

**DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA LA SELECCIÓN DE TECNICAS DE
RECOBRO MEJORADO USANDO LOGICA DIFUSA**

JOSE SEBASTIAN ESPINOSA ORTEGA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2011**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA LA SELECCIÓN DE TECNICAS DE
RECOBRO MEJORADO USANDO LOGICA DIFUSA**

JOSE SEBASTIAN ESPINOSA ORTEGA

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO DE PETROLEOS**

**Director
ZULY HIMELDA CALDERON CARILLO, PhD
Ingeniera de petróleos**

**CoDirector
RODOLFO SOTO BECERRA, PhD
Ingeniero de petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2011**

DEDICATORIA

A Jehová por darme la vida y la oportunidad de alcanzar mis metas.

A mis padres y hermanos por su eterna compañía y apoyo.

A paito por ser la razón de muchas cosas en mi vida.

A mis compañeros por hacer de la universidad una experiencia para recordar.

JOSE SEBASTIAN ESPINOSA ORTEGA

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Rodolfo Soto por haber creído en mí, por su constante interés en el proyecto y por todo el conocimiento aprendido.

A la Doctora Zuly Calderón por su amabilidad y guía.

A los ingenieros David Soto y Orlando Pérez por sus consejos y aportes al proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	16
1. METODOS DE RECOBRO MEJORADO.....	17
1.1. RECOBRO PRIMARIO.....	17
1.2. RECOBRO SECUNDARIO.....	19
1.3. RECOBRO TERCARIO.....	19
1.3.1. Inyección de gas.....	20
1.3.1.1. Inyección miscible de CO ₂	20
1.3.1.2. Inyección miscible de nitrógeno.....	21
1.3.1.3. Inyección miscible de gas (hidrocarburo).....	22
1.3.1.4. WAG.....	23
1.3.2. Métodos Químicos.....	25
1.3.2.1. Inyección de Polímeros.....	25
1.3.2.2. Inyección de sustancias alcalinas.....	25
1.3.2.3. Inyección de soluciones polímero – micelar.....	26
1.3.3. Métodos Térmicos.....	27
1.3.3.1. Inyección de vapor.....	28
1.3.3.2. Inyección de agua caliente.....	29
1.3.3.3. Combustión in situ.....	30
1.3.4. Recobro Microbial.....	32
2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE METODOS DE RECOBRO MEJORADO.....	34
2.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN USADOS POR EXXONMOBIL.....	34
2.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN USADOS EN EL FUZZY LOGIC EOR SCREENING EXPERT.....	36
2.2.1. Criterios de selección para métodos de inyección de gas.....	37
2.2.2. Criterios de selección para métodos químicos.....	39
2.2.3. Criterios de selección para métodos térmicos.....	40
2.2.4. Criterios de selección para MEOR.....	41

3.	FUNDAMENTOS DE SISTEMA EXPERTO Y LOGICA DIFUSA.....	43
3.1.	SISTEMA EXPERTO	43
3.1.1.	¿Qué es un sistema experto?.....	43
3.1.2.	¿Por qué un sistema experto?.....	45
3.1.3.	Componentes de un sistema experto.....	46
3.1.4.	Desarrollo de un sistema experto.....	51
3.2.	CONJUNTOS DIFUSOS.....	53
3.2.1.	Revisión de conjuntos.....	54
3.2.2.	Extensión a conjuntos difusos.....	58
3.2.2.1.	Funciones de pertenencia.....	60
3.2.2.2.	Operaciones con conjuntos difusos.....	61
3.2.2.3.	Propiedades de los conjuntos difusos.....	63
3.3.	LOGICA DIFUSA.....	64
3.3.1.	Sistemas de lógica difusa.....	65
3.3.2.	Elementos de un sistema de lógica difusa.....	67
4.	DESARROLLO DEL FUZZY LOGIC EOR SCREENING EXPERT.....	68
4.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	68
4.2.	RECOPIACION DEL CONOCIMIENTO.....	69
4.3.	DISEÑO DEL SISTEMA EXPERTO.....	69
4.3.1.	Construcción de la base de conocimiento.....	69
4.3.2.	Módulo de selección y ranking.....	73
4.4.	ELECCION DE LA HERRAMIENTA DE DESARROLLO.....	78
4.5.	PRUEBA DE PROTOTIPO Y DESARROLLO PRELIMINAR.....	78
4.6.	MANTENIMIENTO Y PUESTA AL DIA.....	80
5.	VALIDACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	81
5.1.	CAMPO JAY.....	83
5.2.	CAMPO JUDY CREEK.....	85
5.3.	CAMPO COLD LAKE.....	88

