada día, por ser mi guía en cada paso que doy y por iluminar mi mente y mi corazón.

A mi papi divino, Nahún García, por ser un gran ejemplo para mí, realmente un modelo a seguir, gracias por todo el amor, dedicación y enseñanzas que me has regalado.

A mi mami hermosa, Yulieth Montejo, por estar siempre pendiente de mis cosas, por todas sus oraciones para que todo saliera bien, por ser esa gran mujer que admiro... gracias mami.

A mi hermanita Pao, por tantas alegrías, por ser mi gotica de agua, realmente mi orgullo.

A mi familia, que siempre se ha sentido orgullosa de mi, gracias por creer en mi... los amo con todito mi corazón.

A mi principito Rony, por tantos momentos bonitos, por ser mi apoyo constante, mi presente y mi futuro...Te amo.

A mi amiguita Yesi, gracias por tantos años de amistad incondicional, sé que el futuro te depara cosas buenas.

A Chris, mi compañerito de proyecto, por hacer de este trabajo una bonita experiencia.

A Luis, por tanta ayuda transmitida para la realización de este trabajo, muchas gracias, más que mi jefecito, mi amigo.

A mis amigas, Vane Thomas, Jime Gómez y Adri Durán, que se convirtieron en una parte fundamental de mi vida, las llevo en mi corazón.

May Garcia

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico principalmente a mi madre, por ser el motor más importante, por su constante apoyo y guía durante toda mi vida. Gracias por tanto Má!

A mi abuela, por ser mi segunda madre, por sus consejos y sabiduría que siempre me han acompañado.

A mi hermana, por siempre estar ahí cuando la necesito.

A mi familia, porque siempre estuvieron pendientes de mis metas y logros.

A May, mi compañera de proyecto, por la buena energía y compañerismo que siempre hubo en el desarrollo del proyecto.

A mis amigos y compañeros que de alguna manera u otra ayudaron en el desarrollo de toda mi carrera y de este proyecto.

Christian David.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería de Petróleos y a todos los profesores que nos brindaron los conocimientos necesarios para formarnos como profesionales.

Al ingeniero Samuel Fernando Muñoz Navarro por ser nuestra guía y brindarnos sus conocimientos durante el trabajo realizado en el grupo de investigación recobro mejorado.

Al ingeniero Luis Oliveros por su constante apoyo, dedicación y gran disposición ante cualquier duda, gracias por ser más que nuestro jefe, un amigo.

Jorge Palma por sus aportes en la elaboración de este proyecto.

A los ingenieros Enrique, María Mónica, Xiomara y María Carolina por cada ayudita en la realización de los avances del proyecto, por tantos momentos compartidos, por las risas y por la amistad.

A nuestra familia porque sin sus motivaciones este logro no hubiese sido posible.

A nuestros compañeros del grupo de recobro, por el apoyo desinteresado que nos brindaron durante nuestra estancia en el grupo.

A todas aquellas personas que hicieron parte de este camino.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1 FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	21
1.1 COMBUSTIÓN SECA.....	22
1.2 COMBUSTIÓN FRONTAL HÚMEDA	24
1.3 COMBUSTIÓN EN REVERSA	26
1.4 GENERACIÓN DE LA COMBUSTIÓN	27
1.4.1 Inyección de un material oxidante (normalmente aire).....	27
1.4.2 Generación de la ignición o encendido del combustible.....	28
1.4.3 Continuación de la inyección de aire.....	29
1.1 REACCIONES QUÍMICAS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> 30	
1.4.4 Reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO) o reacciones de adición	31
1.4.5 Reacciones de oxidación a temperaturas intermedias (ITO) o reacciones de pirólisis	32
1.4.6 Reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO).....	34
1.4.7 Cinética de las reacciones	37
2 FUNDAMENTOS NECESARIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS ARCILLAS SOBRE EL DESARROLLO DE LA COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	39
2.1 PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....	39
2.1.1 Esquema de las pruebas de tubo de combustión	40
2.1.2 Procedimiento llevado cabo a nivel experimental	44
2.1.3 Parámetros involucrados en las pruebas de tubo	45
2.2 ARCILLAS Y MINERALES DE ARCILLA.....	49
2.2.1 Concepto de los minerales de arcillas.....	50

2.2.2	Clasificación de las arcillas	52
2.2.3	Estructura de las arcillas	53
2.2.4	Grupos minerales de las arcillas	56
2.2.5	Propiedades físico-químicas de las arcillas.....	60
2.2.6	Propiedades térmicas de las rocas	63
2.2.7	Comportamiento de las arcillas a altas temperaturas.....	66
2.2.8	Componentes metálicos de las arcillas	68
3	MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN	
	<i>IN SITU</i>	70
3.1	GENERALIDADES DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	70
3.1.1	Información necesaria para la simulación numérica.....	71
3.1.2	Tipos de enmallados	72
3.2	DESARROLLO DEL MODELO BASE DE SIMULACIÓN DEL PROCESO	
	DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	73
3.2.1	Enmallado de simulación	73
3.2.2	Propiedades petrofísicas del sistema.....	75
3.2.3	Propiedades térmicas del sistema.....	78
3.2.4	Modelo de fluidos base	78
3.2.5	Modelo base de reacciones	80
3.2.6	Información adicional de la simulación del modelo base.....	81
3.2.7	Resultados preliminares del modelo base de simulación.....	84
4	DESARROLLO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA QUE	
	REPRESENTAN LA PRESENCIA DE ARCILLAS EN LA MATRIZ DE LA ROCA	
	EN EL DESARROLLO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>	91
4.1	RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD CALORÍFICA Y EL PORCENTAJE	
	DE ARCILLA PRESENTE EN LA ROCA	91

4.2	INTERFAZ NUMÉRICA PARA LA SIMULACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS.	95
5	EFFECTO DE LAS ARCILLAS Y MINERALES SOBRE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i>.....	98
5.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS	99
5.1.1	Perfiles de temperatura	102
5.1.2	Picos de temperatura	102
5.1.3	Gases de combustión.....	108
5.1.4	Parámetros de Combustión.....	112
	CONCLUSIONES	125
	RECOMENDACIONES.....	127
	BIBLIOGRAFIA	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de zonas de combustión.....	24
Figura 2. Diagramas de zonas de combustión húmeda	26
Figura 3. Diagrama inyección de aire o gas enriquecido con oxígeno	27
Figura 4. Diagrama generación de ignición espontánea	28
Figura 5. Diagrama generación de la ignición inducida o artificial.....	29
Figura 6. Temperatura de las reacciones del proceso de combustión en función de la tasa del oxígeno consumido.....	36
Figura 7. Equipo de pruebas de laboratorio	41
Figura 8. Tubo de combustión.....	43
Figura 9. Datos recopilados e información obtenida de la prueba	46
Figura 10. Estructura tetraédrica de las arcillas	54
Figura 11. Estructura octaédrica de las arcillas.....	55
Figura 12. Red hexagonal	56
Figura 13. Diagrama esquemático de la estructura de una capa de caolinita	57
Figura 14. Diagrama esquemático de la estructura de una capa de montmorillonita	58
Figura 15. Diagrama esquemático de la estructura de una capa de montmorillonita	60
Figura 16. Flujo de calor por conducción en una placa rectangular	65
Figura 17. Esquema comparativo modelo físico y modelo numérico	74
Figura 18. Curvas de permeabilidades relativas	77
Figura 19. Esquema de las reacciones de oxidación presentes en el modelo base	81
Figura 20. Esquema del calendario de inyección-producción	84
Figura 21. Temperatura promedio modelo base (100% Arena)	85
Figura 22. Temperatura máxima registrada	86
Figura 23. Picos de temperatura modelo base de simulación (100% Arena).....	87

Figura 24. Variación del coque depositado	88
Figura 25. Producción de los gases de combustión.....	89
Figura 26. Factor de Recobro en función del tiempo de simulación.....	90
Figura 27. Interfaz de la herramienta BUILDER. Propiedad de capacidad calorífica	96
Figura 28. Esquema comparativo de los modelos de simulación.....	97
Figura 29. Parámetros para analizar en cada uno de los modelos de simulación	99
Figura 30. Comparación del factor de recobro de los modelos planteados	100
Figura 31. Comparación del comportamiento de la saturación de aceite en los modelos a diferentes intervalos de tiempo.....	101
Figura 32. Picos de temperatura para cada uno de los modelos	103
Figura 33. Temperatura máxima para cada caso.....	104
Figura 34. Depositación y consumo de coque	105
Figura 35. Posición del frente de combustión	106
Figura 36. Comportamiento de la temperatura de los modelos de simulación a diferentes intervalos de tiempo	107
Figura 37. Comparación de la temperatura promedio.....	108
Figura 38. Comparación de la fracción molar de CO ₂	110
Figura 39. Comparación de la fracción molar de N ₂ y O ₂	111
Figura 40. Comportamiento de la producción de CO ₂ y N ₂ en función del porcentaje de arcilla.....	112
Figura 41. Comportamiento de la Relación H/C y Aire/Comb. en función del porcentaje de arcilla.....	117
Figura 42. Comportamiento de la Relación H/C y Aire/Comb, en función del porcentaje de arcilla.....	119
Figura 43. Comportamiento de la relación H/C y Aire/Comb. en función del porcentaje de arcilla.....	122
Figura 44. Comparación de la relación aire/aceite para cada uno de los modelos desarrollados	123

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Screening del proceso de combustión <i>in situ</i>	30
Tabla 2. Resumen de las características más importantes de las reacciones de oxidación.....	37
Tabla 3. Clasificación de las arcillas.....	53
Tabla 4. Dimensiones del Grid	74
Tabla 5. Discretización del Grid.....	75
Tabla 6. Condiciones iniciales	75
Tabla 7. Condiciones petrofísicas.....	76
Tabla 8. End points.....	76
Tabla 9. Propiedades térmicas	78
Tabla 10. Propiedades del fluido	79
Tabla 11. Composición del fluido.....	79
Tabla 12. Características del coque	80
Tabla 13. Reacciones químicas.....	81
Tabla 14. Ubicación de las termocuplas.....	82
Tabla 15. Propiedades características de los pozos	83
Tabla 16. Valores de los parámetros para el cálculo de M para el modelo base ..	92
Tabla 17. Valores de capacidad calorífica para diferentes rocas secas	93
Tabla 18. Modelos de simulación planteados.....	94
Tabla 19. Propiedades de la roca para el desarrollo de cada modelo de simulación	95
Tabla 20. Composición del gas para cada modelo.....	111
Tabla 21. Parámetros de combustión.....	113
Tabla 22. Relación Hidrogeno/Carbono para cada modelo de simulación realizado	114
Tabla 23. Relación O ₂ /Combustible para cada modelo de simulación realizado.	115

Tabla 24. Relación Aire/Combustible para cada modelo de simulación realizado	116
Tabla 25. Aire requerido para la realización del proceso.....	118
Tabla 26. Relación Aire/Combustible para cada modelo de simulación realizado	119
Tabla 27. Relación CO+CO ₂ /N ₂ para cada modelo de simulación realizado.....	120
Tabla 28. Fracción de O ₂ para cada modelo de simulación realizado	121
Tabla 29. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros objeto de estudio	124

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE ARCILLA Y MINERALES EN UN YACIMIENTO SOBRE EL DESARROLLO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

AUTORES: Maylin Dayana Garcia Montejo
Christian David Patiño Ramirez**

PALABRAS CLAVES: Arcillas, minerales, yacimiento, simulación, Combustión *in situ*.

DESCRIPCIÓN:

El proceso de combustión *in situ* es un método de recobro térmico cuyo objetivo es inyectar un gas con contenido de oxígeno al yacimiento generando reacciones químicas con el crudo. Debido a las altas temperaturas que alcanza el frente de combustión y la liberación de calor en este proceso, se produce una reducción de la viscosidad del crudo permitiendo finalmente su extracción.

Existen diferentes parámetros que afectan el proceso de combustión *in situ*, los cuales perjudican de manera directa la estabilidad y el avance del frente de combustión, incidiendo directamente en la cantidad de crudo recuperado por el desarrollo del proceso; entre los parámetros más importantes se encuentran la cantidad de combustible, la presión de inyección y el aire inyectado

El objetivo de esta investigación es evaluar y comparar el efecto que tiene la presencia de arcillas y minerales en una muestra de yacimiento sometida a un proceso de combustión *in situ*, planteando diferentes modelos de simulación numérica con la herramienta STARS del software CMG Ltda. Lo anterior se desarrollará mediante la realización de un modelo base constituido por una arena limpia y tres modelos a los cuales se les variará la capacidad calorífica para simular la presencia de arcilla dispersa en diferentes proporciones.

Los resultados de la simulación numérica correspondiente a cada modelo planteado serán comparados entre sí teniendo en cuenta ciertos factores tales como los gases de combustión producidos, las tasas de inyección requeridas, la velocidad de avance del frente de combustión, las temperaturas a las cuales ocurren las reacciones, la cantidad de combustible y aire requerido y los perfiles de temperatura de los procesos, con el fin de determinar y evaluar si la presencia de arcillas en el yacimiento trae consecuencias positivas o no al proceso de combustión *in situ*.

*Tesis de Pregrado.

**Facultad de Ingenierías físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Director: M.Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co-Director: Ing. Luis Roberto Oliveros Gomez.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF THE PRESENCE OF CLAYS AND MINERALS IN A RESERVOIR ON THE DEVELOPMENT OF A COMBUSTION IN SITU PROCESS^{*}

AUTHORS: Maylin Dayana Garcia Montejo
Christian David Patiño Ramirez^{**}

KEY WORDS: Clays, minerals, reservoir, simulation, In situ combustion.

DESCRIPTION:

In-situ combustion process is a thermal oil recovery method in which a gas enriched with oxygen is injected into an oil reservoir it generates chemical reactions with oil. Due to high temperatures in the front combustion and release heat in this process there is a reduction of the oil viscosity allowing it is extracted finally.

There are several parameters which impact an in-situ combustion process due to damage the stability and advancement of the combustion front, acting directly on the amount of oil recovered by the development process; between parameters most important are the, the amount of fuel injection pressure and the injected air.

Objective of this research is evaluate and compare the effect of clays and minerals In a plot reservoir over an in-situ combustion process considering different numerical simulation models with implement STARS of software CMG Ltda. Therefore it will developed though performing a base model with clear sand, and three models to which they will vary the heat capacity to simulate the dispersed clay in different proportions.

Numerical simulation results for each model will compare with each other proposed considering factors as the recovery factor, gases combustion produced, required injection rate, speed of the combustion front, temperature which reactions occur, the amount of fuel and air required and temperature profiles to identify and evaluate whether presence of clays into reservoir brings some effect positive or no to the in-situ combustion process.

^{*}Tesis de Pregrado.

^{**}Physico-Chemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering.

Director: M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co-director: Ing. Luis Roberto Oliveros Gómez.

INTRODUCCIÓN

Debido al agotamiento de yacimientos de crudo liviano y la gran cantidad de reservas de crudo pesado que existen en el mundo, se ha hecho indispensable para la industria petrolera la utilización de métodos de recobro que ayuden a la extracción de este tipo de crudo en yacimientos no convencionales. Este tipo de yacimientos son una fuente potencial de hidrocarburos, caracterizados por su baja gravedad API, alta viscosidad, poca permisibilidad al flujo, bajas tasas de producción y bajos factores de recobro, lo que dificulta la producción del fluido y convierte en indispensable la utilización de técnicas que ayuden a mejorar la eficiencia de los procesos de extracción.

La recuperación térmica ayuda a definir cómo y cuál es el proceso más eficiente dentro del yacimiento para dar lugar a la producción de fluidos a través de los pozos. Uno de los procesos más atractivos e investigados por la industria es la combustión *in situ*, pues la liberación de calor en el yacimiento reduce la viscosidad, logra un buen desplazamiento y mejora la extracción del crudo. Esta técnica de recobro se basa en la liberación de un frente de combustión debido a las reacciones de oxidación entre el oxígeno presente en el aire inyectado y el hidrocarburo que se encuentra en el yacimiento, dando como resultado el incremento de la temperatura como consecuencia de la liberación de energía producto de las reacciones. Uno de los principales resultados que se presentan a raíz de las reacciones químicas es la depositación y consumo de combustible, el cual es comúnmente denominado coque. Este último es el principal constituyente de la fracción más pesada del crudo, por ende la combustión se genera a temperaturas muy altas.

Existen diversas pruebas experimentales que ayudan a determinar la factibilidad de la implementación de un proceso de combustión *in situ*, una de ellas es la

prueba de tubo de combustión, la cual consiste en evaluar el comportamiento y la propagación del frente de combustión a escala de laboratorio pero lo más cercano posible a las condiciones de yacimiento. La información que se puede obtener posterior a la realización de estas pruebas incluye perfiles de temperatura y producción de gases de combustión, por ello es posible realizar un análisis detallado que permita observar la existencia de parámetros fundamentales que se destacan durante la prueba como lo son requerimiento de aire, picos de temperatura, consumo de oxígeno y velocidad del frente de combustión.

Es oportuno mencionar que Colombia es un país que cuenta con yacimientos de crudo pesado, por lo que además de ser importante la implementación de un método de recobro de este tipo que permita la fácil extracción del crudo, es de vital importancia realizar una caracterización del yacimiento con ayuda del modelamiento numérico en pruebas de laboratorio, pues es muy probable que exista la presencia de compuestos arcillosos en la formación debido a que las arcillas constituyen cerca del 80% de la masa de la tierra.

La presente investigación fue realizada con el fin de determinar cuál es la incidencia de las arcillas presentes en la formación sobre el desarrollo de un proceso de combustión *in situ*, para lo cual se utilizó la herramienta de simulación numérica STARS de la compañía CMG. Con base en el modelo de simulación de tubo de combustión se realizó una variación a la capacidad calorífica para representar la distribución de las arcillas en la formación en cada escenario y posteriormente analizar los resultados obtenidos como parámetros operacionales y los parámetros de combustión, en una forma cuantitativa y cualitativa.

1 FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN *IN SITU*

La combustión *in situ* también llamado *fireflooding* es el proceso de recobro térmico más antiguo que existe actualmente, su comienzo se llevó a cabo hace 90 años atrás aproximadamente y desde entonces ha demostrado una alta eficiencia en el factor de recobro respecto a los diferentes procesos de recobro mejorado.

La combustión *in situ* es un proceso de recuperación térmica, basado en la liberación de calor en el yacimiento por medio de la inyección de un gas con contenido de oxígeno (generalmente es aire). Durante la reacción de oxidación, el aire reacciona quemando una porción del petróleo presente en el yacimiento para generar calor. Esta porción se encuentra entre 10 y 15% aproximadamente correspondiente al coque que forma el frente de combustión.

El momento en que el frente de combustión avanza desde el pozo inyector hacia el pozo productor, la energía liberada en las reacciones hace que se ocasione un aumento en la temperatura del yacimiento originando a su vez una disminución de la viscosidad y un mejoramiento parcial en las propiedades del crudo, este proceso es conocido como *upgrading*¹.

El objetivo del proceso de combustión *in situ* es calentar la formación mediante la generación de un frente de combustión con el fin disminuir la viscosidad del crudo y permitirle fluir para su posterior producción, aprovechando así los efectos que trae el desarrollo de las reacciones químicas que se llevan a cabo en el yacimiento, ya que estas reacciones cambian las características composicionales del fluido.

¹SARATHI, Partha. *In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices*. Oklahoma: 1999, p25.

1.1 COMBUSTIÓN SECA

El fluido inyectado en este proceso de combustión *in situ* es solamente aire o gas enriquecido con oxígeno, donde el avance del frente de combustión se da en la misma dirección al avance del fluido inyectado, por estas razones se le denomina combustión frontal seca, siendo esta la más utilizada en los procesos de combustión *in situ*.

Durante el avance del proceso de combustión *in situ*, es posible identificar siete zonas características que están presentes en el yacimiento, las cuales ayudan a entender mejor el proceso de combustión *in situ* (Figura 1).

- **Zona quemada.** Es denominada la zona quemada debido a que la combustión ya tuvo lugar en este sitio, generalmente se encuentra en las cercanías del pozo inyector y es por esta zona por donde el aire va a pasar, el cual va ir incrementando su temperatura a medida que atraviesa esta zona para así mantener el frente de combustión. Se puede encontrar residuos orgánicos sólidos no quemados que usualmente son llamados *coque*, debido a las altas temperaturas a la cual estuvo sometida esta zona, es probable que haya sufrido alteraciones en su mineralogía².
- **Zona de combustión.** En esta zona es donde ocurren las reacciones entre el oxígeno y el combustible, produciendo como resultado principalmente agua y gases de combustión (monóxido y dióxido de carbono), es por esta razón que usualmente su temperatura puede estar entre los 600 a 1200° F, este rango de temperatura depende de las propiedades de los fluidos reactivos³.

²SARATHI, Partha. In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices. Oklahoma: 1999, p27.

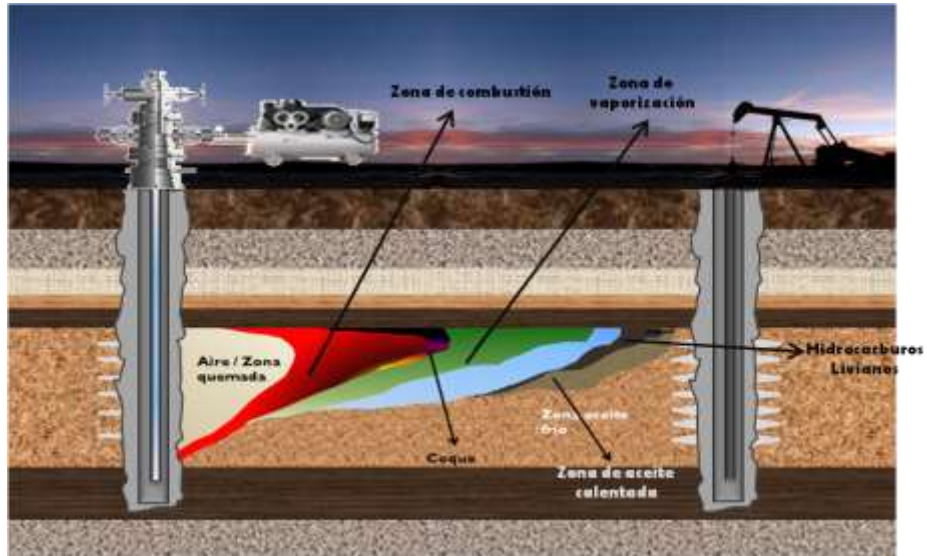
³BURGER, J., SOURIEAU, P. Thermal Methods of Oil Recovery. 1985.

- **Zona de craqueo y vaporización.** Es denominada zona de craqueo y vaporización debido a que allí los componentes más pesados del fluido hidrocarburo sufre craqueo térmico, dando así paso a la formación dióxido y monóxido de carbono, hidrocarburos vaporizados y coque, el cual es el combustible para el proceso de combustión. Los componentes más livianos del fluido hidrocarburo se vaporizan debido a las altas temperaturas presentes en esta zona y que soporta este fluido. Esta fracción vaporizada va siendo desplazada por los gases de combustión que provienen de la zona de combustión adyacente y esta fracción es reintegrada al crudo más adelante.
- **Zona de condensación.** Esta zona también es llamada la platea de vapor, cuenta con temperaturas que oscilan entre los 350 y 600° F, esta temperatura depende de la presión parcial del agua presente en la fase gaseosa⁴. Es aquí en esta zona donde los componentes livianos que se vaporizaron en la zona anterior se condensan para integrarse de nuevo al fluido hidrocarburo.
- **Banco de agua.** Debido a la disminución de la temperatura se condensa un banco de agua en esta zona y presenta una saturación de agua mayor a la saturación de agua inicial.
- **Banco de aceite.** Delante del banco de agua se presenta un banco de aceite con una saturación de aceite mayor a la saturación de aceite inicial, lo cual es debido al desplazamiento de aceite como consecuencia del mismo proceso de combustión *in situ*.

⁴BURGER, Op. cit. p353.

- **Zona aceite frío.** Esta zona es característica debido a que no ha tenido alteraciones con respecto a las otras zonas descritas anteriormente y se encuentra más adelante de la zona del banco de aceite, esta zona mantiene las mismas características iniciales del yacimiento.

Figura 1. Diagrama de zonas de combustión



1.2 COMBUSTIÓN FRONTAL HÚMEDA

Con el fin de optimizar una de las mayores desventajas de la combustión seca que es el desaprovechamiento del calor liberado debido a que el aire no transporta el calor de la mejor manera, se define la combustión húmeda, la cual consiste en la inyección de aire o gas enriquecido con oxígeno y agua, ya que el agua posee alta capacidad calorífica y puede transportar y absorber el calor más eficientemente que el aire.

El agua inyectada absorbe calor de la zona quemada y es convertida en vapor, el cual pasa a través de la zona de combustión y se asegura que el calor que tiene

el vapor sea llevado a las zonas frías del yacimiento aumentando de esta manera la eficiencia del proceso de combustión *in situ*.

De la misma manera que en la combustión seca, en la combustión frontal húmeda se pueden identificar siete zonas que ayudan a comprender de mejor manera este proceso (Figura 2).

1. **Zona quemada.** Esta zona es la zona quemada debido a que el frente de combustión ya tuvo su proceso en este sitio, se presenta también un flujo bifásico debido a que una parte del agua inyectada no se logra vaporizar.

2. **Zona de combustión.** En esta zona se comienza a observar la estabilización de frente de vaporización, por esta razón y por las altas temperaturas presentes en esta zona toda el agua presente se encuentra en forma de vapor. Los fluidos que saturan la roca son el vapor, una baja cantidad de residuos orgánicos y aire.

3. **Zona de craqueo y vaporización.** Esta zona está asociada a la formación del coque; debido al craqueo térmico que sufren los componentes más pesados del hidrocarburo y sus componentes más livianos se vaporizan debido a las altas temperaturas de esta zona.

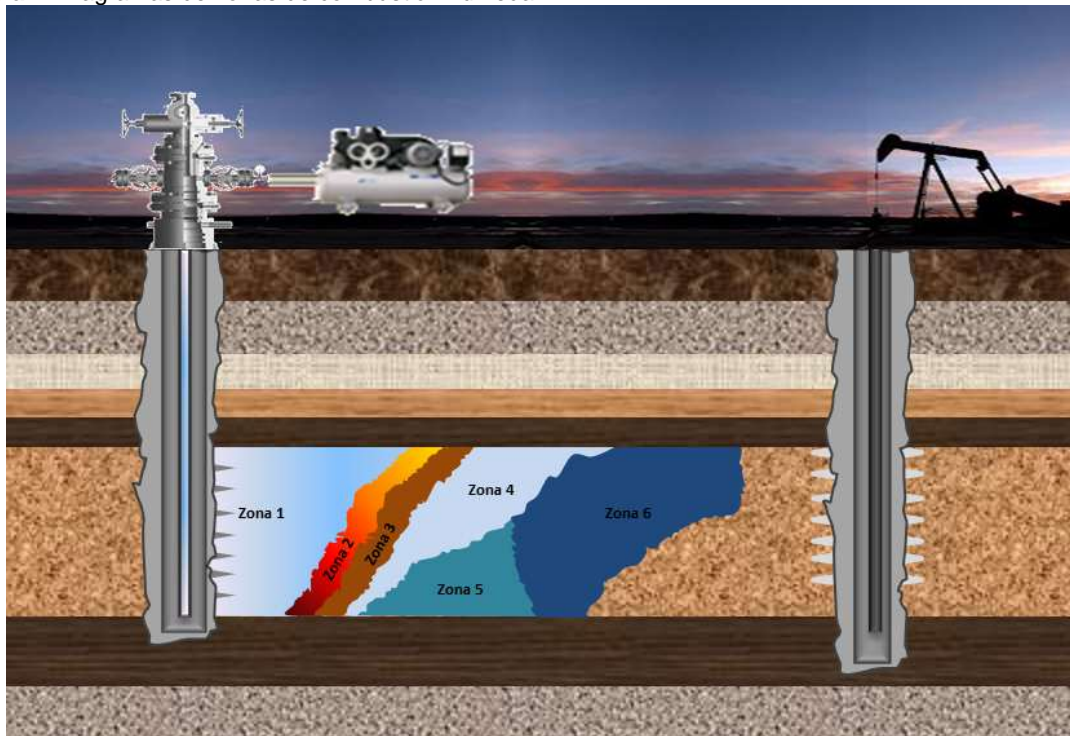
4. **Zona de compuestos gaseosos.** Debido a la inyección de agua y vapor esta zona se caracteriza por la presencia de muchos componentes gaseosos principalmente vapor lo cual va ayudar a aumentar la eficiencia de la transferencia del calor generado en las zonas anteriores.

5. **Banco de agua.** La cantidad de agua presente en esta zona depende totalmente de la tasa de inyección de agua con la cual se desarrolle el proceso.

6. **Banco de aceite.** Debido al efecto del aumento de la temperatura se observa una reducción de la viscosidad del crudo en esta zona.

7. **Zona aceite frio.** Esta zona se ve disminuida en comparación con la combustión húmeda debido a un aumento en la eficiencia del transporte del calor.

Figura 2. Diagramas de zonas de combustión húmeda



1.3 COMBUSTIÓN EN REVERSA

La combustión en reversa es una variación de la configuración del proceso de combustión *in situ*, esta variación es en la dirección en la que se inyecta el aire o gas enriquecido con oxígeno, es decir el aire va a ser inyectado en sentido contrario al avance del frente de combustión, generalmente este proceso se lleva cabo con el fin de evitar el taponamiento de líquidos que se puede producir en la

combustión frontal, debido a que el hidrocarburo caliente tiene que pasar a través de la zona de aceite frío.

Según lo descrito anteriormente el avance del frente de combustión va a ser del pozo productor al pozo inyector y la dirección de inyección del aire va a ser en el sentido contrario, generalmente en este tipo de combustión se requiere cerca del doble de aire inyectado con el fin de un óptimo desempeño⁵.

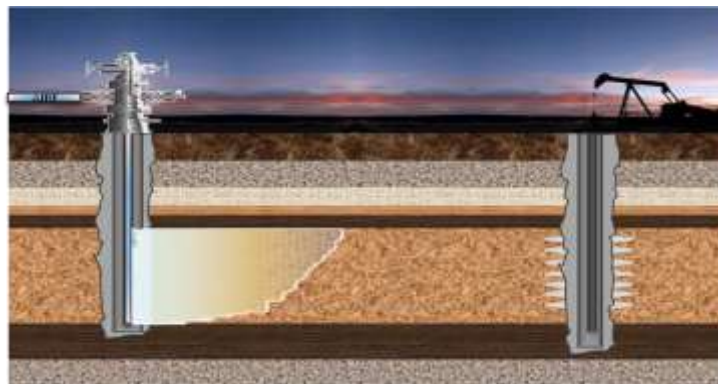
1.4 GENERACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

El proceso de combustión *in situ* se debe conocer a fondo para una mayor comprensión de este, por ello la generación de la combustión se puede dividir en tres etapas⁶.

1.4.1 Inyección de un material oxidante (normalmente aire)

El oxígeno reacciona con el crudo (reacción exotérmica). La inyección continúa hasta lograr una alta permeabilidad relativa al aire que permita inyectar a tasas elevadas.

Figura 3. Diagrama inyección de aire o gas enriquecido con oxígeno



⁵REYES, Yorleth. MENDEZ, Gilberto. Metodología Integrada para el Monitoreo y Seguimiento de Yacimientos Sometidos a Procesos de Combustión *In situ*. 2009, p33.

⁶YATTE, Camilo, Seminario de combustión *in situ*, 2010, p21.

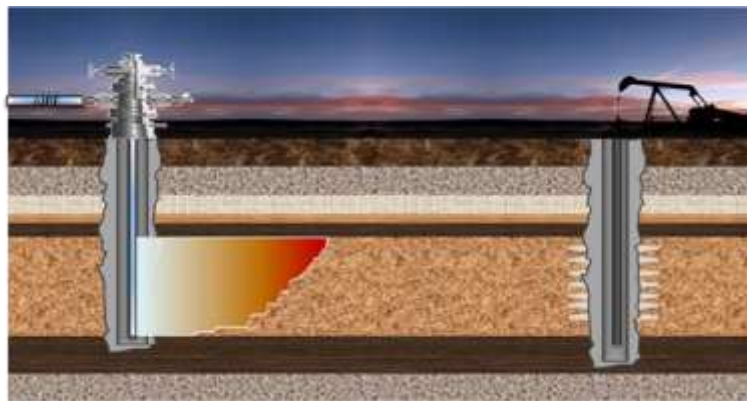
En esta etapa el oxígeno reacciona con el crudo exotérmicamente lo que ocasiona un aumento de temperatura, donde la velocidad de reacción depende de la temperatura inicial del yacimiento. La inyección continúa hasta lograr una alta permeabilidad relativa al aire que permita inyectar a tasas elevadas (Figura 3).

La inyección de aire en el yacimiento se comprueba analizando los gases producidos en el pozo productor (presencia de N_2).

1.4.2 Generación de la ignición o encendido del combustible

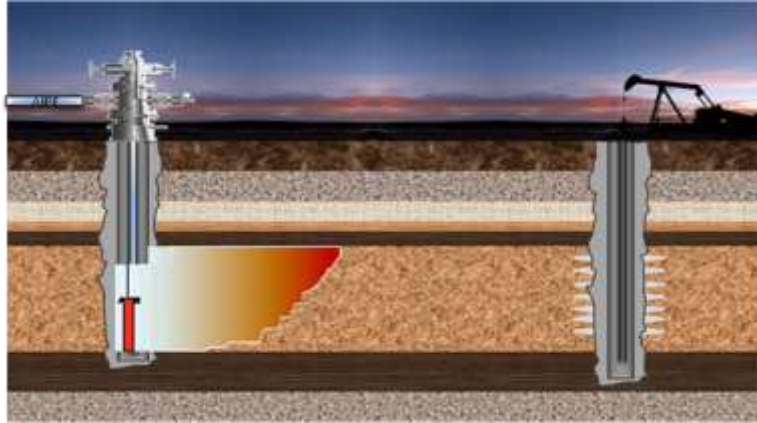
Espontánea: Ocurre en aquellos crudos que tienen componentes que fácilmente se oxidan (Figura 4).

Figura 4. Diagrama generación de ignición espontánea



- Inducida y artificial: Métodos; Dispositivos eléctricos, Inyección de fluidos calientes, Reacciones químicas exotérmicas (Figura 5).

Figura 5. Diagrama generación de la ignición inducida o artificial



Esta etapa corresponde a la generación de la combustión, aquí la temperatura aumenta hasta alcanzar la temperatura de ignición⁷.

1.4.3 Continuación de la inyección de aire

El objetivo de su realización es mantener y propagar a través de todo el yacimiento el frente de combustión.

El frente genera suficiente energía térmica: (disminuye viscosidad, aumenta la producción de fluidos). En esta etapa se mantiene y se propaga el frente de combustión a través de todo el yacimiento. Varios fenómenos tienen lugar en esta etapa: Flujo multifásico, flujo multidimensional, reacciones químicas heterogéneas y catalizadas, fenómenos complejos de transferencia de calor y problemas de equilibrios de sistemas de múltiples componentes.

⁷YATTE, Camilo, Seminario de combustión *in situ*, 2010, p22.

Tabla 1. Screening del proceso de combustión *in situ*

Criterios de Screening para Proyectos de Combustión <i>In Situ</i>						
Autor	Poettman	Geffen COFCAW	Lewin y Asociados	Chu	Ihoyo COFCAW	Chu
Año	1964	1973	1976	1977	1978	-1980
Espesor (Ft)	-	>10	>10	-	5 - 50	-
Profundidad (Ft)	-	>500	>500	-	200 – 4500	-
Porosidad (Fracción)	>0.2	-	-	>0.22	>0.2	>0.16
Permeabilidad mD	>100	-	-	>0.2	>300	>100
Saturación de aceite, (Fracc)	-	-	>0.5	>0.5	>0.5	>0.35
Gravedad API	-	<45	10 - 45	<24	<10	<40
Viscosidad del aceite, cP	-	-	-	<1000	>100	-

Fuente: Tomado y modificado de REYES, Yorleth. MENDEZ, Gilberto. Metodología Integrada para el Monitoreo y Seguimiento de Yacimientos Sometidos a Procesos de Combustión *In situ*. 2009, p33.

1.1 REACCIONES QUÍMICAS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

La existencia del proceso de combustión *in situ* depende completamente de las reacciones químicas que se desarrollan entre el aire inyectado y el aceite crudo. La esencia de estas reacciones químicas y los efectos calóricos inducidos depende de las características del sistema Matriz–Aceite, es por esto que la caracterización de las propiedades de la roca y del fluido va a desempeñar un papel fundamental en las reacciones químicas del proceso y de la mano de esto el desempeño en sí del proceso de combustión *in situ*.

Las reacciones químicas que se presentan en los procesos de combustión *in situ* son numerosas y se producen en diferentes rangos de temperaturas. De esta manera, para simplificar el estudio de estas reacciones los investigadores determinaron agrupar estas reacciones químicas en tres tipos:

- Reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO – Low Temperature Oxidation) o reacciones de adición.
- Reacciones de oxidación a temperaturas intermedias o reacciones de pirólisis.
- Reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO – High Temperature Oxidation) o reacciones de rompimiento.

Adicionalmente a estos tres tipos de reacciones químicas que ocurren en el proceso de combustión *in situ* y del cual depende su buen desempeño, en algunos casos se puede presentar el consumo de un combustible previamente oxidado, debido a una producción extra de combustible en el modo de reacciones de adición, y al posterior consumo de este, generado por el aumento de la tasa de inyección; esto lleva a un incremento de temperatura, llegando a superar el rango de altas temperaturas⁸.

1.4.4 Reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO) o reacciones de adición

Las reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO) se pueden describir como la adición de oxígeno al hidrocarburo presente en el yacimiento, además son reacciones heterogéneas, es decir entre las fases gas/líquido y producen agua e hidrocarburos parcialmente oxigenados tales como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, alcoholes e hidroperóxidos; estas reacciones ocurren generalmente por debajo de los 600 °F pero este rango de temperatura depende en gran medida de la viscosidad del aceite. Debido a la dependencia de la viscosidad del aceite para el desarrollo de estas reacciones, en los hidrocarburos livianos es más probable que se presenten las reacciones LTO que en los hidrocarburos pesados.

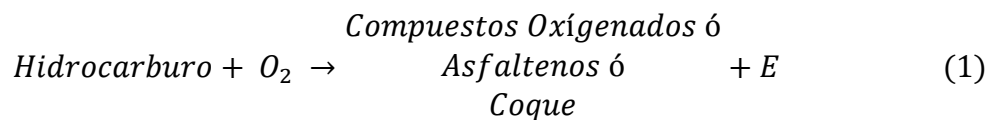
⁸SARATHI, Partha. In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices. Oklahoma: 1999, p36.

Ha sido encontrado que composicionalmente las reacciones LTO aumentan el contenido de asfaltenos en el crudo y disminuyen el contenido de resinas y aromáticos⁹.

Las reacciones LTO muestran un aumento en algunas características del hidrocarburo como los son la viscosidad inicial, el rango de ebullición y de densidades. Estas también incrementan la cantidad de combustible disponible para la combustión¹⁰.

Estas reacciones de oxidación a bajas temperaturas son altamente complejas y no han sido bien comprendidas, las reacciones LTO son características por que se observa un rápido incremento en el oxígeno consumido debido a la generación de óxidos de carbono. De la misma manera se observa una disminución en las velocidades de reacción del oxígeno, lo cual trae como consecuencia un gradiente de temperatura negativo.

Las reacciones de adición o LTO pueden ser resumidas de la siguiente manera¹¹:



1.4.5 Reacciones de oxidación a temperaturas intermedias (ITO) o reacciones de pirólisis

Las reacciones de oxidación a temperaturas intermedias o reacciones de pirólisis son ocasionadas por el aumento de temperatura del yacimiento y estas reacciones están asociadas a la depositación del combustible (coque) para su posterior

⁹MAMORA, Daula. Kinetic of in situ combustion, Standford University. 1993. p21.

¹⁰YATTE, Camilo. Seminario de combustión in situ, 2010, p35.

¹¹GUTIERREZ, Op. Cit., p28.

combustión. Las reacciones de pirólisis o ITO son principalmente homogéneas y endotérmicas, y se presentan tres tipos de reacciones: deshidrogenación, craqueo y condensación.

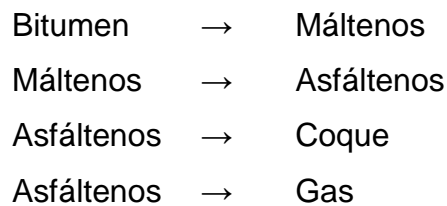
En las reacciones de deshidrogenación los átomos de hidrógenos son separados de la molécula de hidrocarburo sin alterar los átomos de carbono y dejándolos intactos. En las reacciones de craqueo se rompe el enlace carbono-carbono presente en las moléculas más pesadas del hidrocarburo, produciendo de esta manera moléculas de hidrocarburo con menor número de carbonos, las moléculas de carbono separadas se depositan en la roca, formando así el coque que va a ser el combustible encargado de un óptimo desempeño del proceso. En el caso de las reacciones de condensación, un aumento en el número de átomos de carbono en las moléculas es observado, liderando la formación de hidrocarburos pesados. El tipo de aceite y la estructura química de sus constituyentes hidrocarburos, determinan la tasa y extensión de las diferentes reacciones de pirólisis.

Las parafinas no sufren condensación. En un rango de 700 a 1250°F ellas sufren deshidrogenación y/o craqueo térmico dependiendo del tamaño de las moléculas. En general del metano al butano sufren deshidrogenación y las moléculas más grandes sufren craqueo. Las moléculas deshidrogenadas se recombinan a moléculas más pesadas que eventualmente conllevarán a la formación de coque. De esta manera moléculas de cadenas rectas a menudo producen coque y considerables cantidades de hidrocarburos volátiles después de un prolongado calentamiento. El coque se define como la fracción de crudo insoluble al tolueno y que generalmente contiene 80-90 % en Carbono y 3-9% en Hidrógeno.

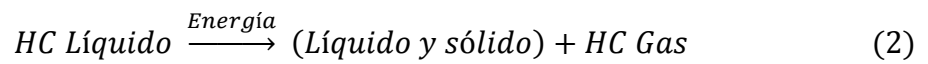
Los compuestos aromáticos sufren preferencialmente condensación en vez de reacciones de craqueo en rangos de 1200 a 3000°F. En las reacciones de condensación los débiles enlaces C-H de las moléculas cíclicas se rompen y son

reemplazados por un enlace C-C más estable, dando lugar a la formación de una molécula poliaromática con menos átomos de hidrogeno.

Estudios llevados a cabo en la Universidad de Calgary, la cual ha evaluado la combustión *in situ* por más de veinte años, definen las reacciones de oxidación a temperaturas intermedias del bitumen presente en Canadá como¹²:



La reacción que describe el proceso de pirólisis es⁸:



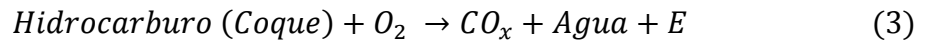
1.4.6 Reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO)

Las reacciones de oxidación a altas temperaturas o (HTO) son las reacciones que ocurren entre el oxígeno presente en el aire inyectado y el coque, las cuáles van a ser las encargadas de proporcionar la energía térmica para mantener y propagar el frente de combustión. Las temperaturas de la reacción HTO son superiores a los 650° F. Los componentes resultantes de estas reacciones son el Monóxido de Carbono (CO), el Dióxido de Carbono (CO₂) y el agua (H₂O)¹³. Generalmente estas reacciones son heterogéneas (Gas-Sólido y Gas-Líquido) y exotérmicas, se caracterizan generalmente por el consumo de todo el oxígeno presente en la fase gaseosa.

¹²SARATHI, Partha. In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices. Oklahoma: 1999, p42.

¹³GUTIERREZ, Op. Cit., p28.

El calor liberado debido al desarrollo de estas reacciones a altas temperaturas es el encargado de suministrar la energía necesaria para sostener y propagar el frente de combustión y estas son las reacciones que se quieren estén presentes cuando se desarrollan procesos de combustión *in situ*.



Estudios indican que las reacciones de oxidación a altas temperaturas son predominantemente reacciones de flujo heterogéneas y el proceso de combustión presente involucra diversos números de fenómenos de transporte¹⁴. Este proceso puede ser dividido en las siguientes etapas:

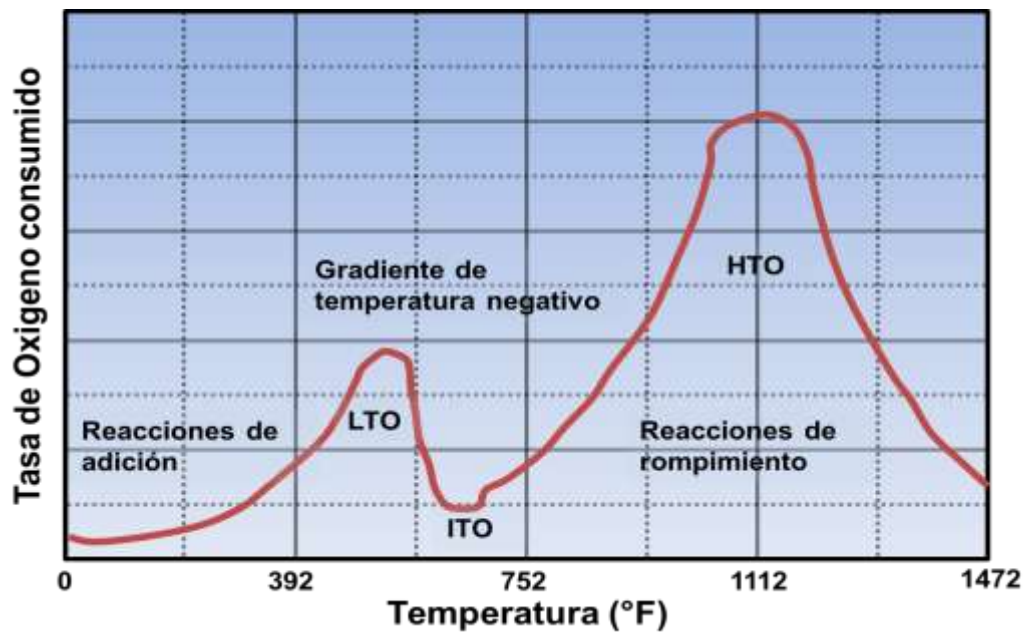
- Difusión de oxígeno de la mayor parte del flujo de gas combustible a la superficie.
- Absorción del oxígeno en la superficie.
- Reacción química con el combustible.
- Absorción de los productos de combustión.
- Difusión de los productos fuera de la superficie y en la mayor parte del gas.

Si en algún paso del desarrollo del proceso de combustión es más lento que cualquiera de los otros pasos restantes, el proceso puede llegar a ser controlado por este paso. Usualmente las reacciones químicas (paso 3) se desarrollan más rápido que la difusión. Por esta razón en la mayoría de los casos la tasa de combustión es controlada por este proceso de difusión, siendo este un tema de controversia para muchos autores que opinan lo contrario.

¹⁴SARATHI, Partha. In Situ Combustion Handbook—Principles and Practices. Oklahoma. 1999. p43.

En la Figura 6 se logran identificar los rangos de temperatura en la que ocurren los diferentes tipos de reacciones presentes en el proceso de CIS en función de la tasa de consumo de oxígeno, identificando la zona de gradiente de temperatura negativo lo cual es característico de las reacciones de pirólisis.

Figura 6. Temperatura de las reacciones del proceso de combustión en función de la tasa del oxígeno consumido



Fuente: Tomado y modificado OLIVEROS, Luis Roberto. Diseño y Evaluación de Procesos de combustión *In Situ*. GRM

Algunas de las características más importantes de las reacciones son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las características más importantes de las reacciones de oxidación

	Reacciones de oxidación LTO	Reacciones de pirolisis ITO	Reacciones de oxidación HTO	Combustible Pre-Oxidado
Rango de temperatura, °F	200-600	600-900	900-1300	<1300
Tipos de reacciones (Fases)	Heterogéneas	Homogéneas	Heterogéneas	Heterogéneas
Tipo de reacciones (Energía)	Exotérmicas	Endotérmicas	Exotérmicas	Exotérmicas
Reactivos	CH + O ₂	(CH)L + E	CH + O ₂	CHO _x + O ₂
Productos	CHO _x + ΔE	(CH)L y S + (HC)G	CO _x + H ₂ O + ΔE	CO _x + H ₂ O + ΔE
% CO ₂	<10	N/A	12-14	<15
Otras características	↑Asfáltenos ↑Viscosidad ↑Combustible ↓FR	Deshidratación Destilación Craqueo	Consumo total de oxígeno	↑Aire Requerido ↓FR Difícil identificarlo 3D

Fuente: Tomado y modificado OLIVEROS, Luis Roberto. Diseño y Evaluación de Procesos de combustión *In Situ*. GRM

1.4.7 Cinética de las reacciones

La cinética de las reacciones puede ser definida como que tan rápido ocurren las reacciones y cuanto porcentaje del hidrocarburo presente es afectado por éstas. Existen razones específicas por las cuales es necesario estudiar la cinética de las reacciones, tales como¹⁵:

- La caracterización de la reactividad del hidrocarburo.
- Determinación de las condiciones de ignición.
- Conocer la naturaleza del combustible que se forma y sus características en la combustión.

¹⁵BRIGHAM, William E and CASTANIER, Louis. In situ Combustion. Chapter 16. p8.

- Usar la cinética de las reacciones como datos de entrada para una posible simulación numérica del proceso.

Debido a los cientos de componentes que tiene el hidrocarburo es imposible representar detalladamente todas las reacciones que ocurren en el proceso de combustión *in situ* y en caso de que esto fuera posible de representar el uso de esta información para el desarrollo de modelos numéricos sería imposible debido a la ineficiencia del recurso computacional y el costo de esta misma.

2 FUNDAMENTOS NECESARIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS ARCILLAS SOBRE EL DESARROLLO DE LA COMBUSTIÓN *IN SITU*

Antes de la realización de la simulación numérica del proceso de combustión *in situ* con arcillas presentes en la formación, es de vital importancia tener un conocimiento más detallado de los conceptos más influyentes para el desarrollo de los modelos, con el fin de poder observar cómo es el funcionamiento de una prueba de tubo de combustión y además, como se ve afectado el proceso de combustión con la presencia de arcillas en el yacimiento.

2.1 PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Las pruebas de tubo de combustión son un método muy usado al momento de determinar los parámetros presentes en un proceso de combustión *in situ* y el rendimiento del quemado. Estas pruebas consisten en inyectar aire y generar una ignición en una muestra representativa del yacimiento que ha sido empaquetada en un tubo, con el fin de producir y medir los gases y líquidos que se logran recolectar¹⁶.

Estas pruebas de tubo funcionan como simuladores físicos permitiendo la observación directa de la propagación del frente de combustión pero bajo condiciones de laboratorio, las cuales se aproximan a las condiciones del yacimiento y son un paso importante para el desarrollo de estos procesos.

La mayoría de los tubos de combustión están desarrollados para involucrar crudos con gravedades entre 6 y 45° API con presiones de 1 hasta 6000 psi y

¹⁶UNSERBACH M.G. An overview of laboratory *In situ* combustión "Behavior of Athabasca Oil Sands". [MSc. Thesis]. University of calagary. 1998.

composiciones de aire normal (21% Oxígeno, 79% Nitrógeno). Aunque son difícilmente escalables estos modelos debido a la cinética de las reacciones, se ha logrado reconocer que las propiedades de los líquidos y los gases producidos pueden ofrecer ajuste a los datos que se presentan en campo.

2.1.1 Esquema de las pruebas de tubo de combustión

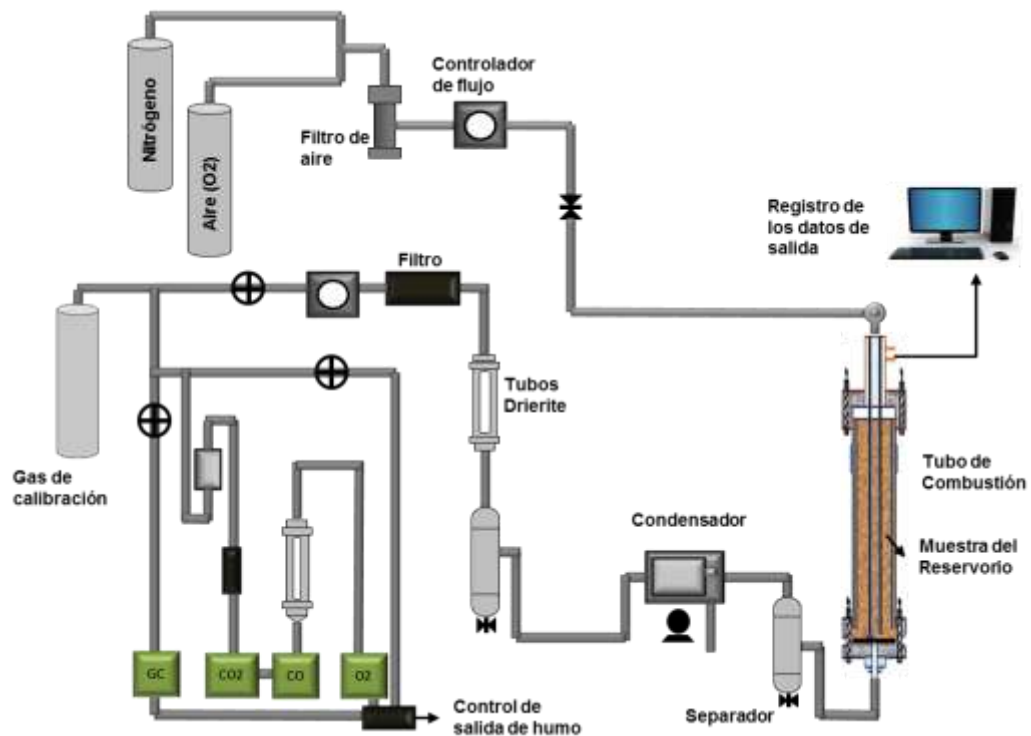
Dependiendo del tipo de yacimiento se lleva a cabo la realización de los procedimientos en los laboratorios de CIS, pues en base a esto se diseñan herramientas que componen la prueba.

El laboratorio cuenta con las siguientes partes¹⁷:

1. N₂
2. N₂+O₂
3. Controlador flujo de masa
4. Chaqueta de combustión
5. Transductor de presión
6. Separador de gas-fluido
7. Separador de agua-aceite
8. Balance
9. Condensador
10. Baño termostático
11. Trampa
12. Lavado de ácido
13. Filtro de partículas
14. Prueba húmeda

¹⁷CHICUTA, Op. Cit. p2.

Figura 7. Equipo de pruebas de laboratorio



Fuente: Partha S. Sarathi. In situ combustión handbook – Principles and Practices.

Para lograr comprender de una mejor manera el proceso, éste puede dividirse en los siguientes componentes:

2.1.1.1 Sistema de inyección de gas

Este sistema de inyección está constituido por dos partes, la inyección de nitrógeno y la inyección de aire (generalmente enriquecido). La inyección de nitrógeno o aire enriquecido puede ser controlada por el controlador de flujo másico instalado antes del transductor de presión y el tubing se enlaza al tubo de combustión para que el gas pueda entrar.

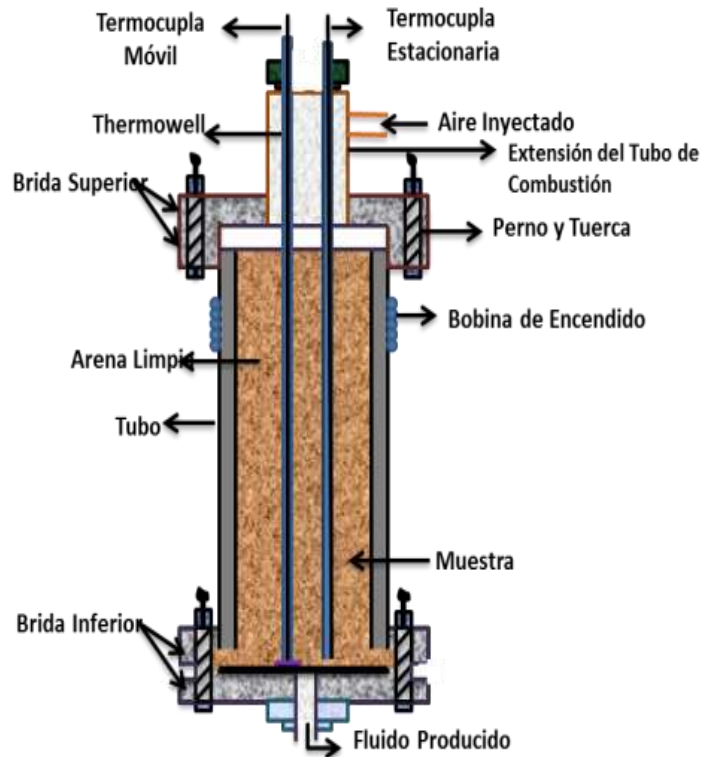
- **Inyección de Nitrógeno**
El nitrógeno se utiliza antes de llevar a cabo la combustión dejándolo fluir por el controlador de flujo de masa en el tubo de combustión, además sirve para presurizar el tubo mediante el cierre del regulador de presión.
- **Inyección de gas**
El aire se inyecta haciéndolo fluir a una tasa constante, con el fin de generar ignición y mantener la combustión. Dicha inyección es continua hasta llevar el frente hasta el fondo del tubo.

2.1.1.2 Tubo de combustión

El principal componente para este tipo de pruebas es el tubo de combustión. Este sistema consiste en la instalación del tubo verticalmente asegurado al brazo del motor de la termocupla móvil, a su vez cada una de las termocuplas es conectada a su respectiva terminal con el fin de registrar su señal en el monitor.