5.4.	CAMPO MARMUL.....	89
5.5.	YACIMIENTO DE CARBONATO.....	92
CONCLUSIONES.....		96
RECOMENDACIONES.....		97
BIBLIOGRAFIA.....		98
ANEXOS		99

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Criterios de selección para métodos de inyección de gas usados por ExxonMobil.....	35
Tabla 2. Criterios de selección para métodos térmicos usados por ExxonMobil.....	35
Tabla 3. Criterios de selección para métodos químicos usados por ExxonMobil	36
Tabla 4. Criterios de selección para métodos de inyección de gas.....	38
Tabla 5. Criterios de selección para métodos químicos.....	39
Tabla 6. Criterios de selección para métodos térmicos.....	41
Tabla 7. Criterios de selección para MEOR.....	42
Tabla 8. Tipos de funciones de pertenencia usadas en el Fuzzy Logic EOR Screening Expert.....	71
Tabla 9. Propiedades para un campo X dado como ejemplo.....	74
Tabla 10. Puntajes parciales.....	76
Tabla 11. Puntajes totales y finales.....	77
Tabla 12. Propiedades del campo Jay.....	83
Tabla 13. Propiedades del campo Judy Creek.....	86
Tabla 14. Propiedades del campo Cold Lake.....	88
Tabla 15. Propiedades del campo Marmul.....	91
Tabla 16. Propiedades del yacimiento de carbonato.....	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Inyección miscible de gas.....	23
Figura 2. WAG.....	24
Figura 3. Recobro químico.....	27
Figura 4. Inyección de vapor.....	29
Figura 5. Inyección de agua caliente.....	30
Figura 6. Combustion in situ.....	32
Figura 7. MEOR.....	33
Figura 8. Campos de aplicación de los sistemas expertos.....	45
Figura 9. Componentes típicos de un sistema experto.....	48
Figura 10. Etapas del desarrollo de un sistema experto.....	53
Figura 11. Funciones de pertenencia típicas.....	61
Figura 12. Operaciones básicas entre conjuntos.....	62
Figura 13. Diagrama de flujo para la construcción de funciones de pertenencia usadas en el Fuzzy Logic EOR Screening Expert.....	72
Figura 14. Forma gráfica de hallar puntajes para gravedad API.....	74
Figura 15. Resultados finales.....	77
Figura 16. Prototipo en Excel del sistema experto.....	79
Figura 17. Versión final del Fuzzy Logic EOR Screening Expert.....	80
Figura 18. Ejemplo de la metodología de screening usada por L. Dickson y A. Leahy-Dios.....	82
Figura 19, Resultados del caso comparativo para el campo Jay.....	84
Figura 20. Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Jay.....	85
Figura 21, Resultados del caso comparativo para el campo Judy Creek.....	86
Figura 22. Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Judy Creek.....	87
Figura 23, Resultados del caso comparativo para el campo Cold Lake.....	89
Figura 24. Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Cold Lake.....	90
Figura 25, Resultados del caso comparativo para el campo Marmul.....	91

Figura 26. Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Marmul..... 92

Figura 27. Resultados del caso comparativo para el yacimiento de carbonato.....94

Figura 28. Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el yacimiento de carbonato..... 95

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – BASE DE CONOCIMIENTO DEL FUZZY LOGIC EOR SCREENING EXPERT	99
ANEXO B – MANUAL DEL USUARIO.....	149

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE RECOBRO MEJORADO USANDO LÓGICA DIFUSA.¹

AUTOR: JOSE SEBASTIAN ESPINOSA ORTEGA.**

PALABRAS CLAVE: Ingeniería de yacimientos, recobro mejorado, lógica difusa, sistema experto, inteligencia artificial.

DESCRIPCION:

Luego de las etapas primaria y secundaria de la explotación de un campo o yacimiento, únicamente ha sido extraído entre el 5 y 40% del petróleo inicialmente atrapado en la roca; la implementación de surfactantes, soluciones alcalinas, polímeros, calor y gases entre otros, ha demostrado que se puede llegar a alcanzar una recuperación hasta del 85%. El éxito de dichos métodos de recobro está, en parte, determinado por la correcta selección del proceso a emplear.

La selección del método de recobro adecuado para emplear en un yacimiento o campo se efectúa a partir de información técnica y económica. En esta investigación se plantea una metodología novedosa para llevar a cabo un análisis que determine que método es más adecuado basándose en datos técnicos del yacimiento y del fluido. Con base en esta metodología, se desarrolló un sistema experto llamado Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Dicha herramienta incorpora 105 funciones de pertenencia construidas teniendo en cuenta criterios de selección actualizados y la metodología propuesta.