El equipo de tubo de combustión está constituido por paredes delgadas dentro de una chaqueta presurizada diseñada para soportar presiones hasta de 100 atm (1459.6 psia) y con el objetivo de lograr un buen desarrollo del proceso son generalmente de 3 a 6 Ft de longitud y de 2 a 4 pulgadas de diámetro.

Figura 8. Tubo de combustión



Fuente: Partha S. Sarath. In-Situ combustión handbook – Principles and Practices.

El proceso consiste en encender el crudo mediante la inyección de aire logrando que el frente de combustión avance a través del tubo. Posteriormente, a través de sensores, termocuplas y muestras utilizadas en pruebas de cromatografía se analizan los datos tomados de temperatura, presión, tasa de inyección de aire, producción de fluidos y composición de los gases.

La producción de fluidos se dirige por un separador de dos etapas para ser colectada en la salida. La primera etapa consiste en la separación de los gases de la mezcla y la segunda etapa en la separación del agua y el aceite. Los gases que

se producen pasan a través de un condensador a baja temperatura y los fluidos son recogidos en botellas¹⁸.

2.1.1.3 Sistema de análisis de gases

Los gases producidos son medidos a través de una prueba húmeda que consiste en determinar la composición de muestras cada 15 a 20 minutos aproximadamente utilizando la cromatografía de gases.

2.1.1.4 Control y registro de datos en el sistema

En este caso se utilizan dos computadores y registradores de datos para ingresar los valores de tiempo, temperatura de la chaqueta, termocuplas, tasa de gas acumulativa, tasa de gas promedio, y tasa de gas de inyección.

2.1.2 Procedimiento llevado cabo a nivel experimental

Los procedimientos llevados a cabo en laboratorio no se encuentran estandarizados, varían dependiendo de la finalidad de la prueba. Sin embargo, a nivel general se cuenta con un procedimiento que permite tener una mayor comprensión de los pasos que se deben seguir para realizar este tipo de pruebas.

En primera instancia, se procede a colocar el tubo de combustión de forma vertical y posición invertida, para lograr cubrir primero la parte superior con la mezcla de agua, arena y aceite que se prepara a su vez en un recipiente amplio. La mezcla es introducida en porciones de 200 gramos hasta el final del tubo, dejando un espacio de 2 cm para llenarlo con arena gruesa. Luego en el interior de la chaqueta se instala el sistema de inyección en la parte superior del bridaje para ingresar el nitrógeno al tubo. Seguidamente los calentadores que se encuentran ubicados alrededor de la chaqueta se encienden a una temperatura de 51°C por un tiempo de 12 horas para lograr estabilizar la temperatura.

¹⁸OLIVEROS, Luis Roberto. Diseño y Evaluación de Procesos de Combustión *In Situ*. GRM.

Cuando la temperatura de la primera termocupla llega hasta una temperatura de 500°C después de que el sistema de ignición es encendido, empieza la inyección de aire. Una vez el frente de combustión empieza a desplazarse a través del tubo el sistema de encendido se apaga¹⁹. Finalmente los fluidos producidos se recogen en botellas para ser analizados y los gases son estudiados para observar la eficiencia del proceso.

2.1.3 Parámetros involucrados en las pruebas de tubo

Existen diversas variables involucradas en el análisis de pruebas de tubo como la composición de los gases producidos, las propiedades de los fluidos y las temperaturas registradas en el tubo de combustión que son objeto de estudio para este tipo de procesos, permitiendo determinar parámetros que influyen directamente en el desempeño del proceso.

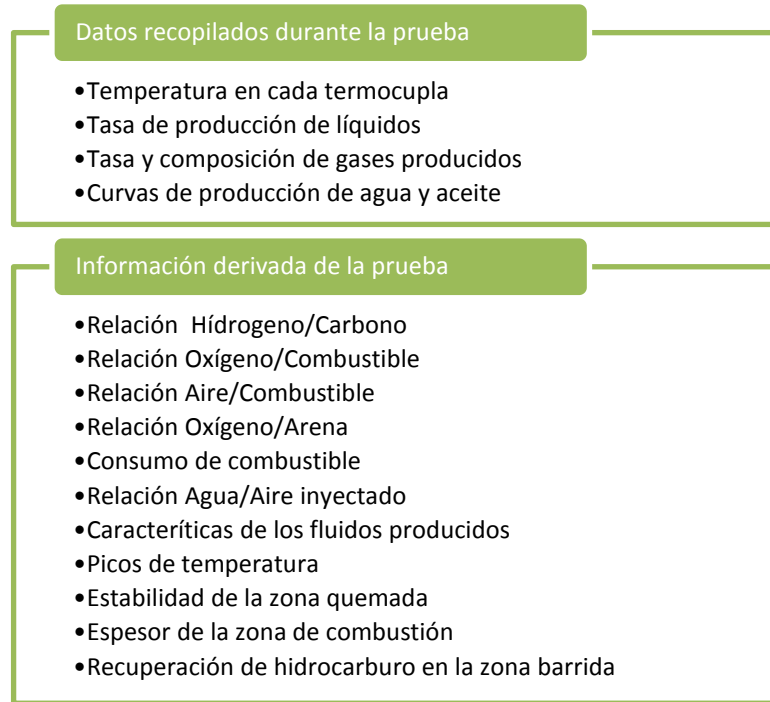
Durante el proceso se lleva a cabo la producción de óxidos de carbono (CO₂ y CO), relaciones H/C, fracción de oxígeno consumido convertido a óxidos de carbono y relación aire combustible, con el fin de estimar el desempeño del proceso bajo condiciones de baja o alta temperatura (LTO ó HTO). Un indicativo de altas concentraciones de CO₂ muestra que la combustión se está desarrollando bajo reacciones LTO; sin embargo si la concentración de CO₂ es baja quiere decir que la combustión se desarrolla en modo HTO.

Por su parte la densidad, la viscosidad y el contenido de asfáltenos juegan un rol importante ya que su cantidad disminuye a medida que el frente de combustión avanza y se acerca al otro extremo del tubo.

¹⁹MARTIN, W.L, ALEXANDER; J.D & DEW, JN. Process variables of *in situ* combustion. Transaction AIME, 213.1958. p218-235.

Resumiendo, las variables involucradas en este proceso pueden ser datos recopilados e información derivada de las pruebas de tubo. A continuación en la Figura 9 se muestran dichas variables.

Figura 9. Datos recopilados e información obtenida de la prueba



Fuente: Tomado de OLIVEROS, Luis Roberto. Diseño y Evaluación de Procesos de combustión In Situ. GRM

Además mediante pruebas de tubo se pueden analizar otros parámetros influyentes en la combustión como:

- **Contenido de combustible**

La cantidad y tipo de combustible depositado es una variable importante, la cual tiene unidades de libras de combustible por pie cubico de roca. La cantidad de combustible quemado por volumen de yacimiento, determina cuanto calor es generado, también determina la cantidad de aire requerido, la velocidad de avance del frente de combustión, la tasa de aceite recuperado y la duración del proyecto.

Este parámetro es función de ciertas propiedades roca-fluido, tales como porosidad, permeabilidad, textura, composición, saturación de aceite y de la temperatura en la zona de combustión. El contenido de combustible es un factor importante para el desarrollo de un proceso de Combustión *In Situ*. Generalmente altas cantidades de combustible son esperados cuando se cuenta con crudos más pesados y más viscosos, siendo esto comprobado en laboratorio mediante el estudio de las prueba de tubos de combustión.

La cantidad de combustible quemado por unidad de volumen de yacimiento, determina cuanto calor se libera, la cantidad de aire requerido, la velocidad de avance del frente de combustión, e incluso estimativos del tiempo de vida del proyecto y el aceite potencialmente recuperable. El valor que toma esta variable depende de una serie de factores que podrían favorecer o no la combustión; por ejemplo, si el contenido de combustible es bajo, no se liberará suficiente calor en el yacimiento para que se mantenga la combustión, al contrario, si este valor es alto, el proceso no será viable económicamente debido al elevado requerimiento de aire, altos costos de compresión y baja producción de aceite. Por consiguiente, es importante hacer un análisis previo de fluidos antes de buscar respuesta a tal pregunta.

Siguiendo el desempeño de los campos sometidos a CIS, aquellos que fueron éxitos o fracasaron, se encontró un rango de contenido de combustible depositado entre 1.5 y 2.5 lb/Ft³, siendo mayor en crudos pesados y viscosos.

- **Requerimiento de aire**

El requerimiento de aire es el volumen de aire requerido en Ft³ estándar para quemar el combustible depositado en Ft³ de roca de yacimiento. Es un parámetro esencial ya que tiene un efecto en la economía del proyecto.

- **Concentración de oxígeno**

La concentración de oxígeno presente en el aire es de cerca del 21%, cuando se utiliza un gas enriquecido, es decir mayor porcentaje de oxígeno presente. Cuando se tiene un gas enriquecido se obtienen muchas ventajas como las altas tasas de desplazamiento, aumento en la movilidad del aceite frío resultado de la solubilidad del CO₂, y mayores factores de recobro; debido a que el oxígeno es uno de los factores preponderantes en el comportamiento que tengan las reacciones de oxidación que se llevan a cabo para el desarrollo de un proyecto de combustión *in situ*.

- **Cambios en las propiedades del crudo**

Debido al aumento de temperatura se generan cambios en las propiedades del crudo.

- **Viscosidad del aceite**

Viscosidades altas del crudo impiden el desplazamiento de este mismo a través del medio poroso con el fin de que este alcance el pozo productor, con el fin de reducir este parámetro es necesario esperar que la roca se caliente y la energía proveniente de la combustión sea transferida al crudo.

- **Gravedad API**

Procesos de combustión *in situ* han sido aplicados en yacimiento los cuales poseen crudos livianos y crudos pesados, obteniendo buenos resultados según las características de los fluidos. Económicamente la implementación de la combustión no es viable en yacimientos con hidrocarburos livianos debido a los componentes medianos que poseen alto valor comercial y estos se pierden en el craqueo, por esta razón es más viable la implantación de la combustión *in situ* en yacimientos donde su crudo tenga gran cantidad de fracciones pesadas.

2.2 ARCILLAS Y MINERALES DE ARCILLA

La arcilla es utilizada tanto en termino de tipo de roca como de tamaño de partículas, en términos de rocas es difícil de definir concretamente debido a la amplia variedad de materiales que son llamados arcillas. En general el término arcilla implica cualquier material natural, terroso y de grano fino que tenga la propiedad de deformarse cuando se le es aplicada una presión y de recuperar su forma cuando esta presión es retirada. Análisis químicos han mostrado que las arcillas están esencialmente constituidas por sílice, alúmina y agua; frecuentemente con apreciables cantidades de hierro.

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio, hidratados, provenientes de la descomposición de minerales de aluminio. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}^{20}$.

Desde el punto de vista mineralógico, encierra a un grupo de minerales de la arcilla, filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a $2 \mu\text{m}$); según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan $2 \mu\text{m}^{21}$.

²⁰A. E. ADAMS, W.S. MACKENZIE, C.GUILFORD, Atlas de rocas sedimentarias, 1996.

²¹GARCIA R., Emilia. SUAREZ B, Mercedes. Las arcillas: propiedades y usos.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

La arcilla se encuentra presente en la mayoría de las rocas existentes, influyendo en la generación de gas y petróleo en el yacimiento, dándole una importancia especial a los métodos de recuperación térmica como la combustión *in situ*.

El proceso de combustión *in situ* se ve influenciado por la naturaleza y composición de la roca, lo que afecta directamente la tasa de depositación de combustible (coque). Por esta razón es importante conocer y caracterizar las arcillas y sus minerales debido a que constituyen una parte importante de las arenitas y son componentes principales de rocas arcillosas, las cuales están presentes en algunos yacimientos de petróleo, de esta manera a continuación se describen de forma detallada las propiedades más importantes con las que cuentan las arcillas y sus minerales, ya que estas juegan un papel importante en el desempeño del proceso de combustión *in situ*.

2.2.1 Concepto de los minerales de arcillas

Las arcillas están generalmente compuestas por partículas cristalinas extremadamente pequeñas de uno o más miembros del pequeño grupo de minerales que son conocidos como los minerales de arcilla. Los minerales de arcilla son esencialmente silicatos de aluminio hidratados, con magnesio o hierro presentes en parte del aluminio. Muchas arcillas están compuestas de un solo mineral de arcilla, pero en muchos casos es una mezcla de estos. En adición al mineral de arcilla, algunas arcillas contienen cantidades variadas de los llamados minerales no arcillosos, algunos importantes ejemplos son cuarzo, calcio,

feldespato y pirita, también muchas arcillas contienen materiales orgánicos y soluciones de agua salada.

De acuerdo con el concepto de los minerales de arcilla, los minerales cristalinos de la arcilla son el constituyente principal de todas las arcillas y por esta razón estos componentes van a determinar sus propiedades, estas propiedades también van a ser influenciadas debido a la presencia de materiales no arcillosos si están presentes en cantidades considerables.

Los factores que controlan las propiedades de los minerales de la arcilla puede ser clasificados como:

- **Composición de los minerales de la arcilla:** se refiere a la identidad y abundancia de los minerales de arcilla presentes, también la perfección de la cristalinidad es importante. Dos arcillas compuestas completamente de caolinita van a tener diferentes propiedades si la caolinita en una está bien organizada y en otra esta pobremente ordenada.
- **Composición de los minerales no arcillosos:** se refiere a la identidad de los minerales no arcillosos, su forma, su abundancia relativa y la distribución individual del tamaño de las partículas. Generalmente estos minerales tienen que estar presentes en cantidades mayores a trazas para influenciar sus propiedades.
- **Materiales orgánicos:** se refiere a la cantidad y tipo de material orgánico contenido en el material arcilloso, pueden estar presentes en dos formas; partículas discretas de madera, hojas, esporas, etc., o pueden estar presentes como moléculas organizadas absorbidas en la superficie de las partículas de minerales de arcilla.

- **Textura:** los factores de textura se refieren a la distribución de los tamaños de partícula, la forma de las partículas, la orientación de las partículas en el espacio con respecto a cada una y las fuerzas que tienden a mantenerlas juntas²².

2.2.2 Clasificación de las arcillas

Las arcillas pueden clasificarse según la estructura en que estén formadas sus capas, las cuales pueden ser bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos (Tabla 3)²³.

²²ROBERT R. SHROCK. Clay Mineralogy. McGraw.Hill Series in Geology. p9.

²³GARCIA R., Emilia. SUAREZ B, Mercedes. Las arcillas: propiedades y usos. p7

Tabla 3. Clasificación de las arcillas

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
BILAMINARES <i>1:1</i>		Caolinita		Antigorita	
	CANDIDAS	Nacrita	SERPENTITA	Crisotilo	
		Dickita		Lizardita	
		Halloisita		Bertierina	x=0
TRILAMINARES <i>2:1</i>	Pirofillita		Talco		x=0
		Montmorillonita		Saponita	x=0,2-0,6
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
	Vermiculitas		Vermiculitas		x=0,6-0,9
	Illitas				x=0,9
		Moscovita		Biotita	x=1
	Micas	Paragonita	MICAS	Flogopita	
			Lepidolita		
2:1:1	CLORITAS				
FIBROSOS	Paligorskita		Sepiolita		

Fuente: GARCIA, Emilia. SUAREZ, Mercedes. Las arcillas: propiedades y usos.

2.2.3 Estructura de las arcillas

Las arcillas son cristalinas por naturaleza, su estructura atómica hace que sea más fácil definir sus propiedades y presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. La identificación y clasificación de las arcillas se lleva a cabo por patrones de difracción de rayos-x, adsorción espectral y análisis térmico diferencial. Las arcillas son básicamente cristales compuestos por plaquetas delgadas apiladas cara a cara.

La arcilla que se encuentra naturalmente, tiene una estructura apilada o estratificada, aquí cada capa unitaria tiene un espesor de aproximadamente 10

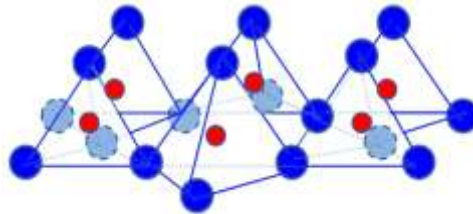
Angstroms (\AA)²⁴. Lo anterior quiere decir que cada milímetro de espesor contiene aproximadamente un millón de capas de arcilla. Cada etapa de arcilla es altamente flexible, muy fina, y tiene una gran área superficial. Se puede considerar que una partícula individual de arcilla es algo parecido a una hoja de papel o un trozo de celofán.

- **Estructura tetraédrica**

Un átomo de silicio se ubica equidistante de cuatro átomos de oxígeno o hidroxilos. Los átomos de oxígeno o hidroxilos se ubican en las esquinas de un tetraedro, estos grupos tetraédricos $(\text{SiO})_4^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de las arcillas. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos (Figura 10). El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} .

El tetraedro Si-O se encuentra eléctricamente descompensado (el Si aporta cuatro cargas positivas frente a las ocho negativas de los cuatro oxígenos de los vértices), por lo que deben unirse a otros cationes para neutralizar las cargas. En estas estructuras cada vértice de la cara pertenece a dos tetraedros vecinos (cada oxígeno se coordina a dos silicios), dando una capa de tetraedros.

Figura 10. Estructura tetraédrica de las arcillas



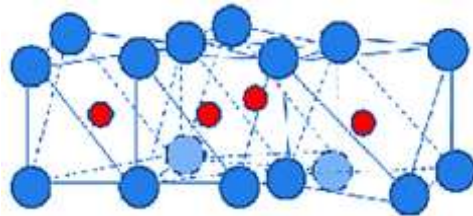
Fuente: CAVANZO BALCAZAR Emilio Andres. "Clasificación y Caracterización Físico-Química de las Arcillas". Bucaramanga. Uis. 2011.

²⁴MEUNIER, Alain. Clays. p62.

- **Estructura octaédrica**

Los octaedros son bipirámides con su plano ecuatorial cuadrado y todas sus caras son triángulos equiláteros iguales. Los octaedros en estas estructuras se disponen apoyados en una de sus caras. El oxígeno o los hidroxilos forman dos filas de paquetes apiladas y coordinadas, con iones de aluminio, hierro y magnesio localizados en el centro del octaedro²⁵ (Figura 11).

Figura 11. Estructura octaédrica de las arcillas

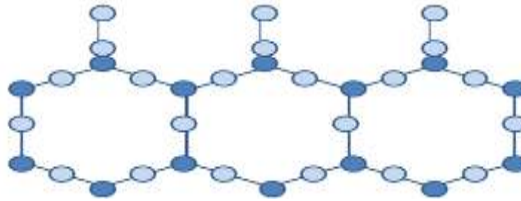


Fuente: CAVANZO BALCAZAR Emilio Andres. "Clasificación y Caracterización Físico-Químicas de las Arcillas". Bucaramanga. Uis. 2011.

Así, las arcillas pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más una octaédrica y se denominan bilaminares, 1:1, o T:O; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T:O:T. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se le denomina lámina. Los grupos de tetraedros están arreglados para formar una red hexagonal, que se repite hasta formar una lámina de composición $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_4$ (Figura 12).

²⁵BRINDLEY, G.M. AND BROWN, G. (EDS). Cristal structures of clay minerals and their X-ray identifications. Mineralogical Society. London, 1980. p495.

Figura 12. Red hexagonal



Fuente: CAVANZO BALCAZAR Emilio Andres. "Clasificación y Caracterización Físico-Químicas de las Arcillas". Bucaramanga. Uis. 2011.

2.2.4 Grupos minerales de las arcillas

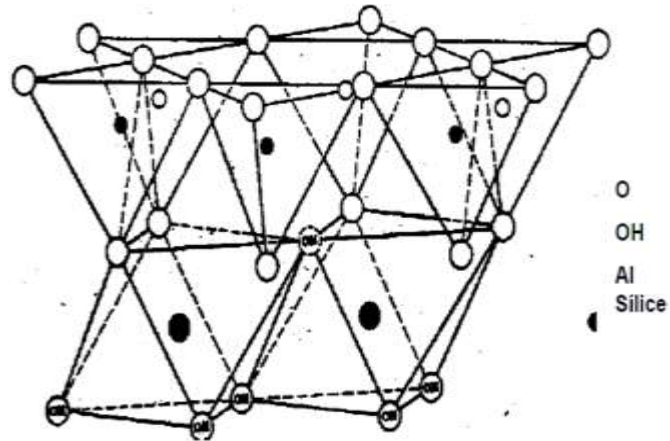
En este capítulo se describirán los tres más importantes grupos minerales de las arcillas los cuales son el grupo mineral de la caolinita, la montmorillonita y la illita debido a que de alguna manera forman parte de interés de esta investigación.

- **Grupo mineral de la caolinita**

La estructura de la caolinita está compuesta por un arreglo tetraédrico de silicio y un arreglo octaédrico de aluminio combinados en una sola unidad de forma que las puntas de los tetraedros y una de las capas del arreglo octaédrico constituyen una capa común. Todas las puntas del arreglo tetraédrico de silicio apuntan a la misma dirección y hacia el centro de la unidad, hecha de silicio y arreglos octaédricos.

En la capa común a los arreglos octaédricos y tetraédricos, se observa que están compartidos por el silicio y el aluminio, los dos tercios de los átomos presentes. Las cargas en el interior de la estructura están balanceadas.

Figura 13. Diagrama esquemático de la estructura de una capa de caolinita



Fuente: ROBERT R. SHROCK. Clay Mineralogy. McGraw.Hill Series in Geology.

La fórmula estructural está dada por $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ y la composición teórica expresada en óxidos es:

SiO ₂	46.54 %
Al ₂ O ₃	39.50%
H ₂ O	13.96 %

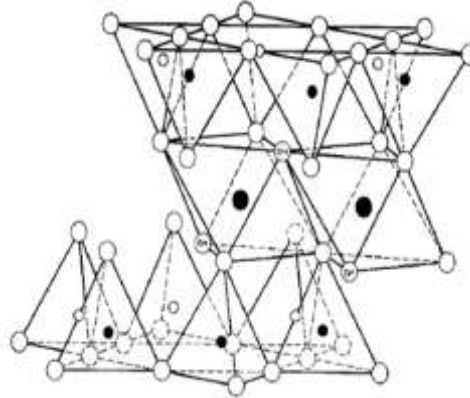
La Caolinita se encuentra comúnmente como componente menor a moderado (5 a 20%) de las rocas sedimentarias tales como las lutitas y las areniscas.

- **Grupo mineral de la montmorillonita**

La montmorillonita está compuesta por unidades hechas de dos arreglos en forma tetraedro de silicio separadas con un arreglo octaédrico de aluminio, todas las puntas del arreglo tetraédrico apuntan a la misma dirección y hacia el centro de la unidad. Los arreglos tetraédricos y octaédricos son combinados de tal manera que los extremos de silicio del arreglo tetraédrico y uno de los hidroxilos de la capa del arreglo octaédrico forman una capa común.

En la superposición de las unidades silicio - aluminio – silicio, las capas de Oxígeno de cada unidad están adyacentes a las capas de Oxígeno vecinas, con la consecuencia de que hay un enlace muy débil y una amplia separación entre ellas.

Figura 14. Diagrama esquemático de la estructura de una capa de montmorillonita



Fuente: ROBERT R. SHROCK. Clay Mineralogy. McGraw.Hill Series in Geology.

Esto se convierte en una propiedad sobresaliente de las Montmorillonitas, ya que el agua y otras moléculas polares, como ciertas sales orgánicas, pueden colocarse entre estas capas causando la expansión o hinchamiento de la arcilla

La fórmula teórica para la estructura dada es: $(NaCa)(MgAl_2)(OH)_2/Si_4O_{10}11H_2O$ y la composición sin el material entre capas es:

SiO ₂	66.70 %
Al ₂ O ₃	28.30 %
H ₂ O	5.00 %

El nombre montmorillonita se usa frecuentemente como nombre de grupo que incluye muchas estructuras minerales específicas. Sin embargo, en los

últimos años, se ha aceptado cada vez más el nombre esméctica como nombre de grupo, reservando el término montmorillonita para los miembros predominantemente aluminosos del grupo. Este grupo de minerales incluye la montmorillonita, la héctorita, la saponita, la nontronita y otros minerales específicos²⁶.

La montmorillonita presente en las lutitas es generalmente la montmorillonita cálcica, porque está en equilibrio con el agua de la formación, la cual es generalmente rica en calcio. La montmorillonita sódica (bentonita de Wyoming) también se añade normalmente a un lodo para aumentar la viscosidad y reducir el filtrado.

- **Grupo mineral de la illita**

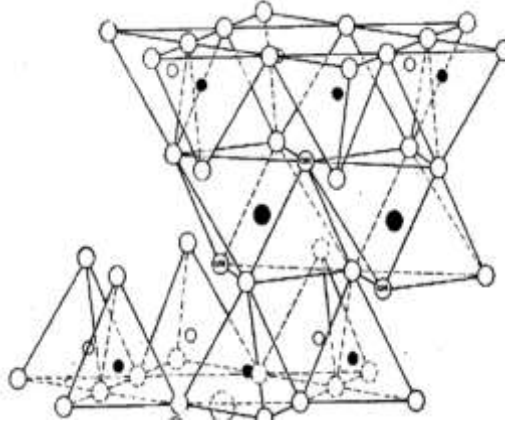
Las características estructurales de los minerales de la Illita son similares a las de las micas. La unidad estructural básica es una capa compuesta de dos arreglos tetraédricos de silicio con un arreglo octaédrico en el centro. Las puntas de los tetraedros en cada arreglo de silicio apuntan al centro de la unidad y son combinadas con el arreglo octaédrico en una simple capa reemplazando adecuadamente el hidroxilo por el oxígeno. La unidad es la misma que la de la montmorillonita excepto que algunos de los silicios son reemplazados siempre por aluminios y la diferencia de la carga resultante es balanceada por iones de potasio.

Los minerales de este grupo frecuentemente están presentes en partículas extremadamente pequeñas de manera que es difícil determinar su forma. Cuando se colocan partículas de Illita en agua estas tienden a disgregarse considerablemente en las variedades pobremente cristalizadas, mientras

²⁶ROBERT R. SHROCK. Clay Mineralogy. McGraw.Hill Series in Geology. p55.

que las bien cristalizadas se dispersan poco. Esta disgregación se debe a la separación entre las unidades de silicio²⁷.

Figura 15. Diagrama esquemático de la estructura de una capa de montmorillonita



Fuente: ROBERT R. SHROCK. Clay Mineralogy. McGraw.Hill Series in Geology.

La Illita es, posiblemente, el grupo más abundante en los depósitos arcillosos marinos modernos. Es también la arcilla más abundante en los depósitos sedimentarios antiguos y es el material arcilloso predominante en las lutitas.

2.2.5 Propiedades físico-químicas de las arcillas

Las propiedades físico-químicas con las que cuentan las arcillas son función del tipo de estructura que posean estas, estas propiedades definen el comportamiento y desempeño que las arcillas tengan en diferentes procesos en las cuales están presentes o son utilizadas. De tal manera que a continuación se definen algunas de las propiedades más relevantes de las arcillas y sus minerales.

- **Superficie Específica**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso

²⁷ROBERT R. SHROCK. Clay Mineralogy. McGraw.Hill Series in Geology. p65.

de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en [m²/gr].

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

- **Capacidad de Intercambio Catiónico**

La capacidad de intercambio catiónico (CEC en sus siglas en inglés) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral²⁸. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80% de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20% de la carga total de la lámina.

- **Capacidad de absorción**

Algunas arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar,

²⁸MEUNIER, Alain. Clays. p62.

tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento²⁹. Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio.

- **Tixotropía**

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido.

- **Porosidad y permeabilidad**

Las arcillas tienen baja permeabilidad y porosidad. Las aperturas intergranulares son demasiado pequeñas para permitir una circulación rápida. Posiblemente la mayor cantidad de agua que penetra en la casa y en la masa arcillosa llegue a través de grietas de contracción y desecación.

²⁹VELDE, B. (1992). "Introduction to Clay Minerals, Chemistry, origins, uses and environmental significance". Chapman & Hall. 1992. p198.

- **Sensibilidad**

Las partículas poseen cargas eléctricas parecidas, por lo que entre ellas ocurre una repulsión, siendo arrastradas a lo largo de las corrientes o dispersadas en un cuerpo de agua.

2.2.6 Propiedades térmicas de las rocas

- **Capacidad Calorífica**

La capacidad calorífica de un material es una magnitud que indica la mayor o menor dificultad que presenta dicho material, para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Puede interpretarse como un efecto de inercia térmica, que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que cede o absorbe una cantidad de calor del entorno. Depende de la masa, del calor específico de sus materiales y del coeficiente de conductividad térmica de estos³⁰.

Esta dada por la ecuación:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (4)$$

Dónde:

C: es la capacidad calorífica cuyas unidades son BTU/Ft³-°F.

Q: es el calor expresado en BTU/h.

T: la variación de temperatura que expresada en °F.

También es definido por la siguiente ecuación:

³⁰KAUZMANN, WALTER; Propiedades térmicas de la materia, Barcelona, Reverte, 1971.

$$M = \rho_1 C_1 = \emptyset(\rho_o S_o C_o + \rho_w S_w C_w + \rho_g S_g C_g) + (1 - \emptyset)\rho_r C_r \quad (5)$$

Dónde:

M ($\rho_1 C_1$): es la capacidad calorífica cuyas unidades son BTU/Ft³-°F

S_o, S_w, S_g: es la saturación de petróleo, agua y gas respectivamente, fracción.

ρ_o , ρ_w , ρ_g , ρ_r : son las densidades correspondientes en lb/Ft³

C_o, C_w, C_f, C_r: son los calores específicos en BTU/Lb-°F

En términos petroleros se podría decir que la capacidad calorífica de una roca se define como el número de BTU que un pie cúbico de roca y de los fluidos que la satura, pueden almacenar por cada °F que aumenta la temperatura. En otras palabras es un término muy necesario al necesitar saber cuánto calor puede almacenar el sistema una vez se haya aumentado la temperatura por el proceso de combustión *in situ*.

- **Conductividad Térmica**

Es la capacidad de los materiales para dejar pasar el calor, en otras palabras, la conductividad térmica es la capacidad de los elementos de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otros elementos cercanos³¹. La relación de esta con el flujo de calor y temperatura se ve reflejada en la primera ley de Fourier para la conducción de calor:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta d} \quad (6)$$

³¹VICTOR MANUEL BLANCO DIAZGRANADOS, Estimación de la capacidad calorífica y conductividad térmica de las rocas a partir de propiedades petrofísicas (porosidad y saturación de fluidos) utilizando registros de pozos, 2007.

Dónde:

K: es coeficiente de conductividad térmica, que es una característica de cada material y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor.

A: es el área de evaluación.

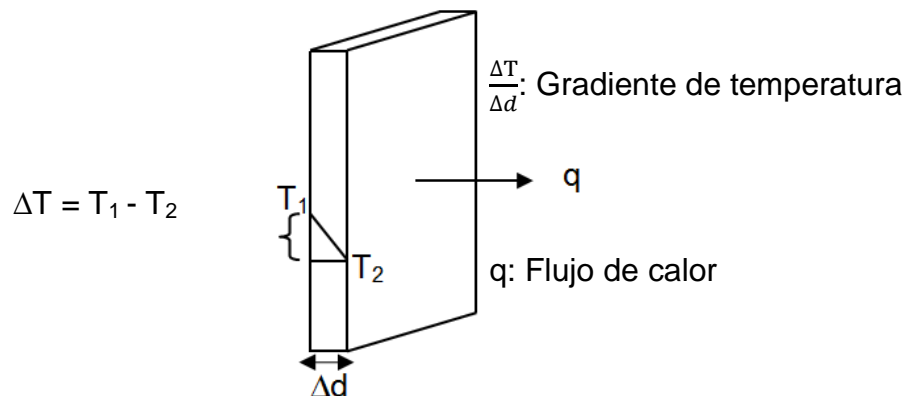
Q: es la cantidad de flujo de calor.

$\Delta T/\Delta d$: es el gradiente de temperatura.

Esta característica cuenta con las siguientes unidades expresadas en el Sistema Ingles es BTU/Ft-hr-°F, indica la cantidad o flujo de calor que pasa a través de la unidad de superficie de una muestra del material, de extensión infinita, caras plano paralelas y espesor unidad, cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas igual a la unidad en condiciones estacionarias.

La conductividad térmica en medios porosos depende de la litología, mineralogía de la roca, el tamaño de grano, el arreglo de los granos, la densidad, y principalmente de la porosidad y la saturación de fluidos. Los valores bajos de conductividad térmica corresponden a rocas con elevada porosidad.

Figura 16. Flujo de calor por conducción en una placa rectangular



Fuente: MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando. "Propiedades Térmicas de la Roca". Métodos de Recobro. Universidad Industrial de Santander. 2012.

- **Difusividad Térmica**

Esta propiedad denotada por el símbolo α , combina las dos anteriores propiedades. Se define como el cociente entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica específica multiplicada por la densidad de la sustancia.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (7)$$

Es afectada por los mismos factores que afectan a la capacidad calorífica y la conductividad térmica. Se expresa con las unidades Ft²/hr.

2.2.7 Comportamiento de las arcillas a altas temperaturas

La caracterización de las propiedades de la roca es parte importante en el desempeño de los procesos de combustión *in situ*, es por eso que es necesario identificar ciertos parámetros de interés como lo es la presencia de minerales arcillosos en la matriz de la roca o si la roca es completamente limpia, es decir sin la presencia de los minerales de la arcilla en el espacio poroso.

2.2.7.1 Influencia de las arcillas en el proceso de CIS

Debido a que muchos de los yacimientos en los cuales se encuentra el hidrocarburo cuentan con la presencia de la arcilla, ya sea ocupando espacios en la matriz de la roca o en forma de capas estratificadas que limitan la formación, es necesario evaluar cómo influye su presencia en el proceso de combustión *in situ*.

La estructura tetraédrica y octaédrica con la cual cuentan las arcillas, y su distribución en forma de capas, son características importantes ya que se ha encontrado que en entre las capas y los arreglos estructurales se pueden encontrar derivados metálicos del cobre, hierro y níquel, los cuales pueden

catalizar las reacciones de oxidación del crudo³². Otra de la característica importante de la arcilla es la gran área superficial que poseen la cual sugiere un alto potencial en las propiedades catalíticas, siendo posiblemente observado su efecto en las reacciones de craqueo y combustión, y es razonable sospechar que el contenido de arcilla en la matriz de la roca influya en diferentes parámetros que determinan el desempeño de la combustión. Algunos de estos parámetros que se ven influenciados debido a la presencia de arcillas en la roca son la cantidad de coque depositado y/o la combustión de este mismo.

Debido a que la depositación de coque aumenta con la presencia del contenido de arcilla, secuencialmente también se incrementa el calor de combustión disponible por unidad de volumen de roca.

La presencia de los derivados metálicos en las arcillas que están presentes en la matriz de la roca tienen también un efecto en las temperaturas a las cuales se desarrollan los diferentes tipos de reacciones, generalmente es un aumento en estas temperaturas en comparación con una matriz de roca sin la presencia de arcillas³³.

La presencia de arcillas producen como resultado una reducción en la energía de activación lo cual se ve afectado en la reacciones de craqueo y combustión, siendo estas últimas de suma importancia para el desarrollo óptimo del proceso.

Estos efectos de la presencia de arcilla en el proceso de combustión *in situ* descritos anteriormente fueron determinados mediante numerosos estudios y experimentos de laboratorio, entre los cuales están las pruebas de tubos de

³²OUARDA DRIVI, SHAPOUR VOSSOUGHI, SPE, U of Kansas. Catalytic Effect of Heavy Metal Oxides on Crude Oil Combustion.

³³SHAPOUR Vossoughi, G. PAUL Willhite, WILLIAM P. Kritikos, IBRAHIM M. Guvenir, Youssef El Shoubary, "Automation of an In-Situ Combustion Tube and Study of the Effect of Clay on the In-Situ Combustion Process" SPE office July 20. 1981.

combustión y las técnicas de análisis térmico, tales como el análisis térmico diferencial (DTA), el analizador térmico gravimétrico (TGA) y calorímetro diferencial de barrido (DSC).

2.2.8 Componentes metálicos de las arcillas

Las arcillas están formadas por elementos metálicos presentes en sus estructuras como hierro, aluminio, magnesio, silicio y níquel²⁹. Debido a esto los minerales arcillosos poseen propiedades catalíticas para los hidrocarburos y se ha sugerido que actúan como catalizador en la transformación de materia orgánica del petróleo.

El efecto catalítico de compuestos de metales de transición en el proceso de combustión *in situ* ha sido investigado por varios autores. *He et al.*, estudió el efecto catalítico de aditivos de sales metálicas sobre la eficiencia de la combustión *in situ* en el rango de temperatura de las reacciones HTO observando que los aditivos metálicos como la sal (Fe^{3+}), reducen la energía de activación y produce una combustión más completa.

Los metales también pueden coordinar a algunas moléculas asfálticas grandes y producir estructuras más complejas, que afectan negativamente a la viscosidad del petróleo debido a que los metales aceleran las reacciones de HTO mediante la destrucción de los antioxidantes que existen en el aceite y se espera que el mismo tipo de reacciones catalíticas se produzca en el intervalo de temperatura de las reacciones LTO.

- **Hierro**

El hierro es un material activo, se combina con halógenos, azufre, fósforo, carbono y silicio. Además desplaza al hidrógeno de la mayoría de los ácidos débiles. El óxido debilita al hierro con una capa de color marrón la cual no protege al hierro de seguir oxidándose como en el caso de otros metales, ya que con golpear la lámina este óxido se desprende.

- **Aluminio**

A temperaturas altas, reduce muchos compuestos que contienen oxígeno, sobre todo los óxidos metálicos. El aluminio tiene una alta conductividad térmica, que sólo es superada por el cobre, siendo además cuatro veces más grande que la conductibilidad del acero. Su temperatura de fusión es de 660.2 °C.

- **Magnesio**

El magnesio tiene un fuerte poder reductor, es resistente a las bases pero se ataca con los ácidos, tiene la propiedad de desplazar fácilmente el hidrógeno de los ácidos diluidos y se descompone al aumentar la temperatura, transformándose en hidróxido insoluble y desprendiendo CO₂.

- **Silicio**

A temperaturas ordinarias el silicio no es atacado por el aire, pero a temperaturas elevadas reacciona con el oxígeno formando una capa de sílice que impide que continúe la reacción. A altas temperaturas reacciona también con nitrógeno y cloro formando nitruro de silicio y cloruro de silicio respectivamente.

- **Níquel**

Es soluble en ácido nítrico diluido, y se convierte en pasivo (no reactivo) ácido nítrico concentrado. No reacciona con los álcalis. Puede crear zonas de baja movilidad que reducen la eficiencia de desplazamiento, además de producir estructuras más complejas que afectan negativamente la viscosidad del aceite.

3 MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

La simulación numérica es una herramienta de gran ayuda en la industria petrolera, ya que mediante el uso de ésta se permite estudiar el comportamiento de un fenómeno o proceso determinado, el cual al reproducir la respuesta, esta respuesta puede ser analizada y llegar a conclusiones e hipótesis relevantes al momento de desarrollar proyectos en los modelos físicos de yacimiento.

Durante el desarrollo de este capítulo se van describir generalidades de la simulación numérica de yacimientos, también se va a describir de manera detallada todas las características con las que cuenta el modelo de simulación numérica utilizado para el desarrollo de este proyecto, este modelo de simulación es la representación de las características de una prueba de tubo de combustión, tanto las propiedades del sistema de interacción roca fluido, las propiedades de la chaqueta del tubo de combustión y la condiciones operacionales de la prueba. La simulación numérica se llevó a cabo a través del software Computer Modeling Group–CMG, el cual cuenta con diferentes herramientas de trabajo para los diferentes procesos que se pueden simular, la herramienta Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator–STARS fue utilizada para simular el proceso de combustión *in situ*.

3.1 GENERALIDADES DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La simulación numérica de yacimientos es un proceso en el cual con la ayuda de un modelo matemático se integran numerosos factores que logran describir con cierta precisión el comportamiento que ocurre en el yacimiento. El modelo matemático de simulación de yacimientos, consiste en un número determinado de

ecuaciones que expresan el principio de conservación de masa y/o energía, las cuales son acopladas a ecuaciones representativas de flujo de fluidos, temperatura y/o la concentración de estos fluidos a través de medios porosos³⁴.

Estas ecuaciones solo tienen solución únicamente en forma numérica y de manera discreta, es por esta razón que para simular yacimientos con un grado de complejidad alto se necesitan altas capacidades a niveles computacionales.

3.1.1 Información necesaria para la simulación numérica.

Con la simulación numérica se busca representar el comportamiento que tendría el yacimiento cuando se le aplica cualquier proceso en el cual se busque incrementar el factor de recobro, por esta razón la simulación necesita de cierta información que describa el yacimiento de la mejor manera, esta información puede ser definida como:

3.1.1.1 Descripción física del yacimiento

En esta parte se caracteriza las propiedades geológicas con las que cuenta el modelo de simulación, en el cual el conocimiento estratigráfico y estructural son de suma importancia al momento de realizar la simulación del modelo. De esta información es posible obtener los límites del yacimiento, las características de la formación, presencia de fallas o acuíferos, y la discontinuidad en las fallas.

3.1.1.2 Propiedades petrofísicas del sistema

Los datos petrofísicos son obtenidos a nivel de laboratorio y estos valores se procura que deban ser representativos de las características del yacimiento, estos datos petrofísicos son: la porosidad, la permeabilidad, las saturaciones de cada fase que satura el yacimiento, las permeabilidades relativas de cada fase, la presión capilar entre diferentes interfaces y la compresibilidad de la formación.

³⁴SEPULVEDA J. HUMBERTO F. "Simulación de yacimientos: Principios, conceptos y construcción de mallas". p12.

3.1.1.3 Características PVT de los fluidos

Las propiedades de los fluidos son obtenidas a nivel de laboratorio, este es un proceso exhaustivo y complicado en el cual el objetivo es caracterizar de mejor manera los fluidos que saturan el yacimiento. Algunas de las propiedades de los fluidos que son necesarias al momento de la simulación numérica son: los factores volumétricos de cada fase, las viscosidades de cada fase, la compresibilidad de cada fase, la presión de saturación y el comportamiento de fases.

3.1.1.4 Información adicional

Dentro de la información adicional que es necesaria introducir al simulador se encuentra todo lo relacionado con las características de los pozos como, el radio de perforación, el tipo de completamiento y las restricciones; y también los tiempos de simulación durante el cual van a ser corridos los modelos.

3.1.2 Tipos de enmallados

El tipo de enmallado es la forma en la cual va ser modelada la diferencia finita que hace parte del modelo de simulación, principalmente existen dos tipos de enmallados los cuales son, el enmallado cartesiano y el enmallado radial, también se cuenta con tercer tipo de enmallado pero el cual es la combinación entre el enmallado radial y el enmallado cartesiano denominado enmallado híbrido. A continuación se describen los dos tipos principales de enmallados los cuales son los principales al momento de realizar los modelos de simulación numérica.

3.1.2.1 Enmallado cartesiano

Este tipo de enmallado es característico por que el modelamiento del flujo que este va a realizar es de manera lineal y es este, el más utilizado a nivel de la simulación numérica de yacimientos.

3.1.2.2 Enmallado radial

El modelamiento del flujo en este tipo de enmallado es de forma radial y se obtienen buenos resultados en el modelamiento de flujo en los pozos con los que cuenta el modelo de simulación.

3.2 DESARROLLO DEL MODELO BASE DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*.

En esta sección se pretende describir todas las características necesarias con las que debe contar el modelo de simulación, las cuales fueron descritas en la sección anterior, el modelo de simulación descrito a continuación es el ajuste de los resultados obtenidos de una prueba de tubo de combustión la cual fue realizada por YATTE F.³⁵ mediante el uso de la simulación numérica.

Tanto las dimensiones y características del grid, las condiciones iniciales, las propiedades petrofísicas, las características del PVT de fluidos, la cinética de las reacciones y los parámetros asociados a los pozos; son obtenidos de los valores adquiridos en el desarrollo de la prueba de tubo de combustión física.

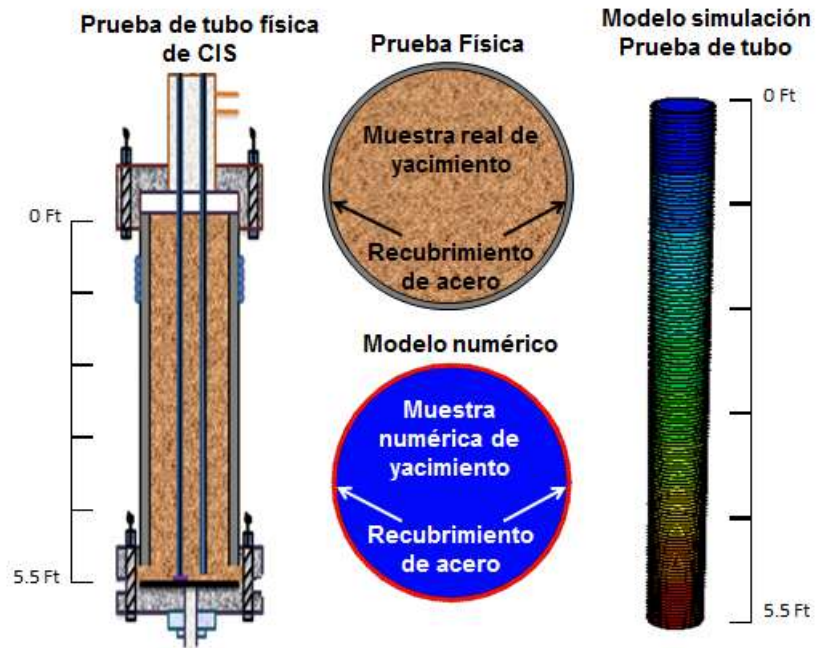
3.2.1 Enmallado de simulación

Las características con las que cuenta el modelo de simulación, tienen que representar de la mejor manera las propiedades del tubo de combustión, debido a la geometría cilíndrica con la que cuenta, el enmallado del modelo de simulación es de tipo radial. La configuración del modelo debe contar con el diseño del

³⁵ YATTE FABIAN. "Estudio analítico para determinar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante la simulación numérica de una prueba de tubo". UIS. 2011.

espacio en el cual se introduce la muestra del yacimiento y del material que recubre la muestra que generalmente es acero.

Figura 17. Esquema comparativo modelo físico y modelo numérico



En la Tabla 4 y 5 se definen las dimensiones del grid y también la discretización llevada a cabo en el modelo base de simulación, donde en el modelo se toman dos divisiones radiales para representar tanto la muestra de yacimiento como el acero que la recubre.

Tabla 4. Dimensiones del Grid

Dimensiones del Grid	
Propiedad	Valor (Ft)
Longitud	5.5
Diámetro interno	0.327
Radio de la muestra	0.165
Espesor del acero	0.006663
Diámetro total	0.337

Fuente: Informe de resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP2010.

Tabla 5. Discretización del Grid

Discretización del Grid	
Propiedad	Valor
Divisiones en r	2
Divisiones en θ	1
Divisiones en K	128
Espesor de celda en k	0.0429687 (Ft)
Celdas totales	256

Fuente: Tomado y modificado YATTE FABIAN. "Estudio analítico para determinar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante la simulación numérica de una prueba de tubo". UIS. 2011.

En esta parte de la herramienta de simulación se definen las condiciones iniciales del tubo de combustión las cuales se encuentran descritas de mejor manera en la Tabla 6.

Tabla 6. Condiciones iniciales

Condiciones iniciales		
Propiedad	Valor	Unidad
Presión inicial	3220	Psia
Temperatura inicial	186	°F

3.2.2 Propiedades petrofísicas del sistema.

Es importante definir las características petrofísicas de la muestra al momento de desarrollar el modelo de simulación, y es el siguiente paso cuando se tiene ya definido el dimensionamiento del grid. Teniendo en cuenta que se tienen que introducir valores de las propiedades como la porosidad, la permeabilidad y las saturaciones iniciales de cada fase presente en el sistema, estos valores se encuentran descritos en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones petrofísicas

Condiciones iniciales		
Propiedad	Valor	Unidad
Porosidad	0.395	Fracción
Permeabilidad i, j, k	5000	mD
Saturación inicial de aceite	0.84	Fracción
Saturación inicial de agua	0.16	Fracción
Presión de referencia Poro	3100	Psia
Porosidad del acero	0	Fracción
Compresibilidad de la formación	4.45E-06	Psia ⁻¹

La definición del comportamiento de las curvas de permeabilidades relativas agua-aceite y liquido-gas son desarrolladas por el simulador, el cual para realizar este proceso necesita que se le introduzcan los puntos críticos o end points de las saturaciones de cada fase presente en el modelo, estos valores se encuentran en la Tabla 8 a continuación.

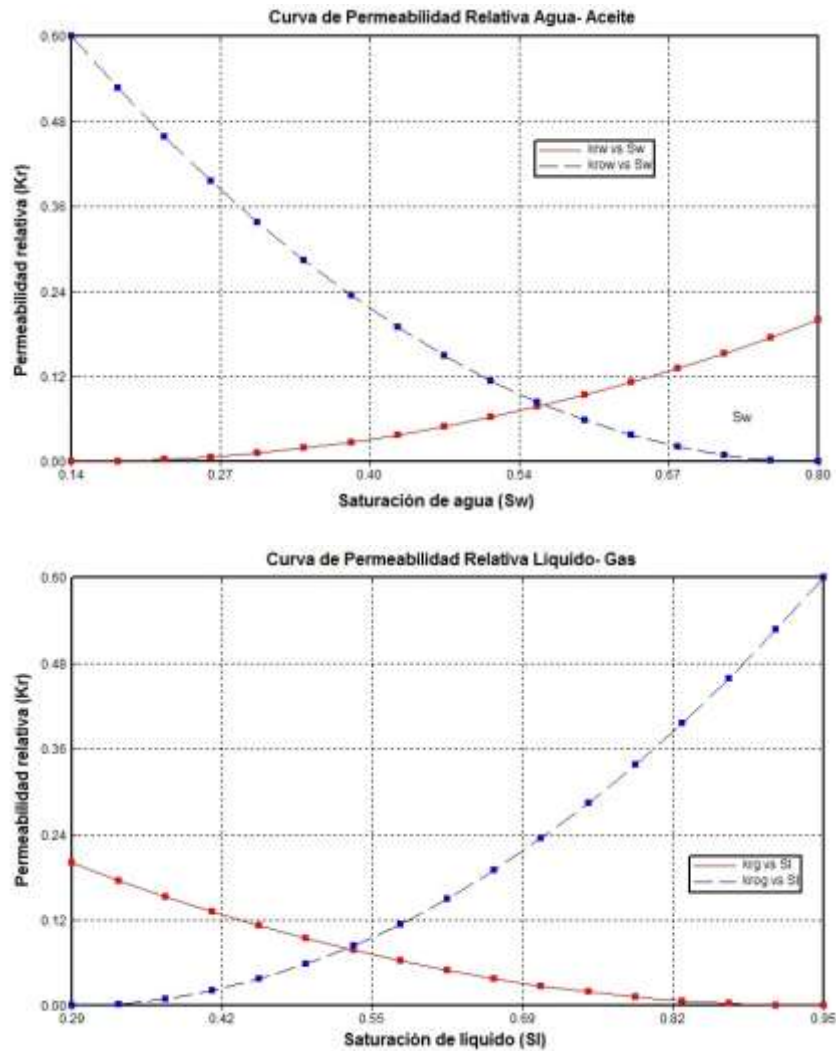
Tabla 8. End points

Propiedad	Valor
Saturación de agua connata	0.14
Saturación de agua critica	0.14
Saturación de aceite irreducible (Curva Agua-Aceite)	0.20
Saturación de aceite residual irreducible (Curva Agua-Aceite)	0.20
Saturación de aceite irreducible (Curva Gas-Liquido)	0.15
Saturación de aceite residual (Curva Gas-Liquido)	0.15
Saturación de gas connata	0.05
Saturación critica de gas	0.05
Permeabilidad relativa aceite en saturación de agua connata	0.60
Permeabilidad relativa agua en saturación de aceite irreducible	0.20
Permeabilidad relativa al gas en liquido connata	0.20
Exponentes n para las correlaciones de Stone	2.0

Fuente: Informe de resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP2010.

Las curvas de permeabilidades obtenidas fueron desarrolladas por el simulador utilizando la correlación de Stone y estas curvas pueden ser observadas en la Figura 18.

Figura 18. Curvas de permeabilidades relativas



Fuente: Tomado y Modificado. Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS.

Es parte importante tener en cuenta que no se incluyó el modelamiento de la curva de presión capilar, es decir se despreciaron estos efectos en el modelo de simulación.

3.2.3 Propiedades térmicas del sistema

En la simulación de una prueba de tubo de combustión se deben tener en cuenta las propiedades térmicas tanto del acero que recubre la muestra, como de la muestra de yacimiento que va ser sujeto de estudio, por esta razón propiedades como la conductividad térmica (K) y capacidad calorífica (M), cabe destacar que el valor de capacidad calorífica de la roca con la que cuenta el modelo base, hacen referencia a una muestra que está conformada por 100% de arena, siendo esta propiedad objetivo de estudio durante el desarrollo de este proyecto en el cual se evaluara el efecto que tiene la presencia de las arcillas en un proceso de combustión *in situ*. Los valores de las propiedades térmicas para la roca y el acero se encuentran descritos en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades térmicas

Propiedades térmicas iniciales		
Propiedad	Valor	Unidad
M (muestra)	30	Btu/Ft ³ -°F
M (tubo)	170	Btu/Ft ³ -°F
K (roca)	38	Btu/Ft-d-°F
K (aceite)	1.8	Btu/Ft-d-°F
K (gas)	0.64	Btu/Ft-d-°F
K (agua)	8.6	Btu/Ft-d-°F

Fuente: Tomado y modificado YATTE FABIAN. "Estudio analítico para determinar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante la simulación numérica de una prueba de tubo". UIS. 2011.

3.2.4 Modelo de fluidos base

En el proceso de combustión *in situ* las características del fluido son parte fundamental del desempeño del proceso, ya que este, es el que va a reaccionar con el oxígeno presente en el aire inyectado, por esta razón es necesario conocer las propiedades del fluido de manera correcta con el que cuenta el modelo de base de simulación. Las propiedades principales de fluido se encuentran descritas en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades del fluido

Propiedades del fluido a condiciones de yacimiento		
Propiedad	Valor	Unidad
Gravedad API	13	°API
Densidad del aceite	58	Lb/Ft ³
Viscosidad del aceite	149	cP
Densidad del agua	61.10	Lb/Ft ³
Factor volumétrico de formación del aceite	1.132	Bbl/STB

El agrupamiento por pseudo-componentes del fluido con el cual cuenta el modelo base, es parte fundamental para la simulación del proceso de combustión *in situ*, ya que estos pseudo-componentes van ser utilizados en el planteamiento de las reacciones de oxidación que tenga el modelo de simulación. Para los procesos de combustión *in situ* diferentes autores recomiendan definir los pseudo-componentes en 4 grupos por separado, los cuales son los componentes no hidrocarburos, los hidrocarburos gaseosos, los hidrocarburos de peso intermedio y los hidrocarburos pesados. En la Tabla 11 se encuentra el agrupamiento y la composición con que cuenta el modelo de fluidos del modelo base de simulación.

Tabla 11. Composición del fluido

Pseudo-Componente	Fracción molar
CO ₂	0.036
N ₂	0.029
C ₁ -NC ₄	0.465
IC ₅ -C ₂₀	0.146
C ₂₁ -C ₃₀	0.320

Fuente: Informe de resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP2010.

Debido a que la combustión *in situ* es un proceso térmico es necesario la caracterización de las constantes de equilibrio para cada pseudo-componente, las cuales deben estar caracterizadas teniendo en cuenta las altas temperaturas que

alcanza el proceso para no tener errores de convergencia y la simulación no pueda ser llevada a cabo.

Uno de los componentes principales de la combustión *in situ* es el coque o combustible, el cual debe ser incluido al modelo base de simulación como un componente independiente y para esto es necesario conocer las propiedades que se encuentran descritas en la Tabla 12.

Tabla 12. Características del coque

Propiedad	Valor	Unidad
Peso molecular	13.13	Lb/Lbmol
Densidad	79.3	Lb/Ft ³
Entalpia	4.06	BTU/Lbmol-°F

Fuente: Informe de resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP2010.