Durante la validación del sistema experto, se comprobó que el Fuzzy Logic EOR Screening Expert es una herramienta útil y sus resultados confiables, dando así soporte y seguridad al ingeniero en la selección de métodos de recobro mejorado.

¹ Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director de Proyecto: PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo, Codirector: PhD. Rodolfo Soto Becerra.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM FOR ENHANCED OIL RECOVERY METHODS SELECTION USING FUZZY LOGIC.*

AUTHOR: JOSE SEBASTIAN ESPINOSA ORTEGA.**

KEY WORDS: Reservoir engineering, enhanced oil recovery, fuzzy logic, expert system, artificial intelligence.

DESCRIPTION:

After primary and secondary stages of the operation of an oil field or reservoir, only between 5 and 40% of the oil initially trapped in the rock has been extracted; the application of surfactants, alkaline solutions, polymers, heat and gases has shown that oil recovery can reach up to 85%. The success of these recovery methods is, partially, determined by the proper selection of the process to be used.

The selection of the recovery method suitable for a field or reservoir is made from technical and economic information. This research raises a novel methodology to conduct an analysis to determine which method is most appropriate based on fluid and reservoir data. Based on this methodology, an expert system called Fuzzy Logic EOR Screening Expert was developed. This tool has built 105 membership functions taking account updated selection criteria.

During the validation of the expert system, it was found that the Fuzzy Logic EOR Screening Expert is a useful tool and its results are reliable, thus giving support and confidence for the engineer in the selection of enhanced oil recovery methods.

* Graduate Project

** Physics-chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Project Director: PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo, Codirector: PhD. Rodolfo Soto Becerra.

INTRODUCCION

El consumo de petróleo aumenta diariamente, y, a falta de grandes descubrimientos, es fundamental que las reservas actuales se exploten de la forma más eficiente posible. Esto puede ser logrado en gran manera por la implementación de una amplia gama de métodos de recobro mejorado con los que se puede llegar a extraer entre el 60 y 85% del aceite atrapado en la roca.

Con el fin de tomar una decisión acertada al momento de escoger el método de recobro más apropiado para un yacimiento en particular, es necesario llevar a cabo análisis técnicos y económicos, además de un screening de las técnicas disponibles. Este proyecto está destinado a analizar una metodología novedosa que integra conceptos de lógica difusa y sistemas expertos junto con los criterios más actualizados de selección de métodos de recobro mejorado. Esta metodología se plasma en una herramienta informática llamada Fuzzy Logic EOR Screening Expert que es capaz de seleccionar cual método es el más adecuado a implementar en un yacimiento o campo en particular a partir de propiedades de fluido y roca.

Es de esperar que este software sirva como soporte para decisiones de selección definitiva de métodos de recobro mejorado, el usuario puede estar seguro en la certeza de sus resultados y en que emplea una herramienta con la mejor y más avanzada tecnología de screening disponible en el mercado.

1. METODOS DE RECOBRO MEJORADO

Recobro mejorado de petróleo (EOR) es un término aplicado a diferentes métodos usados para recuperar el petróleo remanente en el yacimiento luego de aplicar recobro primario y secundario. A continuación se tratarán generalidades de las etapas de recuperación de aceite en un yacimiento y de diferentes métodos de recobro mejorado.

1.1 RECOBRO PRIMARIO

Durante esta etapa, el petróleo es drenado naturalmente hacia los pozos bajo el efecto del gradiente de presión que existe entre el fondo de pozo (BHP) y la presión del yacimiento.

En este periodo, es común que la presión de yacimiento sea mayor a la presión hidrostática, lo que causa que el petróleo llegue hasta superficie únicamente por la acción de dicho gradiente de presión. A medida que los fluidos presentes en el yacimiento son retirados progresivamente, la presión tiende a descender dependiendo de los mecanismos de empuje involucrados. En algunos casos,

puede estar presente un mecanismo de empuje que ayude a disminuir notablemente el descenso de presión en el yacimiento, como compactación del sedimento (subsistencia), intrusión de un acuífero activo o expansión de capa de gas.

Cuando la presión original del yacimiento no es suficiente para generar un gradiente que cause que el petróleo llegue a superficie, es necesario un aporte externo de energía para disminuir la BHP. Este aporte puede ser otorgado por un sistema de levantamiento artificial, como bombeo mecánico o levantamiento por inyección de gas (gas lift).