3.2.5 Modelo base de reacciones

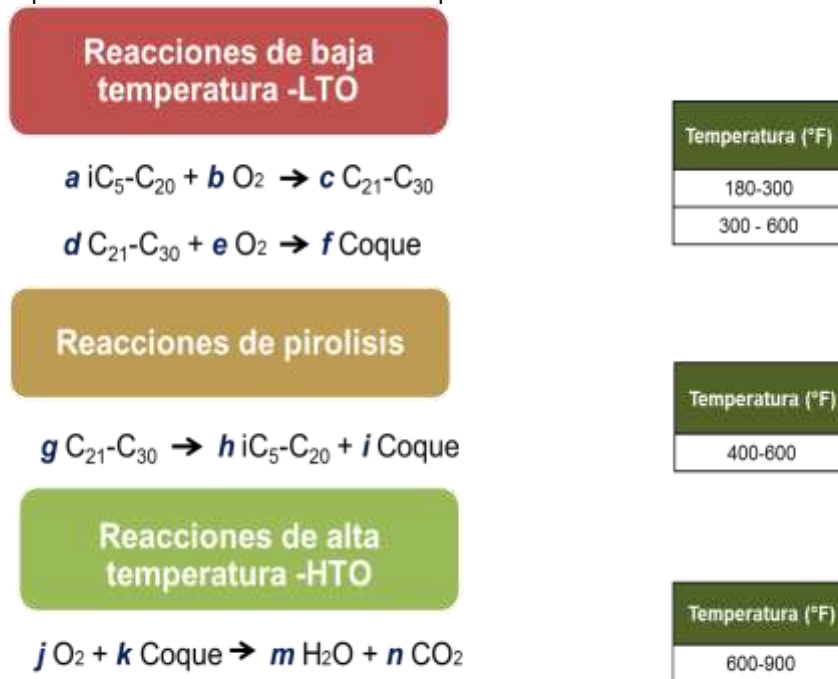
El modelamiento de las reacciones de oxidación que son necesarias para la simulación del proceso de combustión *in situ*, son la parte fundamental del proceso ya que estas definirán la respuesta que tendrá la muestra a la aplicación del proceso. Para este modelo se plantearon cuatro reacciones principales, dos reacciones de baja temperatura (LTO), una reacción de pirolisis y una reacción de alta temperatura (HTO), es necesario caracterizar las reacciones introduciendo los valores de propiedades como la energía que libera la reacción (Entalpia), el factor de frecuencia de la reacción y la energía de activación necesaria para que esta ocurra; estos valores están descritos en la Tabla 13 para cada una de las cuatro reacciones planteadas y en la Figura 19 se encuentra un esquema de la reacciones del modelo base de simulación, donde se pueden visualizar que componentes hacen parte de cada una de las reacciones.

Tabla 13. Reacciones químicas

	Reacción 1 LTO	Reacción 2 LTO	Reacción 3 Pirolisis	Reacción 4 HTO
Factor de Frecuencia	70.83	1'000,000	1'000,0000	1'000,000
Entalpía (BTU/lbmol)	292,065	900,000	0.0	180000
Energía de Activación. (BTU/lbmol)	10,000	20,000	40,000	22,000

Fuente: Tomado y modificado YATTE FABIAN. "Estudio analítico para determinar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante la simulación numérica de una prueba de tubo". UIS. 2011.

Figura 19. Esquema de las reacciones de oxidación presentes en el modelo base



$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, m, n \rightarrow$ representan los coeficientes de las reacciones

3.2.6 Información adicional de la simulación del modelo base

Las pruebas de tubo constan de un arreglo de termocuplas a lo largo del tubo con el objetivo de registrar la temperatura a medida que el frente de combustión avanza a través del mismo, por esta razón es importante ubicar termocuplas

también en el modelo base de simulación, para llevar a cabo esto se seleccionaron 20 termocuplas las cuales son ubicadas estratégicamente en el modelo base de simulación con el fin de tener una respuesta óptima al comportamiento de la temperatura, estas termocuplas están ubicadas equidistantemente las unas de las otras y distribuidas tanto en el recubrimiento de acero como en la muestra del modelo, equitativamente, su ubicación en las coordenadas K se encuentra descrita en la Tabla 14.

Tabla 14. Ubicación de las termocuplas

Ubicación celda (K)	Distancia tubo (Ft)
2	0.043
14	0.558
26	1.074
38	1.589
50	2.105
62	2.621
74	3.136
86	3.632
98	4.168
110	4.683

Debido a que se busca que ocurra la ignición entre el hidrocarburo presente y el oxígeno inyectado, es necesaria la ubicación de calentadores con el fin de elevar la temperatura a valores cercanos a los 500°F para que el oxígeno reaccione con el crudo y produzca la ignición del frente de combustión. Estos calentadores están ubicados en las tres primeras capas en dirección (K) del modelo base de tubo de combustión. Los tres calentadores fueron ajustados de tal manera que suministraran una tasa neta de calor de 1000 BTU/d y un coeficiente de transferencia de calor de 100 BTU/d-°F.

Definidas ya las características principales en cuanto a la caracterización del modelo de simulación, es fundamental definir tanto el pozo inyector de aire como el productor de fluidos, los cuales con el objetivo de simular la prueba se ubican en el tope y fondo de la muestra respectivamente. Algunas de las características más importantes de los pozos se encuentran en la Tabla 15.

Tabla 15. Propiedades características de los pozos

Propiedad	Valor	Unidad
Ubicación inyector	1,1,1	i,j,k
Presión de inyección (BHP MAX)	4500	Psia
Tasa de inyección	270	Ft ³ /d
Temperatura de inyección	186	°F
Composición del aire inyectado	0.21 de O ₂ 0.79 de N ₂	Fracción
Ubicación productor	1,1,128	i,j,k
Presión de producción (BHP MIN)	3220	Psia

Definido las ubicaciones y las condiciones tanto del pozo inyector como el productor es necesario establecer el calendario de inyección y producción en el cual se deben tener en cuenta los tiempos en los cuales se inyecta el Nitrógeno para purgar la muestra, el tiempo en el cual se inicia la inyección de aire y el tiempo de la producción de fluidos de la muestra.

En la Figura 20 se puede observar el calendario de inyección-producción de la simulación de la prueba de tubo de combustión, en la cual se observa que la duración de la prueba es de 27 horas, el tiempo en el cual se inyecta el Nitrógeno (N₂) finaliza aproximadamente a las 16 horas, los calentadores fueron activados a partir de las 13 horas y la inyección de aire se inició a las 16.5 horas y hay que tener en cuenta que la producción de fluidos fue permitida desde el inicio de la simulación numérica.

Figura 20. Esquema del calendario de inyección-producción



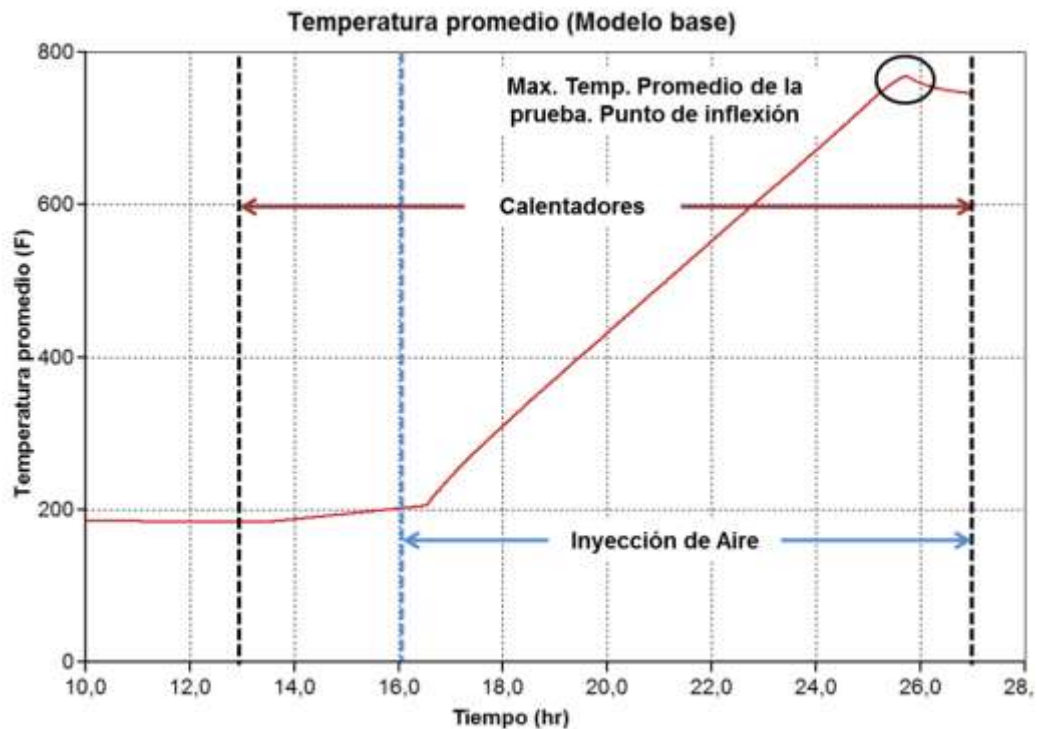
3.2.7 Resultados preliminares del modelo base de simulación

Dentro de los parámetros que van a ser objeto de estudio en esta investigación se encuentran el comportamiento del factor de recobro, la producción de fluidos, los parámetros de combustión, perfiles de combustión y los gases de combustión. Por esta razón a continuación se describen los resultados preliminares del modelo base de simulación de la prueba de tubo de combustión, el cual cuenta con una muestra de 100% arena.

Con el objetivo de poder visualizar los resultados de los parámetros de la simulación del proceso de combustión *in situ*, es necesario habilitar las variables dentro del simulador como lo son la producción de coque, los perfiles de las temperaturas, la visualización del frente de combustión y las termocuplas del sistema.

En la Figura 21 se encuentra el comportamiento de la temperatura promedio de la muestra de yacimiento, el cual tiene un comportamiento de crecimiento lineal a partir de la inyección de aire, se puede observar un punto de inflexión en la curva siendo este un indicativo de la temperatura promedio máxima que alcanzó la muestra por la combustión, pero también da a conocer un factor importante que es el tiempo que duro la simulación de la prueba, debido a que a partir de este punto comienza a decrecer la temperatura promedio, dando a conocer que el frente de combustión ya ha llegado al fondo de la muestra de yacimiento ubicada en el tubo de combustión.

Figura 21. Temperatura promedio modelo base (100% Arena)



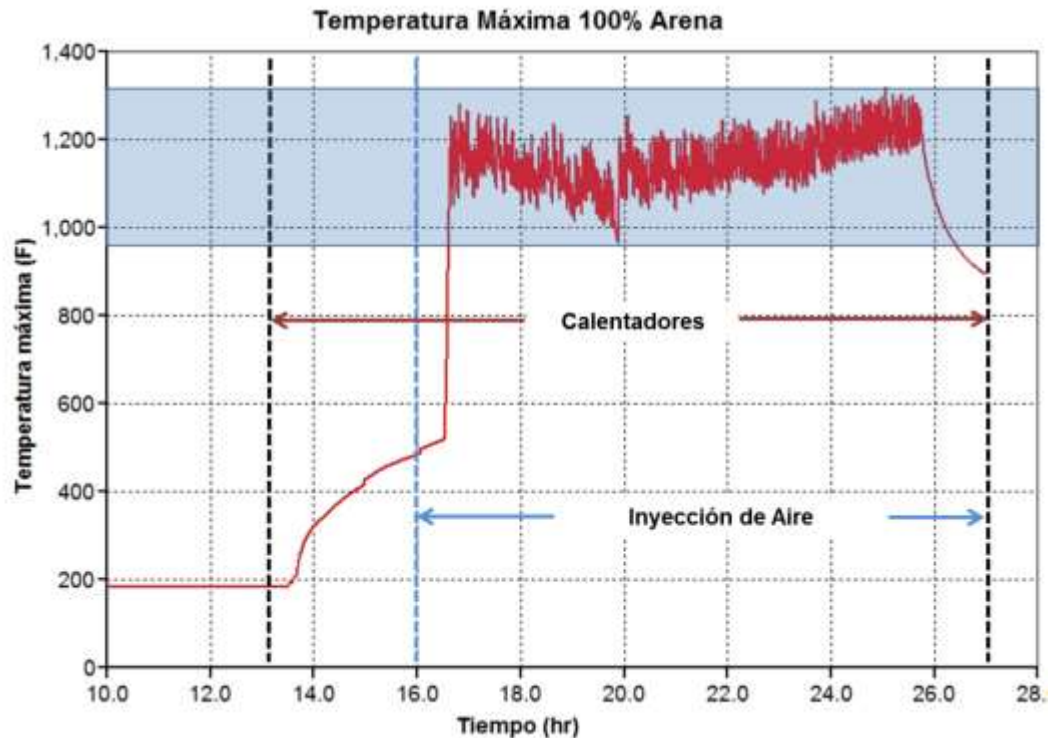
Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator-STARS, Results Graph.

De tal manera se puede decir que la simulación de la prueba de tubo de combustión *in situ* tiene una duración de aproximadamente 25.7 horas de las cuales las primeras 16 horas fueron empleadas en la purga que se le hace con Nitrógeno a la muestra y después de esta se procede la inyección de aire para producir la combustión. Gracias al calentamiento producido por los calentadores simulados se logra la ignición inducida de manera instantánea al momento de iniciar la inyección de aire y esta respuesta es observada en el cambio de la pendiente de la curva de la temperatura promedio.

El registro de la máxima temperatura alcanzada durante el transcurso de la simulación de la prueba de tubo de combustión, brinda de alguna manera un indicativo del posible régimen de reacciones que está dominando el proceso, esto se puede observar en la Figura 22, donde se puede decir que el promedio de la

temperatura máxima alcanzada durante la simulación fue aproximadamente de 1310°F , también es posible visualizar que el tiempo en el que la temperatura comienza a disminuir concuerda con el valor de la gráfica de la temperatura promedio.

Figura 22. Temperatura máxima registrada

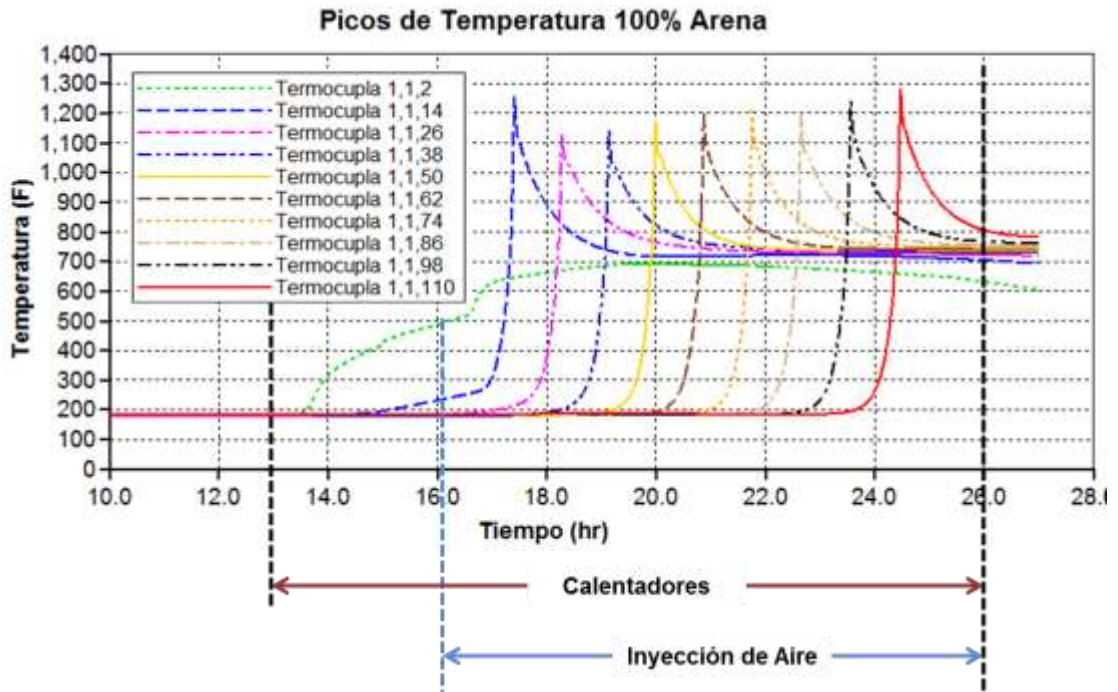


Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results Graph.

Los perfiles de temperatura son unos de los resultados principales que se obtienen de los resultados de una prueba de tubo de combustión, gracias a la simulación de las termocupas es posible obtener estos resultados de la simulación numérica de una prueba de tubo de combustión, en la Figura 23 se observan los perfiles de temperatura para cada una de las diez termocupas, los cuales muestran que los picos de temperatura se encuentran en un rango de 1115°F y 1255°F, mínimo y máximo respectivamente. Estos picos de temperatura indican que las reacciones

de oxidación están ocurriendo a alta temperatura, las cuales están dominando el proceso de combustión.

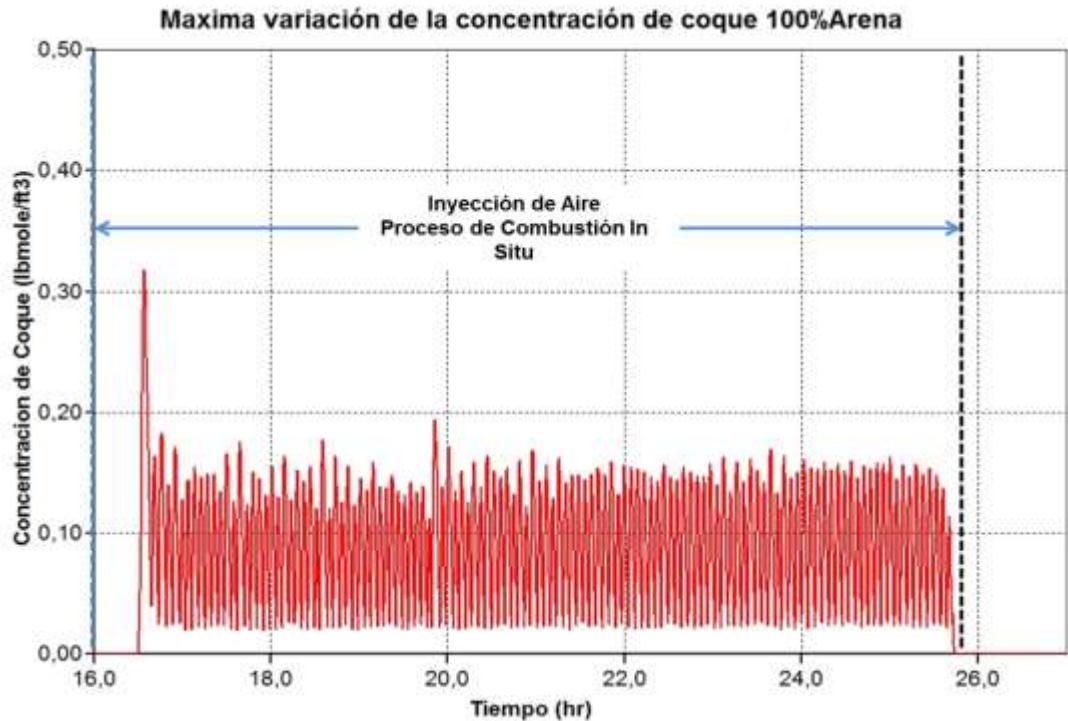
Figura 23. Picos de temperatura modelo base de simulación (100% Arena)



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results Graph.

En la Figura 24 se presenta la máxima variación que tiene el coque en el proceso, se observa un comportamiento oscilatorio lo cual es debido que a medida que se genera es consumido inmediatamente después, lo descrito anteriormente es un buen indicativo para el proceso de combustión porque muestra que las reacciones están ocurriendo de manera consecutiva en la simulación. Los valores entre los cuales oscila la depositación de coque se encuentran aproximadamente entre 0.32 y 0.03, teniendo en cuenta que las unidades de esta variable se encuentran en libra mol de coque depositado por pie cubico de roca.

Figura 24. Variación del coque depositado



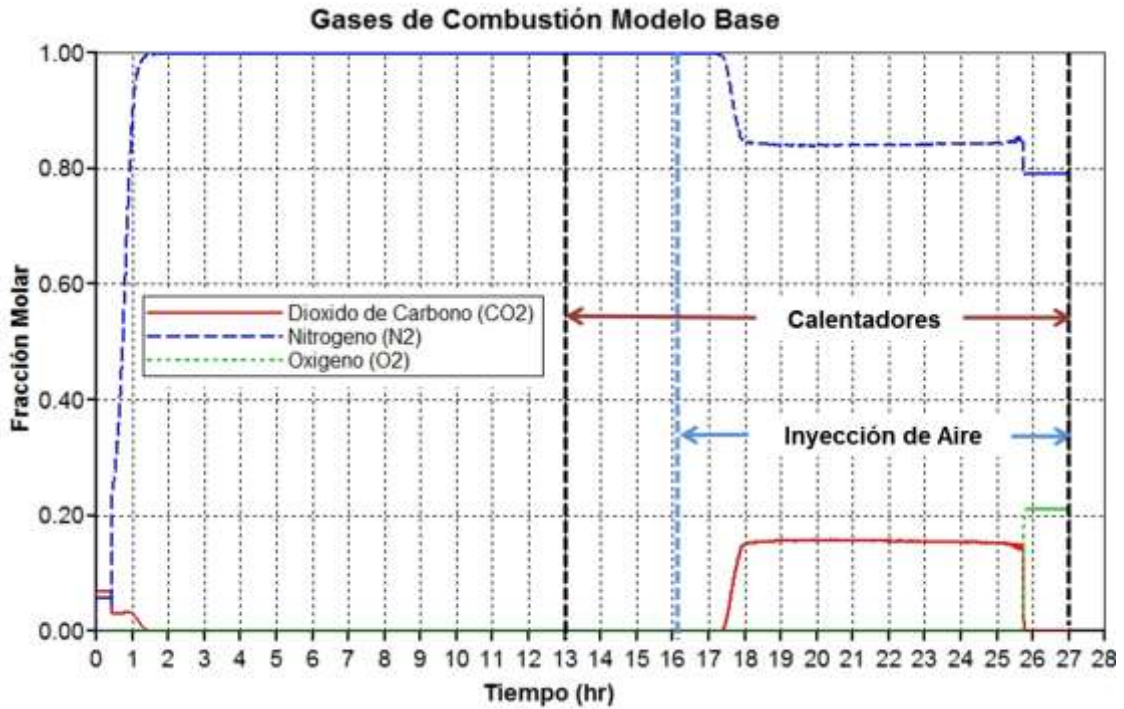
Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results Graph.

El comportamiento de los gases producidos producto de combustión como los son el Dióxido de Carbono (CO_2), el Nitrógeno (N_2) y Oxígeno (O_2) son encontrados en la Figura 25 donde se observa el comportamiento de estos gases durante todo el proceso de simulación, desde el inicio donde se observa la purga con Nitrógeno, el inicio y final de la producción de Dióxido de Carbono; y el inicio de la producción de Oxígeno lo cual es un indicativo de que ya no está reaccionando y el frente ha llegado hasta el tope de la muestra de yacimiento.

La fracción molar de Dióxido de Carbono producido debido al proceso de combustión *in situ* da a conocer si las reacciones de oxidación que están ocurriendo son a alta temperatura (HTO), el valor promedio observado durante el desarrollo de la simulación se encuentra en 0.18 fracción molar y es un indicativo

de que el proceso está dominado por las reacciones de alta temperatura, esto también lo indica el registro de las temperaturas en las termocupas.

Figura 25. Producción de los gases de combustión

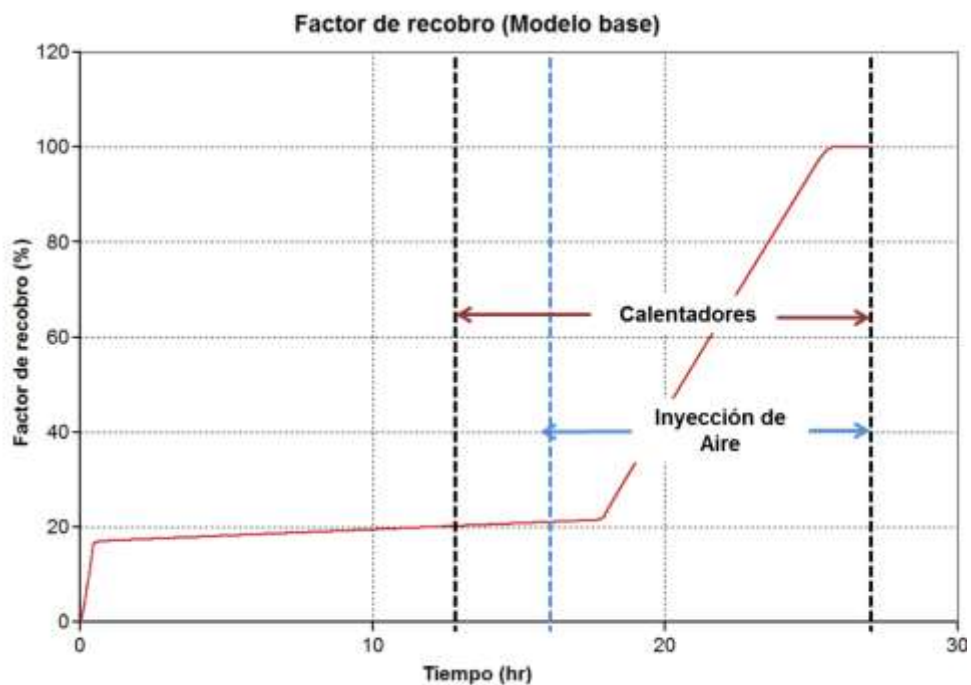


Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator-STARS, Results Graph.

El factor de recobro es el parámetro fundamental para la evaluación de la viabilidad de cualquier proyecto petrolero, en la Figura 26 se puede observar el comportamiento que tiene el factor de recobro en función del tiempo de simulación, la producción de fluidos durante la prueba está permitida desde su inicio, por esta razón se ve un aumento rápidamente debido a la purga que se hace con el nitrógeno a la muestra, durante la purga el valor del factor de recobro logra alcanzar un 22% aproximadamente y a partir de este momento se logra observar el efecto que tiene en la combustión, cambiando la pendiente y tendencia que traía anteriormente esta variable. Es posible que el tiempo en el cual se alcanza el máximo valor del factor de recobro coincide con el tiempo en el cual finaliza la prueba, obtenido del comportamiento de las gráficas de temperatura

promedio, se puede concluir que el hidrocarburo presente en la muestra es totalmente producido gracias a la aplicación del proceso de combustión *in situ*, lo cual es óptimo para pruebas de laboratorio donde se alcanzan valores de factor de recobro que oscilan entre el rango de 90 % a 100%. Este alto valor del factor de recobro puede también ser debido al posicionamiento del tubo de combustión, ya que al estar ubicado de manera vertical ayuda de mejor manera al desplazamiento de los fluidos presentes en la roca.

Figura 26. Factor de Recobro en función del tiempo de simulación



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator-STARS, Results Graph.

Los resultados presentados anteriormente son resultados preliminares del modelo base de simulación del proceso de combustión *in situ*, más adelante se va a realizar un análisis exhaustivo cuando se logren plantear y modelar los diferentes modelos de simulación del proceso con muestras que tienen presencia de arcillas, con el objetivo de dar un concepto respecto al efecto que tienen las arcillas en el proceso de combustión *in situ*.

4 DESARROLLO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA QUE REPRESENTAN LA PRESENCIA DE ARCILLAS EN LA MATRIZ DE LA ROCA EN EL DESARROLLO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

La caracterización litológica con la que cuente la roca que va a ser sujeta de cualquier tipo de estudio, es parte fundamental de la respuesta que el yacimiento va a tener a la aplicación de un proceso en particular. Los procesos de recobro térmico se ven influenciados directamente por la composición de la roca y más si este yacimiento tiene presencia de arcillas; estas arcillas pueden ser encontradas de manera dispersa en el yacimiento y en capas intercaladas con la arena.

Para fines de desarrollar este proyecto se va a simular la presencia de arcillas de manera dispersa en la matriz de la roca sometida al proceso de combustión *in situ*, teniendo en cuenta la variación que causa esta arcilla en la propiedad de la capacidad calorífica de la roca y esto va a ser desarrollado en el presente capítulo.

4.1 RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD CALORÍFICA Y EL PORCENTAJE DE ARCILLA PRESENTE EN LA ROCA

La capacidad calorífica de las rocas saturadas es definida como la cantidad de energía (BTU) que la roca y los fluidos que la saturan pueden almacenar a medida que se incrementa la temperatura (°F) en un volumen de roca determinado (Ft³)³⁶. Está definida por la siguiente ecuación:

$$M = \rho_1 C_1 = \emptyset(\rho_o S_o C_o + \rho_w S_w C_w + \rho_g S_g C_g) + (1 - \emptyset)\rho_r C_r \quad (8)$$

³⁶ GONZALO G.L Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: "Inyección Cíclica y Continua de Vapor". Capítulo 3. Noviembre de 1989.

Dónde:

$M, (\rho_1 C_1)$: es la capacidad calorífica cuyas unidades son $\text{BTU}/\text{Ft}^3 \text{ } ^\circ\text{F}$.

S_o, S_w, S_g : es la saturación de petróleo, agua y gas respectivamente, fracción.

P_o, P_w, P_g, P_f : Son las densidades correspondientes en lb/Ft^3

C_o, C_w, C_f, C_r : Son los calores específicos en $\text{BTU}/\text{Lb} \text{ } ^\circ\text{F}$

Teniendo en cuenta que los valores de porosidad y las propiedades de los fluidos permanecen constantes para el desarrollo de este proyecto, la variación que tendría la roca debido a la presencia de acilla sería en la densidad y el calor específico de la muestra. El modelo base de simulación cuenta con un valor de capacidad calorífica de $30 \text{ BTU}/\text{Ft}^3 \text{ } ^\circ\text{F}$, en el cual los valores procedentes para el cálculo se encuentran en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de los parámetros para el cálculo de M para el modelo base

	Saturación (Fracción)	Densidad (Lb/Ft^3)	Calor Especifico ($\text{BTU}/\text{Lb} \text{ } ^\circ\text{F}$)
Aceite	0.84	57.871	Calcular
Agua	0.16	61.10	Calcular
Gas	0.0	6.2	No aplica
Roca	No Aplica	153.635	0.183

El cálculo de los valores de calor específico para cada fluido que satura la roca, fue llevado a cabo mediante el uso de las siguientes ecuaciones³⁷:

$$C_o = (0.388 + 0.00045 * T) / \gamma_o^{0.5} \quad (9)$$

Dónde:

C_o : Calor específico del aceite, $\text{BTU}/\text{Lb} \text{ } ^\circ\text{F}$.

T: Temperatura, $^\circ\text{F}$.

Gravedad específica del petróleo.

³⁷ GONZALO G.L Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: Inyección Cíclica y Continua de Vapor". Cap. 3.8.

$$C_w = 1.054 - 6.05 * 10^{-4} * T + 1.79 * 10^{-6} * T^2 \quad (10)$$

Dónde:

C_w : Calor específico del agua, BTU/Lb-°F.

T: Temperatura, °F.

$$C_g = 4.0 + n * (1.30 + 0.012 * T) \quad (11)$$

Dónde:

C_g : Calor específico del gas, BTU/Lb-°F.

n: número de átomos de carbonos por mol ($n > 3$)

T: Temperatura, °F.

El valor de calor específico es característico para cada roca, en la Tabla 17 se encuentran los valores para algunos tipos de roca diferentes, teniendo en cuenta principalmente los valores de la arena y la arcilla para el desarrollo de este proyecto, estos valores de calor específico se encuentran para las rocas sin saturación de ningún fluido lo cual es de gran ayuda debido a que de esta manera se tiene que introducir en la ecuación de la capacidad calorífica para proceder a calcularla.

Tabla 17. Valores de capacidad calorífica para diferentes rocas secas

Tipo de roca	Calor Especifico (BTU/Lb-°F)
Arena fina	0.183
Arcilla	0.192
Limolita	0.204
Caliza	0.202

Fuente: Tomado y modificado. GONZALO G.L Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: Inyección Cíclica y Continua de Vapor". Capítulo 3. Noviembre de 1989.

Para evaluar el efecto que tiene la presencia de arcillas en la roca durante el desarrollo de un proceso de combustión, se plantean cuatro modelos de simulación donde las arcillas van a estar directamente relacionadas con la capacidad calorífica de cada roca, en los cuatro modelos está incluido el modelo base de simulación el cual cuanta con 100% de arena en la matriz de la roca y un valor de capacidad calorífica de 30 BTU/Ft³-°F.

En la Tabla 18 se encuentran descritos los cuatro modelos de simulación que se plantearon, estos se encuentran relacionados con el porcentaje de arcilla dispersa y de arena los cuales componen la matriz de la roca.

Tabla 18. Modelos de simulación planteados

Tipo de roca	% Arena - %Arcilla
Modelo base	100% - 0%
Modelo 1	85% - 15%
Modelo 2	70% - 30%
Modelo 3	55% - 45%

Con los modelos de simulación con los cuales se va a trabajar ya identificados se procede a realizar el cálculo de la capacidad que relacione los modelos presentados en la tabla anterior, debido a que esta es la forma en que la arcilla va a ser tomada en cuenta al momento de realizar la simulación numérica.

Para realizar el cálculo de la capacidad calorífica de cada modelo hay que tener en cuenta que el valor de la densidad y el calor específico de la roca que cambian debido a la diferente presencia de arcillas en cada modelo, los valores correspondientes a los fluidos que saturan la roca (aceite y agua) permanecen constantes para los cálculos precedentes.

En la Tabla 19 se presenta un resumen de las propiedades necesarias para el desarrollo de cada uno de los modelos planteados, teniendo en cuenta el cálculo de la capacidad calorífica.

Tabla 19. Propiedades de la roca para el desarrollo de cada modelo de simulación

	% Arena - %Arcilla	Capacidad calorífica (BTU / Ft³-°F)	Densidad de la roca (Lb/Ft³)	Calor especifico de la roca (BTU/Lb-°F)
Modelo base	100% - 0%	30	0.183	153.635
Modelo 1	85% - 15%	32.25	0.184	172.584
Modelo 2	70% - 30%	34.55	0.185	191.700
Modelo 3	55% - 45%	36.72	0.180	209.442

Según los resultados obtenidos para los modelos de simulación planteados de los valores de capacidad calorífica anteriores, a medida que el porcentaje de arcilla aumenta con relación al porcentaje de arena presente en la matriz de la roca, la capacidad calorífica aumenta y esto va a afectar directamente el proceso de simulación numérica de la combustión *in situ*.

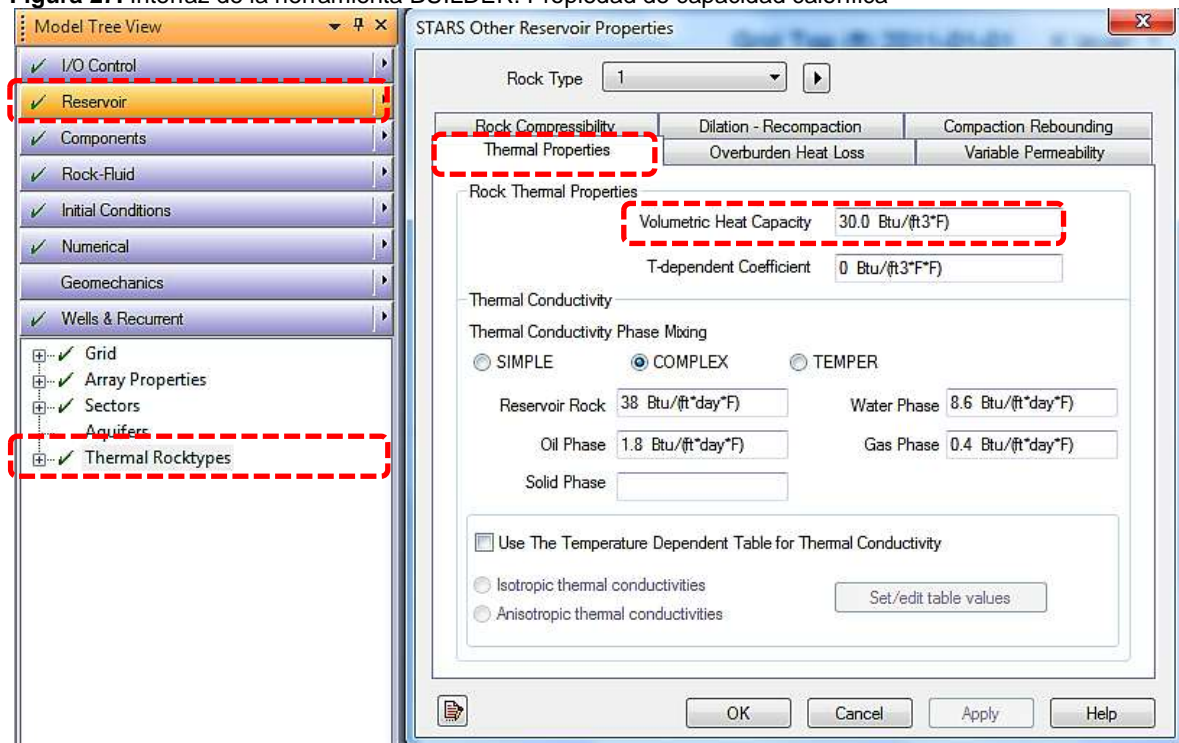
4.2 INTERFAZ NUMÉRICA PARA LA SIMULACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS.

Dentro de la herramienta BUILDER que posee el simulador CMG el cual fue utilizado para desarrollar los modelos de simulación en donde es posible definir los valores de capacidad de calorífica que viene incluida en la sección Reservoir – Rock Types - Thermal Properties – Volumetric Heat Capacity, allí se puede definir el modelo base de simulación y los tres modelos de estudio planteados anteriormente.

En la Figura 27 se encuentra un esquema de la interfaz de la herramienta BUILDER donde es posible localizar la keyword donde introducir el valor de

capacidad calorífica para desarrollar los modelos de simulación, el uso de la interfaz con la que cuenta el BUILDER es de gran ayuda ya que facilita la escritura del archivo plano de manera sistemática a medida que se van ingresando propiedades en la interfaz.

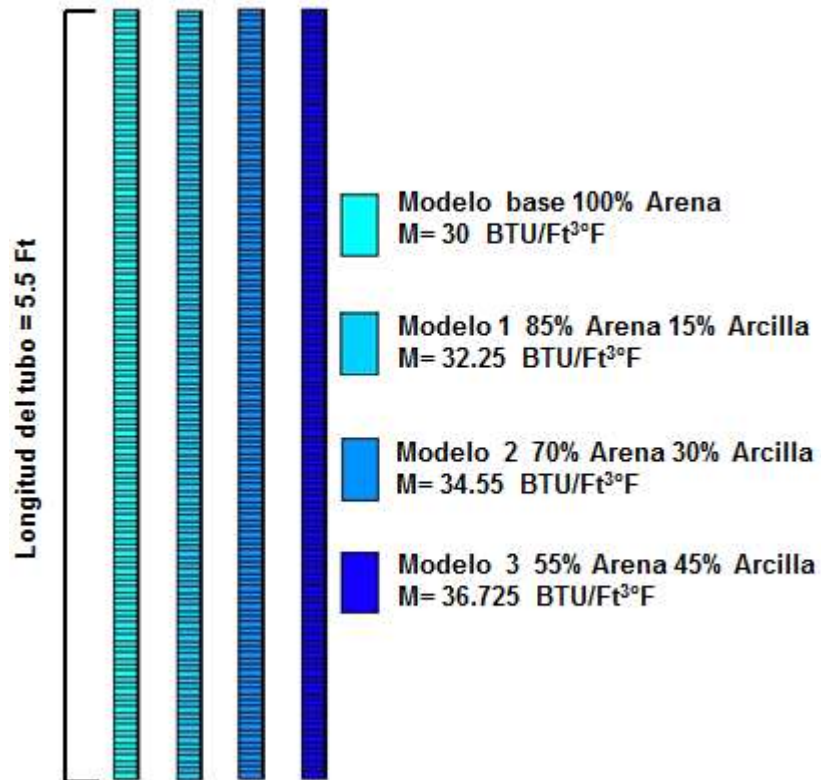
Figura 27. Interfaz de la herramienta BUILDER. Propiedad de capacidad calorífica



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS.

A partir de esto de se plantearon en el simulador numérico los tres modelos que van a ser objeto de estudio para evaluar el efecto que tiene la presencia de arcillas en la matriz de la roca en un proceso de combustión *in situ*. Es importante destacar que la única propiedad que los nuevos modelos tienen diferente es la capacidad calorífica la cual asocia la presencia de arcillas, es decir que ninguna modificación se le hicieron a los modelos con respecto a las dimensiones del modelo, la distribución y el número de celdas, las propiedades de sistema roca fluido, las reacciones de oxidación y el calendario de inyección.

Figura 28. Esquema comparativo de los modelos de simulación



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results 3D.

En la Figura 28 se esquematiza la comparación de los valores de capacidad calorífica con el cual cuentan cada modelo de simulación numérica, correspondiente al modelo base y a los modelos con la presencia de arcillas en diferente porcentaje en la matriz de la roca.

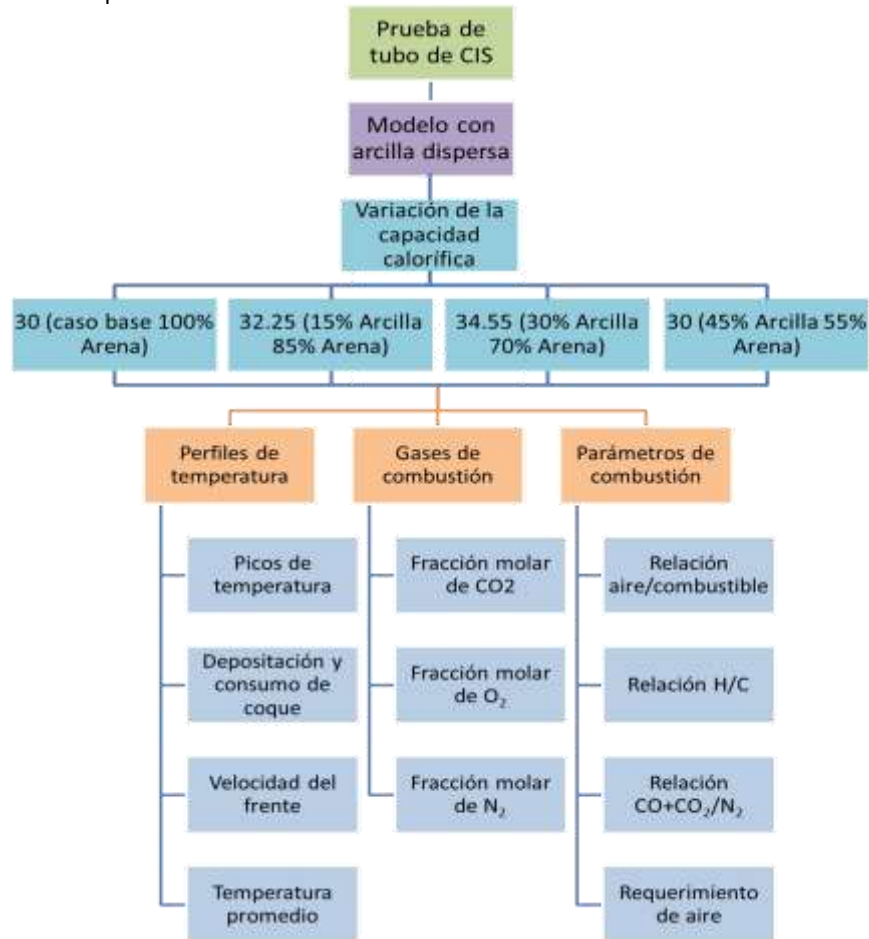
5 EFECTO DE LAS ARCILLAS Y MINERALES SOBRE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

Con el fin de analizar cuál es el efecto que tiene la presencia de arcilla en un yacimiento sometido a un proceso de combustión *in situ* se procede a comparar los resultados arrojados por la simulación realizada a cada uno de los modelos de tubo de combustión (modelo base constituido por arena limpia, modelo con 15% arcilla y 85% arena, modelo de 30% arcilla y 70% arena y modelo 45% arcilla y 55% arena), descritos anteriormente. En la figura 29 se muestra los parámetros que se analizarán de una forma detallada para comprender de una mejor manera el proceso de combustión *in situ* en tubos de combustión, además de la respectiva variación de la capacidad calorífica y el diseño para cada uno de los modelos.

Los modelos que fueron desarrollados están constituidos por el mismo aceite original *In situ* (OOIP), de tal manera que sea posible observar el comportamiento de cada parámetro y compararlos entre sí, además la tasa de inyección de aire fue un parámetro constante a lo largo del proceso.

A continuación se pueden observar los análisis de resultados realizados después de la aplicación del proceso de combustión *in situ*, mediante la evaluación de ciertas variables que son determinadas como fundamentales en la evaluación de los proyectos donde se implementa la combustión *in situ*.

Figura 29. Parámetros para analizar en cada uno de los modelos de simulación



5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

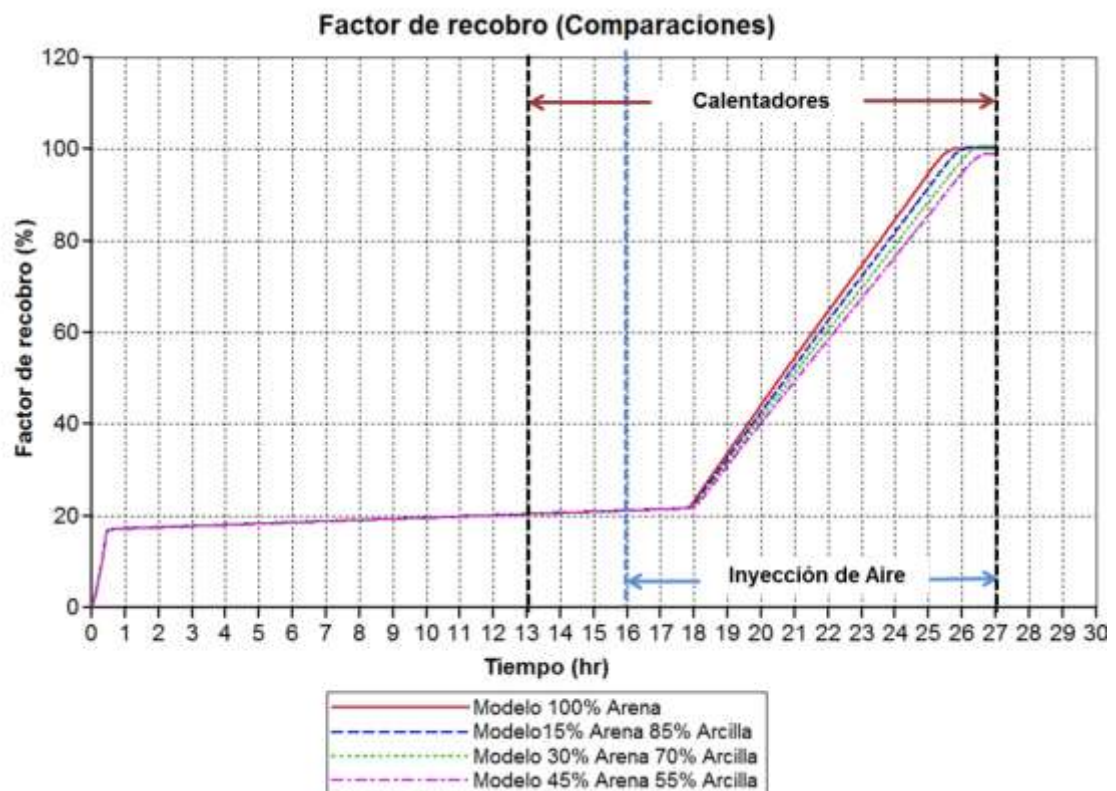
De manera similar a como se hizo en el capítulo anterior se presenta un análisis preliminar del comportamiento de los resultados obtenidos en las variables como el factor de recobro, la temperatura y la saturación de aceite de cada uno de los modelos desarrollados.

El factor de recobro es el principal parámetro de estudio en cualquier tipo de proyecto ingenieril, ya que este está directamente relacionado con la economía del proyecto, para esta investigación es importante observar el comportamiento que

tiene el factor de recobro en los diferentes modelos de simulación desarrollados, en los cual se da una idea preliminar de la influencia que tienen las arcillas durante el desarrollo de procesos de combustión *in situ*.

En la Figura 30 se logra observar el comportamiento del factor de recobro, del cual se puede decir que en todos los modelos de simulación todo el aceite presente fue desplazado debido al efecto de la combustión pero se observó que la presencia de arcillas en los modelos retraso este tiempo de respuesta por parte de los modelos, entre mayor porcentaje de arcilla más lenta fue la respuesta del modelo, esta hipótesis preliminar va ser estudiada a fondo con el estudio de los parámetros del proceso de combustión *in situ*.

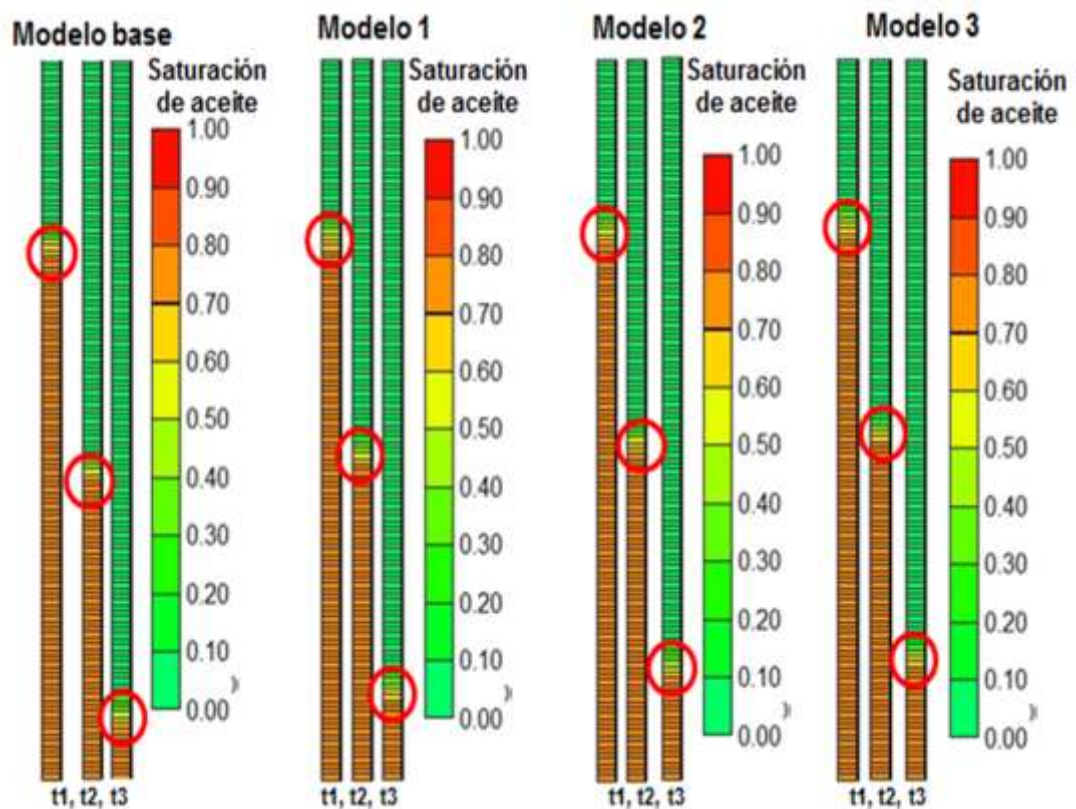
Figura 30. Comparación del factor de recobro de los modelos planteados



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator-STARS, Results graph.

Como se observó en la figura de la comparación del factor de recobro, el aceite fue desplazado totalmente por esta razón en la Figura 31 se muestra el comportamiento de la saturación de aceite en tres intervalos de tiempo diferentes, comparando los resultados de los modelos entres si, de los cuales también se puede concluir que el avance del frente es más lento a medida que se aumenta el porcentaje de arcillas en los modelos.

Figura 31. Comparación del comportamiento de la saturación de aceite en los modelos a diferentes intervalos de tiempo



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator-STARS, Results 3D.

La eficiencia de desplazamiento del proceso de combustión *in situ* en la simulación de la prueba de tubo para los diferentes modelos desarrollados, tiene un óptimo comportamiento ya que se logra observar que a medida que el frente

avanza, no deja ninguna fracción de saturación de aceite atrás ya que todo el aceite es desplazado o quemado para el avance del frente.

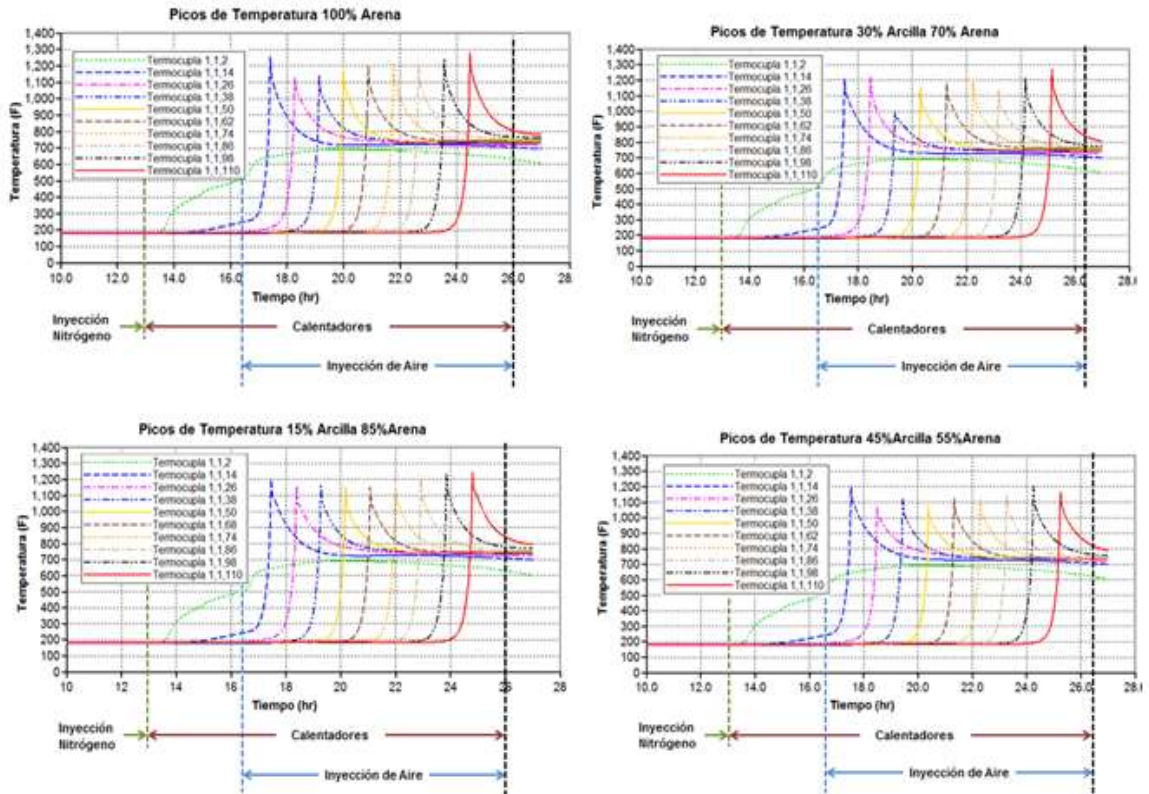
5.1.1 Perfiles de temperatura

En este caso es posible analizar los picos de temperatura, la depositación y consumo de coque, la velocidad del frente e incluso la temperatura promedio para los modelos.

5.1.2 Picos de temperatura

El análisis de los perfiles de temperatura permite determinar el régimen de reacción en el cual se encuentra el proceso, siendo lo más óptimo que las reacciones se encuentren en el régimen de alta temperatura (HTO) para lograr un buen desempeño y los mejores resultados del proceso. Los picos de temperatura en los perfiles se obtienen con la utilización de termocuplas en las pruebas de tubo de combustión. En la figura 32 se puede observar el comportamiento de la presencia de arcillas mediante la variación de la temperatura para cada caso mostrando la incidencia de la capacidad calorífica en los diferentes modelos de simulación planteados. Se logra identificar que a medida que se encuentra mayor porcentaje de arcilla los picos de temperatura disminuyen para los diferentes modelos de simulación, indicando a su vez que el consumo de combustible es menor.

Figura 32. Picos de temperatura para cada uno de los modelos

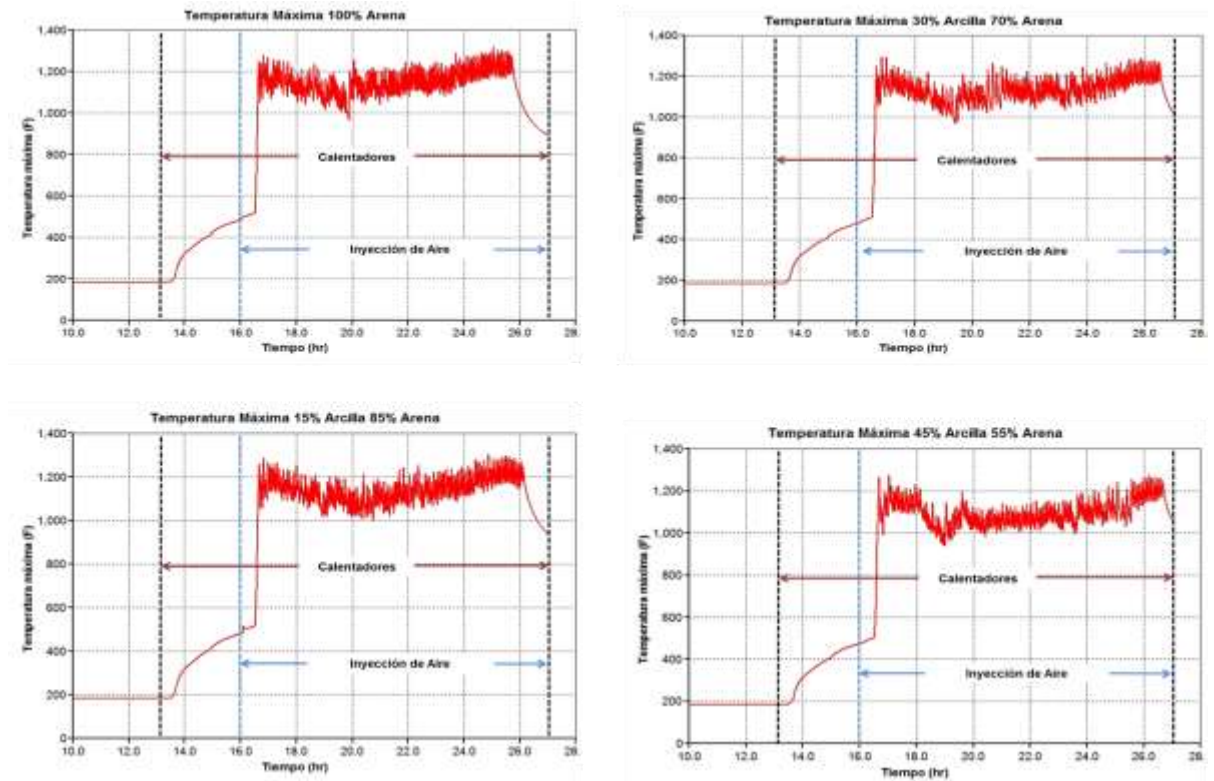


Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

- **Temperatura máxima**

La temperatura máxima registrada a través del tiempo de simulación permite dar un estimado del régimen de reacción en el cual se encuentra el proceso de combustión in situ. De tal manera se procede a comparar el comportamiento de la temperatura máxima registrada para cada modelo realizado, indicando que a mayor presencia de arcilla en los diferentes modelos, las temperaturas máximas registradas tienden a ser menores comparadas con el modelo base de simulación, lo cual se observa en la Figura 33.

Figura 33. Temperatura máxima para cada caso



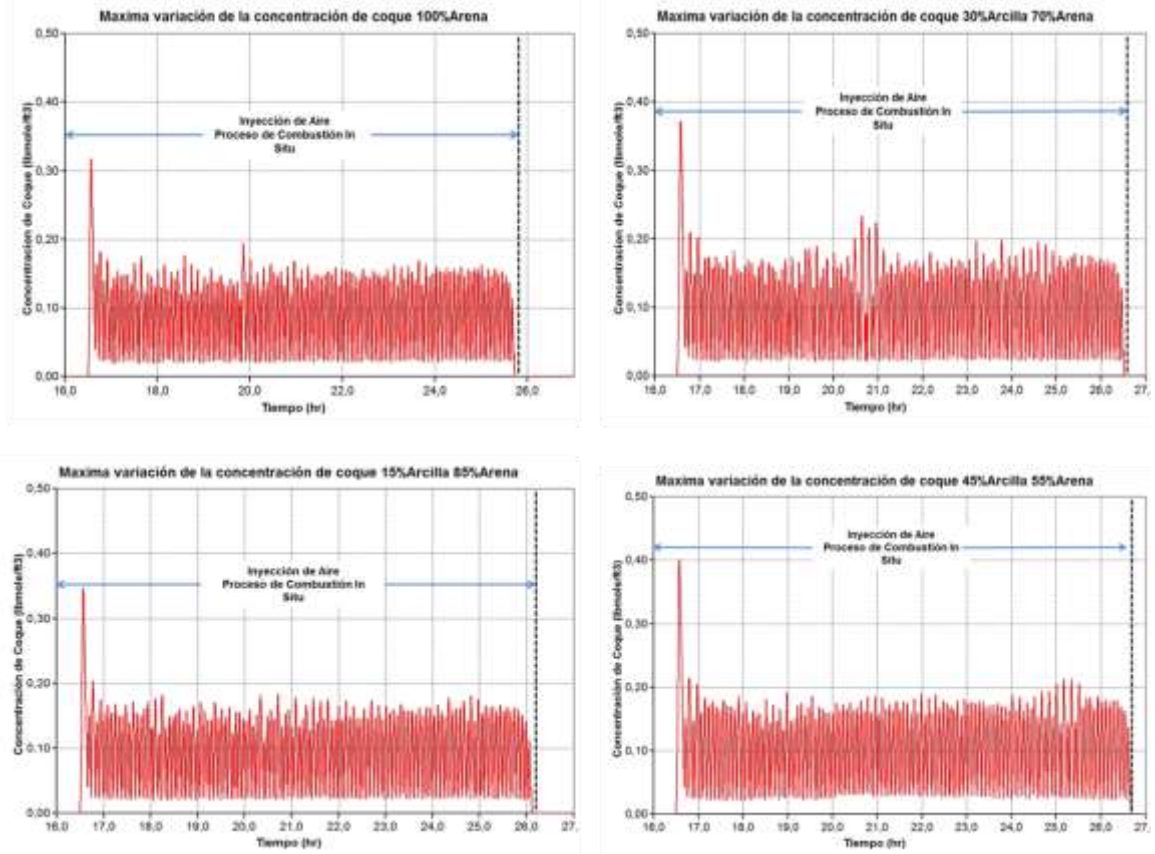
Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

5.1.2.1 Depositación de coque

La cantidad de combustible o coque depositado se rige principalmente por la reacción de oxidación a baja temperatura y es función de las propiedades del petróleo presente, como lo son la saturación de petróleo, la permeabilidad de la formación y la temperatura de la zona de combustión³⁸. Gracias a la herramienta Result Graph, se puede analizar el comportamiento del coque depositado en función del tiempo de simulación con el fin de analizar esta variable para cada uno de los modelos realizados. En la Figura 34 se observa que a medida que aumenta la cantidad de arcilla presente en los modelos la concentración de coque también aumenta, dando como resultado un comportamiento directamente proporcional.

³⁸ SARATHI, Partha. *In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices*. Oklahoma. 1999. p235.

Figura 34. Depositación y consumo de coque



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

5.1.2.2 Velocidad del frente de combustión

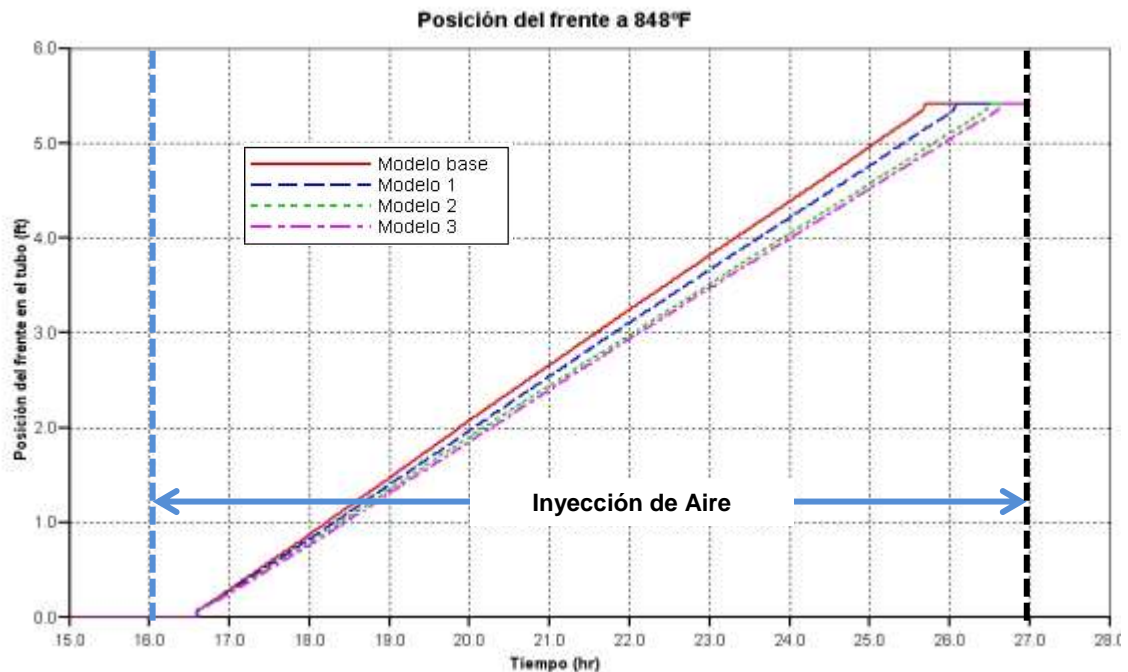
La velocidad del frente de combustión es uno de los parámetros más importantes para el control y evaluación del proceso de combustión *in situ*, este parámetro es influenciado directamente por la tasa de inyección de aire y las heterogeneidades del yacimiento. La velocidad del frente de combustión está en función del flujo de aire y de la concentración de combustible. Por lo anterior se puede inferir que la velocidad del frente de combustión es proporcional a la cantidad de oxígeno que es suministrado e inversamente proporcional a la cantidad de combustible necesario para establecer el flujo de aire³⁹.

³⁹ SARATHI, Partha. *In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices*. Oklahoma. 1999.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que las arcillas constituyen un gran porcentaje de la corteza terrestre, por lo tanto se encuentran presentes en el yacimiento. Debido a que están presentes en la formación, se les atribuye la contribución a la depositación del combustible, lo que quiere decir que la velocidad del frente es más lenta en comparación de una formación de arena limpia.

La figura 35 fue realizada con el fin de determinar y comparar la velocidad del frente de combustión en los modelos desarrollados utilizando la herramienta Results Graph. Se puede apreciar que la presencia de arcilla en la formación afecta el avance del frente de combustión haciendolo más lento.

Figura 35. Posición del frente de combustión

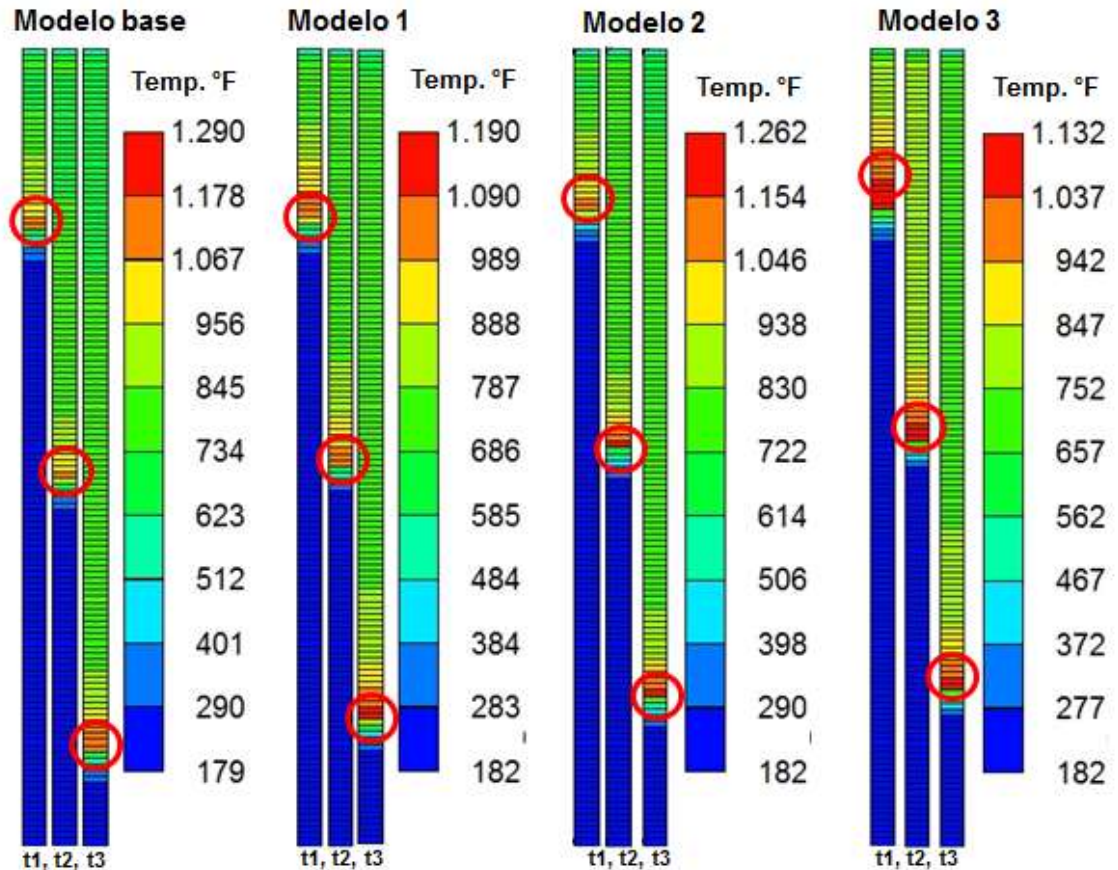


Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

En la Figura 36 se logra observar como es el avance del frente de combustión de cada uno de los modelos, los cuales son comparados entre sí, se tomaron tres

intervalos a lo largo de la simulación los cuales fueron los mismos para observar los cambios de la temperatura en los diferentes modelos y así poder determinar el efecto que tiene la presencia de las arcillas en las temperaturas y el avance del frente.

Figura 36. Comportamiento de la temperatura de los modelos de simulación a diferentes intervalos de tiempo



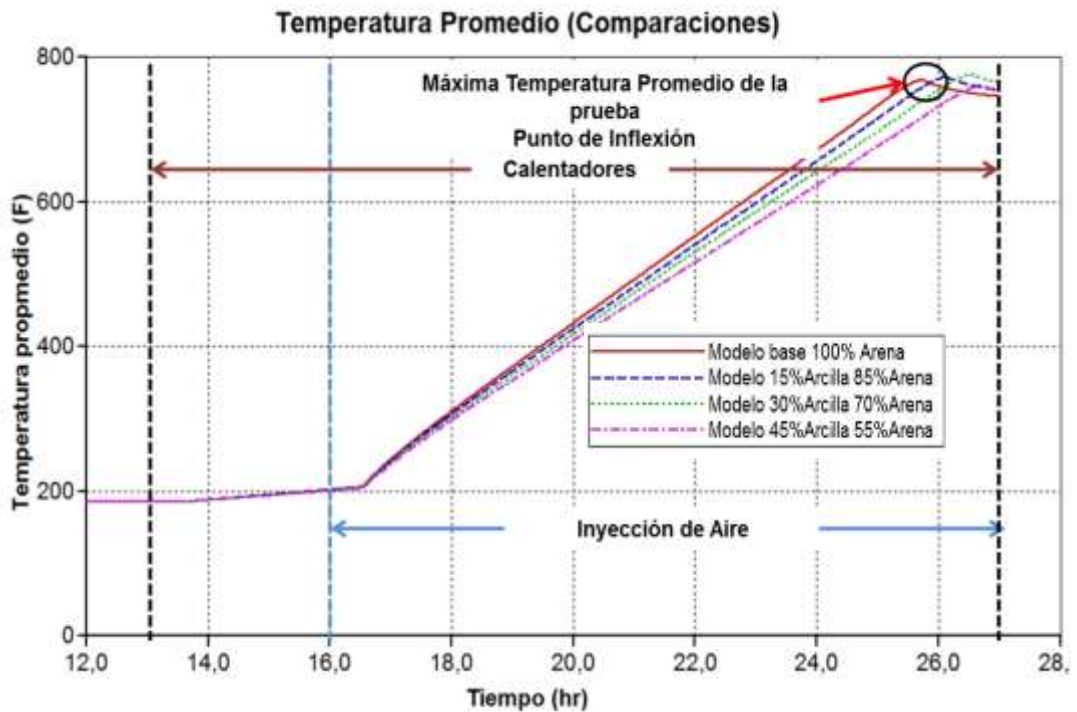
Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results 3D.

Los círculos rojos muestran que a medida que se va aumentando el porcentaje de arcilla presente en los modelos el frente es más lento y las temperaturas que se registran también van disminuyendo, esto se va a estudiar afondo analizando los resultados del comportamiento de los perfiles de temperatura para cada modelo.

5.1.2.3 Temperatura promedio

El proceso de combustión *in situ* es un proceso de recobro térmico en donde las reacciones que ocurren entre el crudo del yacimiento y el oxígeno presente en el aire inyectado aumentan la temperatura del yacimiento, por esta razón es necesario tener un estimativo del comportamiento de la temperatura promedio del yacimiento cuando es desarrollada la simulación del proceso.

Figura 37. Comparación de la temperatura promedio



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

5.1.3 Gases de combustión

La producción de óxidos de carbono (CO_2 , O_2 y N_2) asociados a la fase gaseosa, son el parámetro más importante para la evaluación y monitoreo de los procesos de combustión *in situ*, gracias a que por medio de este parámetro se puede

determinar de manera directa, el régimen de temperatura y el tipo de oxidación que le está ocurriendo al crudo en el yacimiento⁴⁰.

5.1.3.1 Fracción molar de CO₂

La producción molar de CO₂ en las pruebas de laboratorio oscila entre los valores de 12% a 15% aproximadamente determinando así que las reacciones que predominan en el proceso son las reacciones de alta temperatura; en los proyectos desarrollados en campo este valor de la producción molar de CO₂ oscila entre 9% a 11% y esto es debido a que ocurre mayor absorción del Dióxido de Carbono en la fase oleica presente inicialmente en el yacimiento⁴¹.

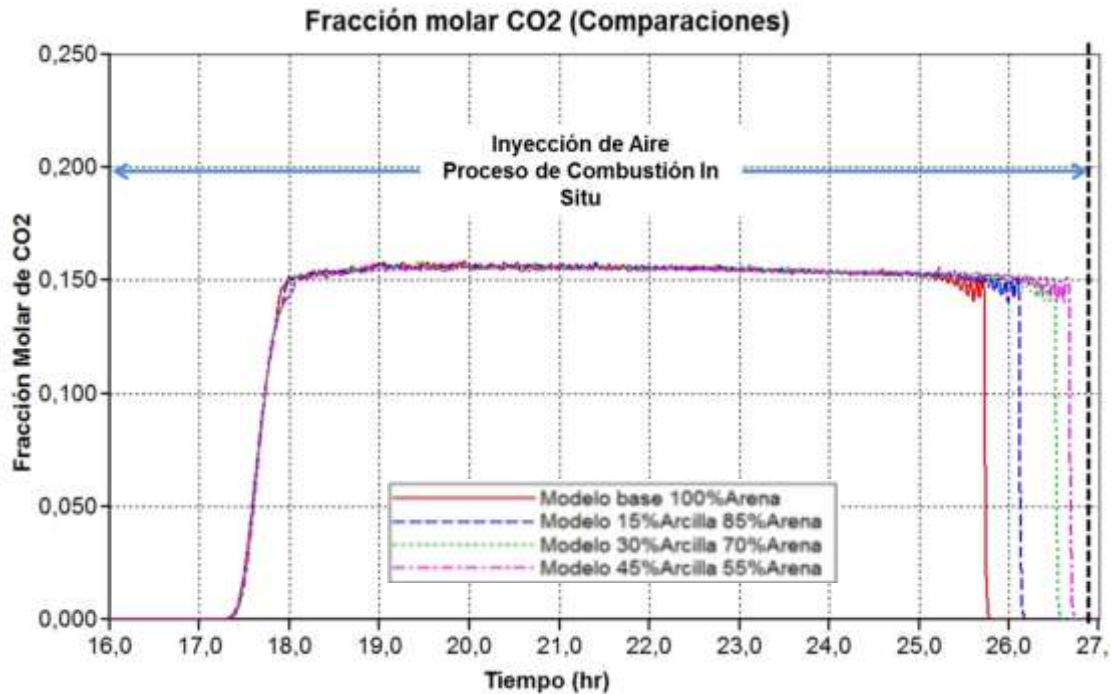
De tal manera se procede a analizar la producción molar de CO₂ obtenida en los diferentes modelos desarrollados con el proceso de combustión *in situ*. De la Figura 38 se puede concluir que existe una influencia importante en la producción de CO₂ cuando la matriz de la roca tiene la presencia de arcillas en su medio poroso, en el cual se observa una disminución de la producción de dióxido de carbono. Además el tiempo que duró la combustión *in situ* fue mayor relacionado con la cantidad de arcillas presentes en el yacimiento.

Es importante destacar que la presencia de arcillas en el desarrollo de este proyecto no varía el régimen de reacciones que domina el proceso de combustión *in situ*.

⁴⁰OLIVEROS GOMEZ, Luis Roberto. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN TÉCNICA DE PROCESOS DE COMBUSTION *IN SITU* A PARTIR DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN. UIS. 2011. p91.

⁴¹FULFORD, Richard S., "Produced Fluid Changes During a Fireflood". SPE 9005. May. 1980. p280.

Figura 38. Comparación de la fracción molar de CO₂



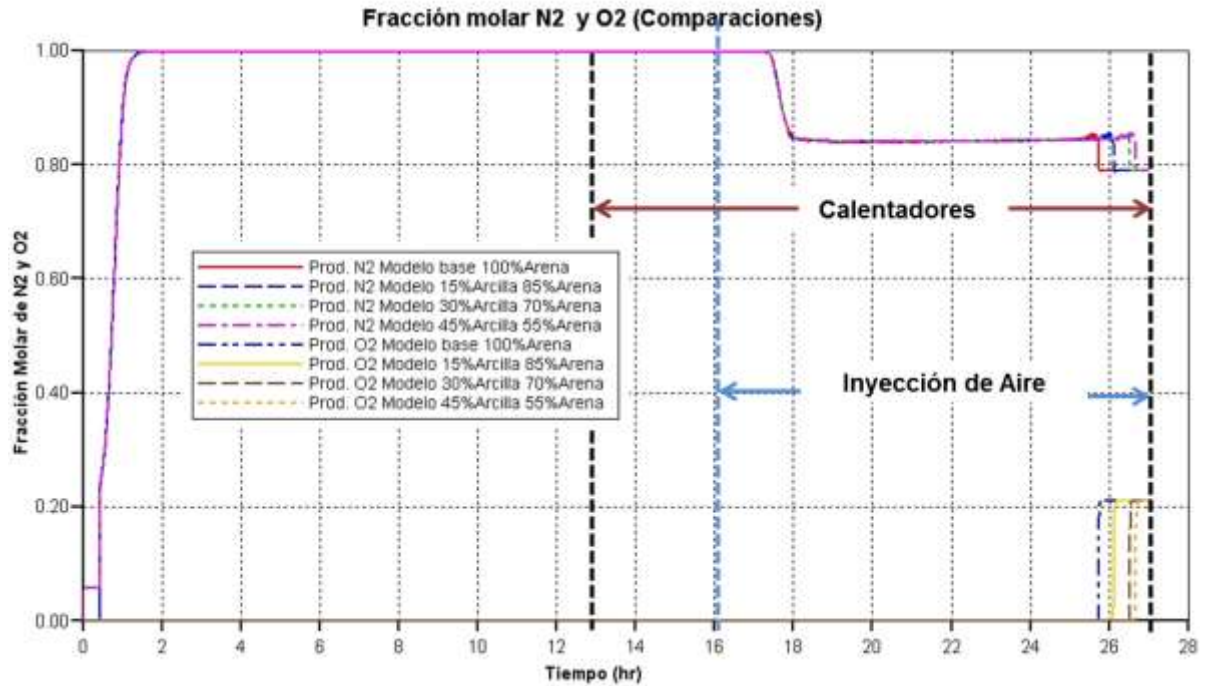
Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

5.1.3.2 Fracción molar de N₂ y O₂

La fracción molar de N₂ dentro del proceso de combustión *in situ* hace parte del aire que se inyecta, este es un componente inerte, lo que quiere decir que no reacciona con el crudo y la fracción molar producida durante ese proceso debe ser constante. Este parámetro se utiliza también como parámetro de control.

En cuanto a la fracción molar de O₂ se refiere a la cantidad de oxígeno inyectado que está reaccionando con el crudo del yacimiento, es decir lo que se produce en los gases de combustión. En la figura 39 se puede observar que cuando se tiene esta producción de oxígeno en los gases es un buen indicativo, pues posiblemente todo el oxígeno está reaccionando con el hidrocarburo.

Figura 39. Comparación de la fracción molar de N₂ y O₂



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator- STARS, Results graph.

En la Tabla 20 se muestra el porcentaje molar que corresponde a cada uno de los gases en cada modelo desarrollado, los cuales van a ser parte importante para hacer el análisis de los parámetros de combustión en los modelos desarrollados.

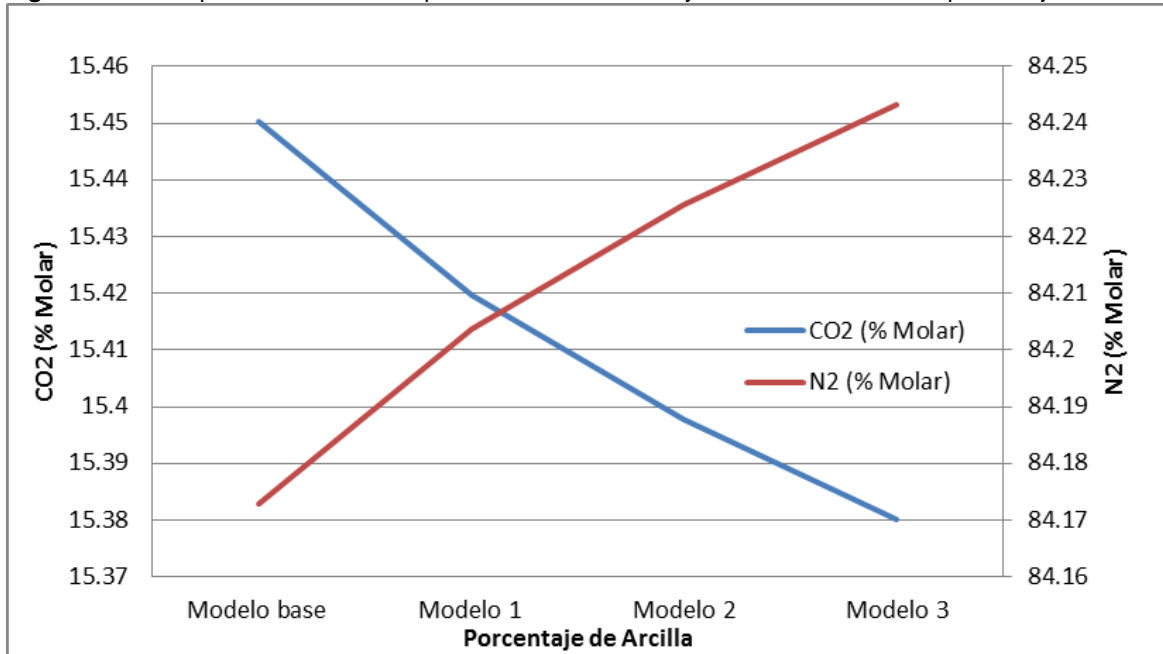
Tabla 20. Composición del gas para cada modelo

	%Arena - %Arcilla	Cap. Cal. (BTU/Lb-°F-Ft ³)	CO ₂ (% Molar)	N ₂ (% Molar)	O ₂ (% Molar)	Total (% Molar)
Modelo base	100% - 0%	30	15.450	84.173	7E-05	99.623
Modelo 1	85% - 15%	32.25	15.419	84.204	4E-05	99.623
Modelo 2	70% - 30%	34.55	15.397	84.226	3E-05	99.623
Modelo 3	55% - 45%	36.72	15.380	84.243	1E-05	99.623

En la Figura 40 se logra apreciar la relación que existe entre la cantidad de arcilla en los modelos de simulación desarrollados y el comportamiento de los gases de

combustión, como lo son, el dióxido de carbono y el nitrógeno, donde se observa que la presencia de arcillas disminuye la producción de CO_2 y aumenta la producción de N_2 .

Figura 40. Comportamiento de la producción de CO_2 y N_2 en función del porcentaje de arcilla



5.1.4 Parámetros de Combustión

Estas características permiten describir el comportamiento del proceso, mediante el análisis de los resultados obtenidos utilizando la herramienta Results Graph. De manera consecuente se procede a analizar el comportamiento del proceso de combustión in situ simulado para cada uno de los modelos desarrollados.

Tabla 21. Parámetros de combustión

Parámetros	
Relación aire/combustible	Relación H/C
Relación oxígeno/combustible	Relación CO+CO ₂ /N ₂
Combustible requerido	Oxígeno usado
Requerimiento de aire	AOR

5.1.4.1 Relación H/C

Se emplea para indicar como es el funcionamiento de un proceso de combustión in situ. En la Tabla 22 se puede apreciar que los valores para cada modelo se encuentran debajo de 2 lo que quiere decir que predominan las reacciones de alta temperatura.

A continuación se muestra como se realiza el cálculo de la relación hidrógeno/carbono para el modelo base.

$$H/C = \frac{4 \left(\frac{[N_2]}{R} - [CO_2] - \frac{[CO]}{2} - [O_2] \right)}{([CO_2] + [CO])} \quad (23)$$

$$H/C = \frac{4 \left(\frac{[84.1729588]}{3.761904762} - [15.4503170] - \frac{[0]}{2} - [0.0000685321] \right)}{([15.4503170] + [0])} \quad (24)$$

$$H/C = 1.792 \quad (25)$$

Tabla 22. Relación Hidrogeno/Carbono para cada modelo de simulación realizado

Relación Aparente H/C	
Modelo base	1.792
Modelo 1	1.806
Modelo 2	1.816
Modelo 3	1.824

En la Tabla 22 se puede observar que la relación H/C es mayor a medida que aumenta la concentración de arcilla en los modelos, esto indica que el combustible tiene menor cantidad de carbonos y es probable que el rompimiento de los enlaces sea menor.

5.1.4.2 Relación oxígeno/combustible

Se refiere a la mínima cantidad de volumen de oxígeno necesaria para quemar el combustible. Esta relación es de utilidad para determinar cómo es el modo de operación de un proceso de combustión in situ. El rompimiento de los enlaces es mayor si existe una relación H/C menor, esto indica que el combustible tiene mayor cantidad de carbón y que hay una mejor eficiencia del proceso.

Se rige por las condiciones:

$$\frac{\text{Oxígeno}}{\text{Combustible}} = \frac{(a) * (\text{moles } O_2)}{\text{moles de combustible}} \quad (13)$$

Asumiendo el oxígeno en volumen estándar, el combustible en libras por unidad de volumen, el volumen ocupado por una mol de gas a condiciones de referencia como 779 Ft³ estándar, una presión de 14.7 psi y una temperatura de 60 °F⁴².

⁴²BYL, M.L., MOORE, G. URSENBACH, M. G. "Field observation of *in situ* combustion in water flooded reservoir in Kinsella Field". University of Calgary. JCPT 93-01-03. 1993. p6-7.

A continuación se muestra los resultados de los cálculos para cada uno de los modelos mostrando como ejemplo el procedimiento realizado para el modelo base.

$$\frac{O_2}{F} = \frac{379 * \frac{N_2}{R}}{12.011([CO_2] + [CO]) + 4.032 * \left[\frac{N_2}{R} - [CO_2] - [O_2] \right]} \quad SCF/lbm \quad (14)$$

$$\frac{O_2}{F} = \frac{379 * \frac{84.1729588}{3.761904762}}{12.011([15.4503170] + [0]) + 4.032 * \left[\frac{84.1729588}{3.761904762} - [15.4503170] - [0.0000685321] \right]} \quad (15)$$

$$\frac{O_2}{F} = 39.720 \quad \left(\frac{SCF}{lbm} \right) \quad (16)$$

En la Tabla 23 se muestran los resultados para cada uno de los modelos.

Tabla 23. Relación O₂/Combustible para cada modelo de simulación realizado

Relación Oxígeno/Combustible (SCF/lbm)	
Modelo base	39.720
Modelo 1	39.774
Modelo 2	39.813
Modelo 3	39.844

5.1.4.3 Relación aire/combustible

Este es el parámetro económico más importante en el proceso de combustión *in situ* y hace referencia al volumen de aire que requiere ser inyectado para quemar una unidad de masa de combustible, está en función de la cantidad de carbonos e hidrógenos en el combustible y la relación nitrógeno-oxígeno en el aire⁴³.

⁴³OLIVEROS, Luis Roberto. Diseño y Evaluación de Procesos de combustión *In Situ*. GRM.

Se rige por la ecuación

$$AFR = \frac{Aire}{Combustible} \quad (17)$$

Si la relación aire combustible tiene valores bajos indica que el proceso de combustión es exitoso ya que hay más producción de óxidos de carbono con menor inyección de aire.

El siguiente procedimiento muestra la manera de realizar los cálculos y en la Tabla 24 se muestran los resultados para cada caso, mostrando que los valores son bajos.

$$AFR = [1 + R] * \left[\frac{O_2}{Combustible} \right] \quad (18)$$

$$AFR = [1 + 3.761904762] * [39.72080055] \quad (19)$$

$$AFR = 189.146 \left(\frac{SCF}{lbm} \right) \quad (20)$$

Tabla 24. Relación Aire/Combustible para cada modelo de simulación realizado

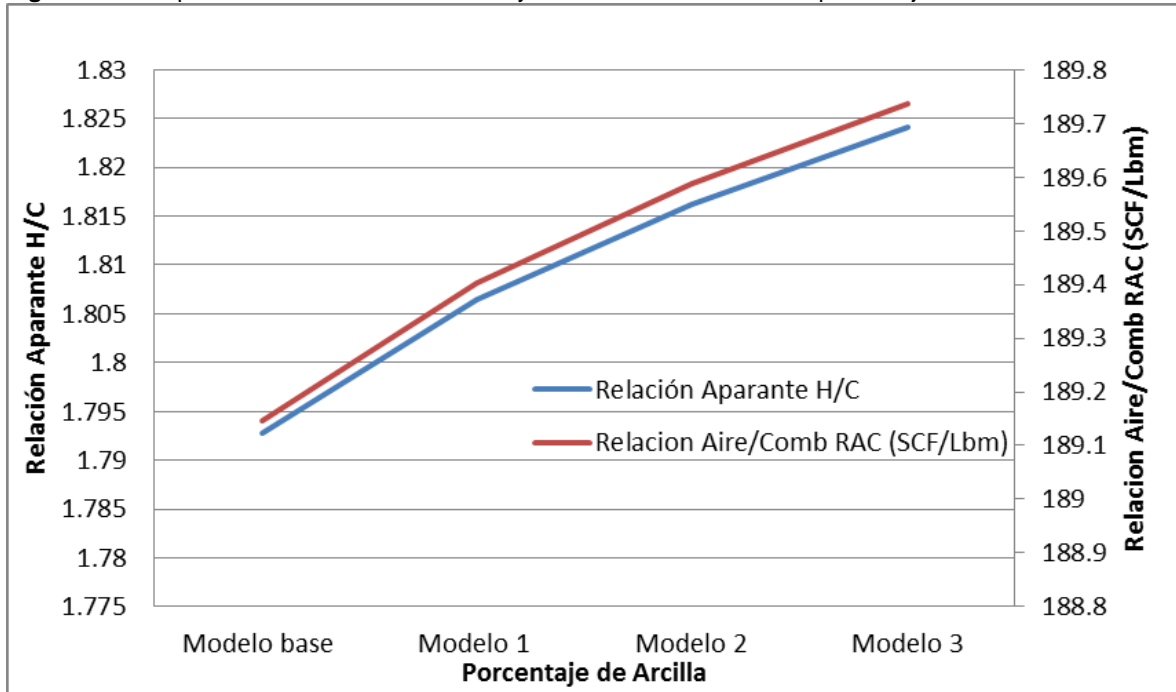
Relación Aire/Combustible RAC (SCF/lbm)	
Modelo base	189.146
Modelo 1	189.403
Modelo 2	189.586
Modelo 3	189.735

Se puede concluir que en los modelos de simulación la presencia de arcilla tiene influencia en la relación Aire/Combustible, viéndose esto reflejado en el aumento que tiene este parámetro en cada modelo.

Se encuentra que es posible establecer una relación (Figura 41) entre los parámetros de combustión como lo son, la relación aparente de H/C y la relación

Aire/Combustible, entre el contenido de arcilla de la muestra, encontrando que a medida que el contenido de arcilla aumenta, estos parámetros también incrementan su valor con respecto al modelo base.

Figura 41. Comportamiento de la Relación H/C y Aire/Comb. en función del porcentaje de arcilla



5.1.4.4 Requerimiento de aire

En este caso se hace referencia al aire que se requiere por unidad de volumen en el yacimiento.

$$RA = \frac{U_{aire}}{V_b} \left(\frac{Pcs/pc}{Ft/h} \right) \quad (21)$$

El aire requerido tiene como objetivo controlar el área que es barrida por un volumen dado, lo que tiene una gran implicación en la economía del proceso.

Con la visualización del frente de combustión a una temperatura determinada (Figura 36) en función de la distancia se logra calcular la velocidad del frente para cada uno de los modelos de simulación numérica. Se debe tener en cuenta que el flujo de aire a la muestra de yacimiento permaneció constante para los diferentes modelos desarrollados. En la Tabla 25 se logran apreciar los resultados obtenidos para el requerimiento de aire en los diferentes modelos simulados, de los resultados se puede concluir que la presencia de arcillas en la matriz de la roca aumenta los requerimientos de aire, esto se puede relacionar también a que el coque depositado también es mayor por ende se necesita más aire para quemar este coque.

Tabla 25. Aire requerido para la realización del proceso

	U_{aire} (SCF/Ft ² -hora)	V_b (Ft/hora)	Requerimiento de Aire RA (SCF/Ft ³ de roca)
Modelo base	139.88	0.589	237.387
Modelo 1	139.88	0.565	247.386
Modelo 2	139.88	0.542	257.936
Modelo 3	139.88	0.5335	262.027

5.1.4.5 Combustible requerido

El combustible requerido es la masa consumida de hidrocarburo durante el proceso de la combustión.

$$FR (\text{Fuel Requirement}) = \frac{AR}{RAC} \quad (22)$$

Este parámetro indica cual es la eficiencia del proceso basado en la medición de óxidos de carbono. Si el número de óxidos es mayor indica que se tiene una alta eficiencia del proceso debido al rompimiento de los enlaces en las reacciones.

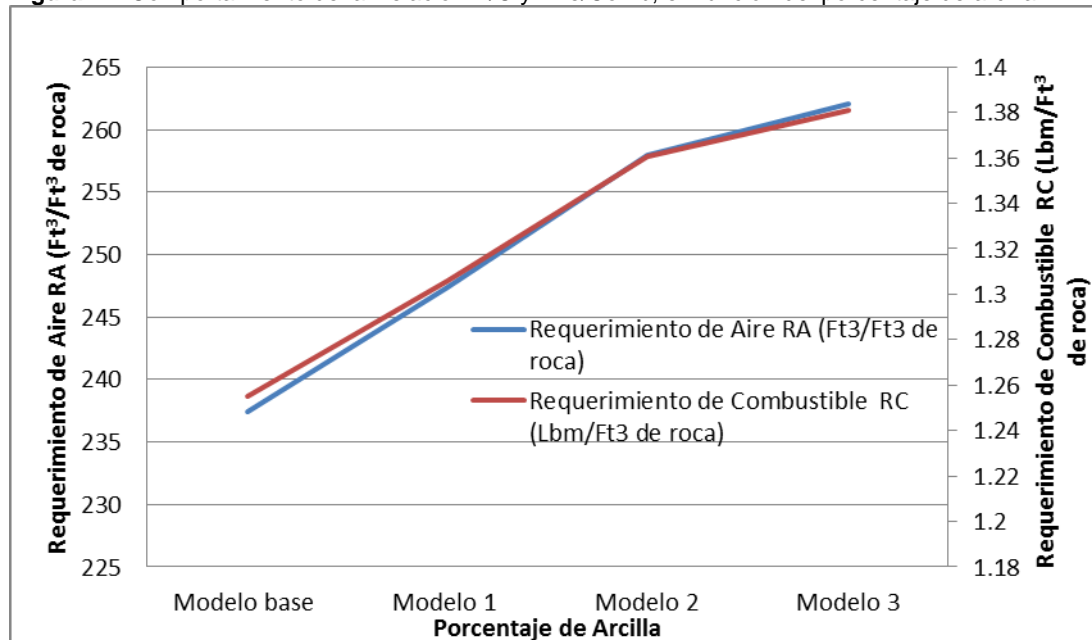
La Tabla 26 muestra los valores que se utilizaron y los resultados q se obtuvieron en el cálculo de requerimiento de aire.

Tabla 26. Relación Aire/Combustible para cada modelo de simulación realizado

	Requerimiento de Aire RA (SCF/Ft ³ de roca)	Relación Aire/Comb RAC (SCF/Lbm)	Requerimiento de Combustible RC (Lbm/Ft ³ de roca)
Modelo base	237.387	189.146	1.255
Modelo 1	247.386	189.403	1.306
Modelo 2	257.936	189.586	1.360
Modelo 3	262.027	189.735	1.381

De igual manera que la relación aparente de H/C y la relación Aire/Combustible, el requerimiento tanto de aire como combustible, también se observó un aumento de su valor en función del contenido de arcilla en los modelos, este comportamiento se puede observar de mejor manera en la Figura 42.

Figura 42. Comportamiento de la Relación H/C y Aire/Comb, en función del porcentaje de arcilla



5.1.4.6 Relación CO+CO₂/N₂

Los cálculos para el modelo base corresponden a los siguientes y los resultados para cada modelo planteado se encuentran plasmados en la Tabla 27.

$$\frac{CO_2 + CO}{N_2} = \frac{15.4503170 + 0}{84.1729588} = 0.183554 \quad (26)$$

Tabla 27. Relación (CO+CO₂/N₂) para cada modelo de simulación realizado

(CO+CO₂)/N₂	
Modelo base	0.183
Modelo 1	0.183
Modelo 2	0.182
Modelo 3	0.182

Se observa en la tabla anterior que la presencia de arcillas en los modelos se ve influenciado en la disminución del valor de la relación (CO+CO₂/N₂), lo cual está relacionado directamente con la disminución de la producción de CO₂ para cada modelo respectivamente.

5.1.4.7 Oxígeno reaccionado convertido a óxidos de carbono (FO₂R%)

Se considera un proceso eficiente con reacciones de alta temperatura, si el rango del oxígeno reaccionado se encuentra entre 60 y 70% en la Tabla 28 se puede observar que todos los resultados están dentro de ese rango indicando que el régimen de reacciones es de alta temperatura (HTO) y que el valor más alto de la fracción de oxígeno corresponde al modelo base que se encuentra constituido por arena limpia.

Tabla 28. Fracción de O₂ para cada modelo de simulación realizado

Fracción de O ₂ -> COx f _{O₂R} (%)	
Modelo base	69.051
Modelo 1	68.889
Modelo 2	68.773
Modelo 3	68.680

Otro aspecto importante para destacar es que posiblemente reaccionó todo el oxígeno, sea para formar óxidos o bien para formar agua.

En este caso se realizó el siguiente procedimiento.

$$f_{O_2R} = \frac{[CO_2] \frac{[CO]}{2}}{\frac{[N_2]}{R} [O_2]} \quad (27)$$

$$f_{O_2R} = \frac{[15.4503170] \frac{[0]}{2}}{\frac{[84.1729588]}{3.761904762} [0.000068532]} \quad (28)$$

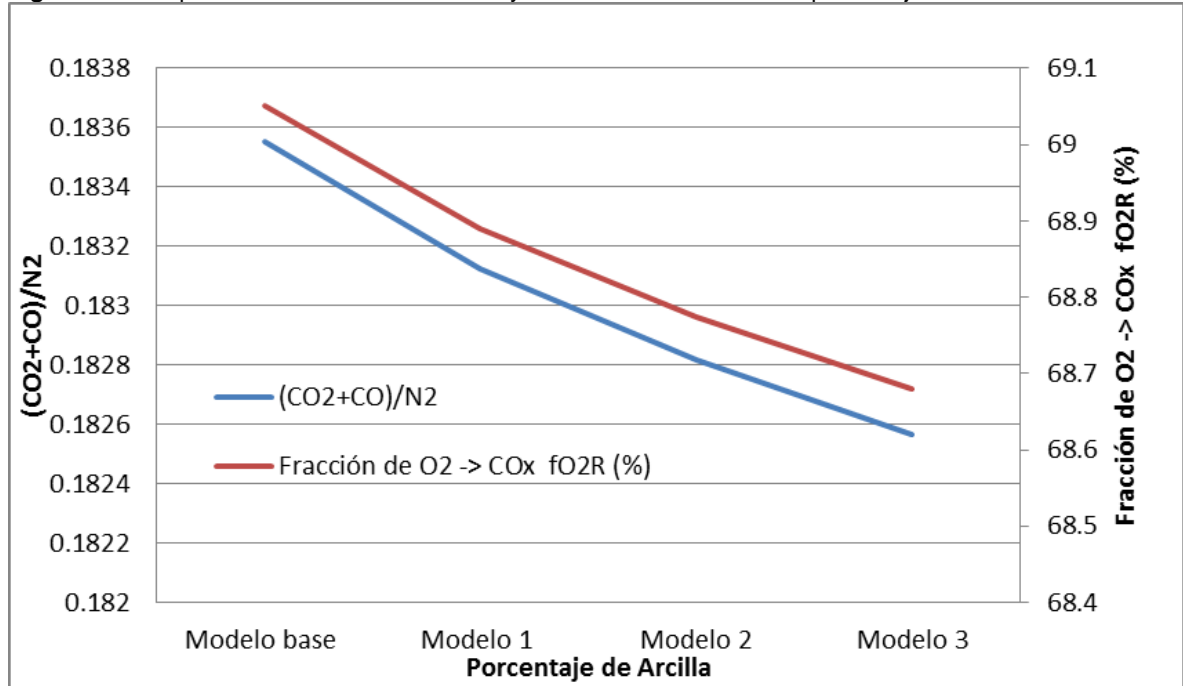
$$f_{O_2R} = 69.051 \quad (29)$$

De los resultados se puede concluir que la presencia de arcillas en diferentes proporciones tiene influencia en el porcentaje del oxígeno que reacciona para formar óxidos de carbono, dando a entender que a mayor arcilla presente en los modelos hay una disminución en la cantidad de oxígeno que reacciona para formar los óxidos de carbono.

La relación (CO+CO₂/N₂) y el porcentaje de oxígeno que reacciona para formar óxidos de carbono, son parámetros que dependen directamente de la producción de dióxido de carbono, por esta razón es de esperarse que a medida que el contenido de arcilla en el medio poroso aumente, estos parámetros muestren una

disminución de sus valores comparados con el modelo base, esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 43.

Figura 43. Comportamiento de la relación H/C y Aire/Comb. en función del porcentaje de arcilla

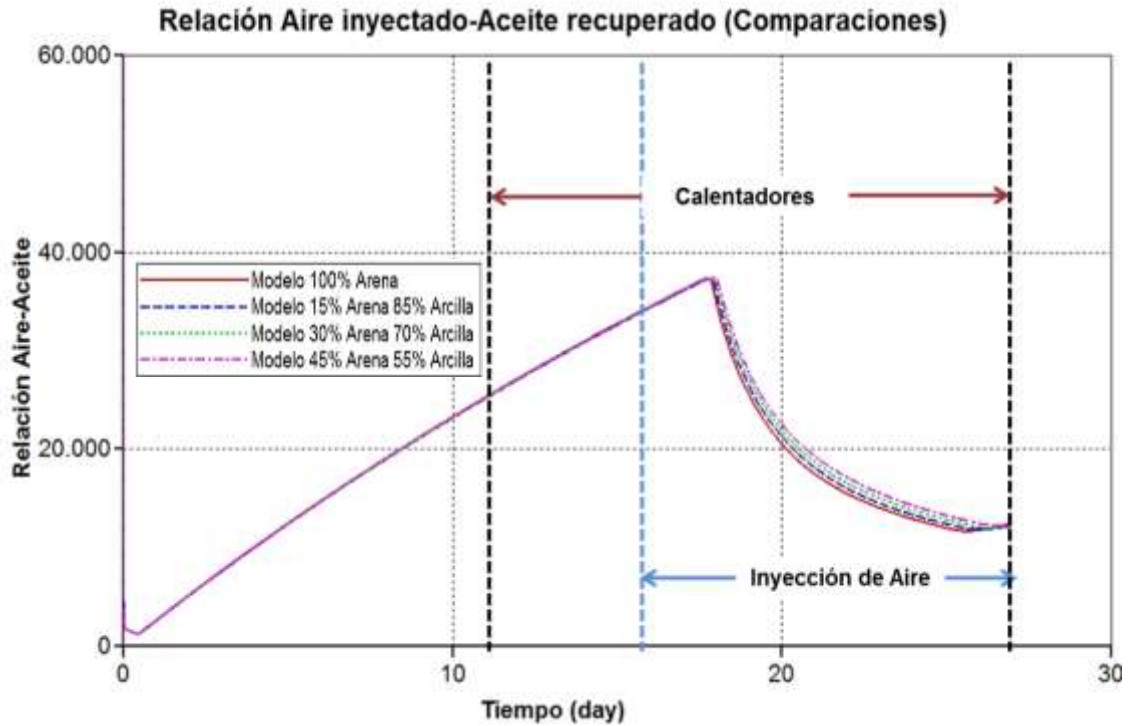


5.1.4.8 Relación aire/aceite (AOR)

Este parámetro es uno de los más importantes en la implementación del proceso de combustión in situ en cuanto a la viabilidad técnica y económica del proyecto. Esta relación permite conocer cuánto aire es necesario inyectar para recuperar un barril de petróleo.

Cabe resaltar que valores altos de AOR indican que existe una gran cantidad de aceite que se debe desplazar y que para ello es necesario quemar una mayor cantidad de combustible, dando como resultado que el aire requerido sea mayor y esto no beneficia el proceso.

Figura 44. Comparación de la relación aire/aceite para cada uno de los modelos desarrollados



Fuente: Computer Modeling Group, CMG, Steam Thermal and Advance Processes Reservoir Simulator-STARS, Results graph.

La Tabla 29 muestra un resumen en donde se muestra cuales han sido los resultados obtenidos en los parámetros que son objeto de estudio en este trabajo, también se puede observar cual ha sido la tendencia del comportamiento de los resultados en función del contenido de arcillas. Para fines prácticos de analizar ciertos parámetros como el coque y las temperaturas se escogió un tiempo en específico en donde se compararon, debido a que los resultados en estos parámetros se presentan de forma oscilatoria.

Tabla 29. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros objeto de estudio

	Modelo base %Arena - %Arcilla 100% - 0%	Modelo 1 %Arena - %Arcilla 85% - 15%	Modelo 2 %Arena - %Arcilla 70% - 30%	Modelo 3 %Arena - %Arcilla 55% - 45%	Tendencia Desempeño
Tiempo de la CIS (hrs)	9.228	9.616	10.016	10.178	↑Creciente
Temperatura promedio (°F)*	671.463	656.125	641.515	622.944	↓Decreciente
Temperatura máxima (°F)*	1249.000	1226.350	1181.241	1118.887	↓Decreciente
Velocidad del frente (Ft/hr)	0.589	0.565	0.542	0.533	↓Decreciente
Coque depositado (lbmol/Ft³)*	0.028	0.0394	0.045	0.055	↑Creciente
Porcentaje molar CO₂	15.450	15.419	15.397	15.380	↓Decreciente
Porcentaje molar N₂	84.173	84.204	84.226	84.243	↑Creciente
Porcentaje molar O₂	7.00E-05	4.00E-05	3.00E-05	1.00E-05	↓Decreciente
Relación Aparente H/C	1.792	1.806	1.816	1.824	↑Creciente
Relación Aire/Comb. (SCF/lbm)	189.146	189.403	189.586	189.735	↑Creciente
Requerimiento de Aire (Ft³/Ft³ de roca)	237.387	247.386	257.936	262.027	↑Creciente
Requerimiento de Comb. (Lbm/Ft³ de roca)	1.255	1.3061	1.360	1.381	↑Creciente
Relación CO+CO₂/N₂	0.183	0.183	0.182	0.182	↓Decreciente
Fracción de O₂ -> COx f_{O_{2R}} (%)	69.051	68.889	68.773	68.680	↓Decreciente
Relación Aire/Aceite (Ft³/Bbl)*	12879.541	13312.214	13777.699	14244.158	↑Creciente

*Valor tomado al tiempo de simulación de 24 horas en la prueba de CIS.

CONCLUSIONES

- El comportamiento que se tuvo en la temperatura durante todo el proceso está asociado directamente al contenido de arcilla presente en el medio poroso, ya que los valores registrados tendieron a ser levemente menores en los modelos con más cantidad de arcilla.
- La disminución de la velocidad del frente de combustión se encuentra en función del contenido de arcilla presente en el medio poroso, debido a que se observó que al aumentar el contenido de arcillas presentes en los modelos la velocidad del frente disminuye, esto indica que las arcillas disminuyen la frecuencia con la que ocurren las reacciones de consumo de coque (HTO).
- Debido al aumento proporcional del coque depositado que se registró a medida que se variaba la cantidad de arcilla presente en el medio poroso del modelo de simulación, es necesario un incremento de la tasa de inyección de aire para poder obtener comportamientos similares al modelo base.
- El aumento del contenido de arcilla en el medio poroso generó una disminución en la producción de CO_2 , un incremento en la producción de N_2 y una disminución en el porcentaje de oxígeno que reacciona para formar óxidos de carbono.
- La relación aparente entre los átomos de hidrogeno y de carbono registrada para los modelos, tuvieron un aumento en su valor a medida que el contenido de arcilla presente en el medio poroso aumentaba, lo cual sugiere que la presencia de arcilla ayudo a la disminución de los carbonos producidos en el proceso de combustión in situ modelado.

- A medida que el contenido de arcilla en los modelos de simulación aumentaba, el requerimiento de combustible también registró un incremento, debido a que existe una relación lineal directa entre el comportamiento del requerimiento de combustible y el contenido de arcillas presente en los medios porosos de los modelos.

RECOMENDACIONES

Es importante realizar el estudio del proceso de combustión *in situ* a nivel de laboratorio con el desarrollo de la prueba de tubo, tomando como base el mismo fluido, para realizar una variación al sistema roca fluidos y el porcentaje de arcillas presentes y así validar los resultados obtenidos mediante la simulación numérica.

Realizar un estudio más detallado en el cual se mejore el modelamiento de las características litológicas de las rocas en la simulación numérica.

Desarrollar un análisis de sensibilidad a la tasa de inyección de aire dependiendo del contenido de arcilla presente en la formación y de la heterogeneidad del medio poroso, con el objetivo de encontrar y poder estimar una tendencia del comportamiento de la tasa de inyección en función de la cantidad de arcillas.

BIBLIOGRAFIA

BLANCO DIAZGRANADO, Víctor Manuel. “Estimación de la capacidad calorífica y conductividad térmica de las rocas a partir de propiedades petrofísicas (porosidad y saturación de fluidos) utilizando registros de pozos”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2007.

BRIGHAM, William, E and CASTANIER, Louis. In situ Combustion. Chapter 16. p8.

BRINDLEY, G.M. AND BROWN, G. (EDS). Cristal structures of clay minerals and their X-ray identifications. Mineralogical Society. London, 1980. p495.

BURGER, J., SOURIEAU, P. “Thermal Methods of Oil Recovery”. Institut Français du Pétrole Publications, 1985. p240–280.

BYL, M.L., MOORE, G. URSENBACH, M. G. “Field observation of in situ combustion in water flooded reservoir in Kinsella Field”. University of Calgary. JCPT 93-01-03. 1993. p6-7.

COMPUTER MODELING GROUP – CMG. “Simulador térmico avanzado de procesos y yacimientos”. Versión 2012.

CHICUTA, A.M., “Experimental Study on In-Situ Combustion of Brazilian Heavy Oil”. SPE 122036, 2009.

E. ADAMS, W.S. MACKENZIE, C.GUILFORD, “Atlas de rocas sedimentarias.” University of Manchester. Masson. 1996. p104.

FULFORD, Richard S., "Produced Fluid Changes During a Fireflood". SPE 9005. May. 1980. p280.

GARCIA R., Emilia. SUAREZ B, Mercedes. "Las arcillas: propiedades y usos". Universidad de Complutense. Madrid. p26.

GONZALO G.L "Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: Inyección Cíclica y Continua de Vapor". Capítulo 3. Noviembre de 1989.

GUTIERREZ D. "Air Injection Laboratory Studies". Reservoir Simulation of In Situ Combustion Processes. ICP Bucaramanga Colombia. September 2009.

KAUZMANN, WALTER; "Propiedades térmicas de la materia". Barcelona. Reverte. 1971.

MAMORA, DAULAT DEBATARAJA, Ph.D. "Kinetic Of In Situ Combustion", Stanford University: 1993. p21.

MARTIN, W.L, ALEXANDER; J.D & DEW, JN. Process variables of in situ combustion. Transaction AIME, 213.1958. p 218-235.

MEUNIER, A. "Clays".Springer. Francia. 2005. University of Poitiers. p476.

OLIVEROS GOMEZ, Luis Roberto. "Determinación de Parámetros de Diseño y Evaluación Técnica del Procesos de Combustión In Situ a Partir de Pruebas de Tubo de Combustión". Bucaramanga. 2011. Universidad Industrial de Santander – GRM. p180.

OUARDA D., SHAPOUR V. "Catalytic Effect of Heavy Metal Oxides on Crude Oil Combustion". University of Kansas. SPE 14484. 1984. Volumen 2, Número 4. p5.

REYES N., Yorleth. MEDEZ B., Gilberto A. "Metodología Integrada para el Monitoreo y Seguimiento de Yacimiento Sometidos a Procesos de Combustión In Situ". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2009. p206.

ROBERT R. SHROCK. "Clay Mineralogy". McGraw.Hill. Series in Geology. p384.

SARATHI S. P. "In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices". BDM Petroleum Technologies. National Petroleum Technology Office. Oklahoma: 1999, p1-3.

SEPULVEDA J. HUMBERTO F. "Simulación de yacimientos: Principios, conceptos y construcción de mallas". p8-55.

SHAPOUR V., G. PAUL W., WILLIAM P. K., IBRAHIM M. G., YOUSSEF EI S., "Automation of an In-Situ Combustion Tube and Study of the Effect of Clay on the In-Situ Combustion Process" SPE office July. 1981.

UNSERBACH M.G. An Overview of laboratory In situ Combustion "Behavior of Athabasca Oil Sands". The University of Calgary. 1998.

VELDE, B. "Introduction to Clay Minerals, Chemistry, origins, uses and enviromental significance". Chapman & Hall. 1992. p198.

YATTE GARZÓN, Fabian Camilo. "Estudio analítico para determinar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión mediante la simulación numérica de una prueba de tubo". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. p205.