El recobro primario finaliza cuando la presión del yacimiento ha bajado o debido a la alta producción de otros fluidos (agua y gas). En esta etapa es posible recuperar entre 10 y 15 % del petróleo original en sitio (OOIP); esta cifra puede llegar a ser del orden de 5% para yacimientos sin gas disuelto o alcanzar valores cercanos a 20% y aún más en yacimientos que presentan baja permeabilidad, capa de gas y/o acuífero activo².

Anteriormente, se explotaba un yacimiento bajo un esquema de recuperación primaria hasta que la producción se tornaba poco rentable, en cuyo momento se pasaba implementar métodos de recuperación secundaria. Actualmente se inician operación de recuperación secundaria mucho antes de llegar a este punto, la selección del método de explotación de un yacimiento obedece a criterios de optimización.

² SALAGER, J. Recuperación Mejorada de Petróleo. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

1.2 RECOBRO SECUNDARIO

El recobro secundario consiste en inyectar en el yacimiento un fluido menos costoso que el petróleo, comúnmente gas natural o agua, para intentar mantener un gradiente de presión suficiente. Dichos fluidos se inyectan por ciertos pozos (inyectores), y desplazan parte del petróleo hacia otros pozos (productores).

El desplazamiento de petróleo usando agua permite elevar la recuperación del OOIP entre el 15 y 40 %³.

1.3 RECOBRO TERCARIO

Después de la etapa primaria y secundaria, el yacimiento contiene todavía entre el 60 y 85 % del OOIP. Esto se debe a que la eficiencia de los métodos de recuperación primaria y secundaria está limitada por un par de factores:

- A escala poral, la saturación de aceite es lo suficientemente baja (residual) para que el petróleo esté presente en “glóbulos” discontinuos, atrapados por las fuerzas capilares.
- A escala del yacimiento, existen ciertas zonas en las cuales el fluido inyectado en el recobro secundario no hace ningún efecto, esto se debe a que dicho fluido tiende a seguir caminos preferenciales causados por la baja permeabilidad de estas zonas.

³ SALAGER, J. Recuperación Mejorada de Petróleo. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

El propósito del recobro terciario o mejorado (EOR por sus siglas en inglés) es incrementar la producción de petróleo por medio de atacar estos dos factores. La mayoría de métodos EOR involucran inyección de gases, químicos o adición de energía (en forma de calor). Entre los métodos cuyo propósito es reducir las fuerzas capilares se encuentran solventes miscibles, soluciones de surfactantes o soluciones alcalinas. Con el fin de mejorar la eficiencia de barrido se reduce la viscosidad del crudo mediante calentamiento, aumento de la viscosidad del agua con polímeros hidrosolubles, o bloqueo de los caminos preferenciales usando espumas.

1.3.1 Inyección de gas^{4,5}. El gas inyectado actúa principalmente como una especie de solvente para reducir la viscosidad del aceite, hacerlo más móvil, y al mismo tiempo mantener la presión del yacimiento.

Dependiendo de las condiciones a las cuales se inyecta el gas, el proceso puede ser miscible o inmisible.

Para llevar a cabo una inyección miscible es necesario llevar el gas a condiciones tales que el aceite presente en el yacimiento y el gas que se inyecta sean mutuamente solubles.

1.3.1.1 Inyección miscible de CO₂. Cuando la presión del yacimiento ha sido agotada durante el recobro primario y secundario, ésta debe ser restablecida antes de empezar la inyección de CO₂. Para lograr esto, normalmente se bombea agua a través de pozos inyectoros hasta lograr la

⁴ Exploration Technologies – EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA.

⁵ FAYERS, Jhon. Enhanced Oil Recovery.

presión deseada, luego se inyecta el gas en el yacimiento por estos mismos pozos inyectoros.

Aunque el CO₂ no es miscible al primer contacto, cuando es forzado hacia el yacimiento se forma un frente miscible por medio de una transferencia gradual de moléculas de hidrocarburos livianos del petróleo hacia el CO₂. Este frente miscible es en esencia un banco de gas enriquecido que consiste de CO₂ e hidrocarburos livianos. Bajo condiciones óptimas de presión y temperatura, este frente será soluble en el aceite, haciendo que el petróleo se mueva fácilmente hacia los pozos productores.

La producción provendrá del banco de aceite que se forma adelante del frente miscible. A medida que los fluidos presentes en el yacimiento son producidos, el CO₂ vuelve a ser gaseoso, se separa del aceite y provee empuje por gas (gas lift) que ayuda a que el fluido llegue a superficie. Una vez producido, el CO₂ puede ser separado de los demás fluidos y es posible reinyectarlo, ayudando a reducir la cantidad de CO₂ “nuevo” que se requiere para el proyecto.

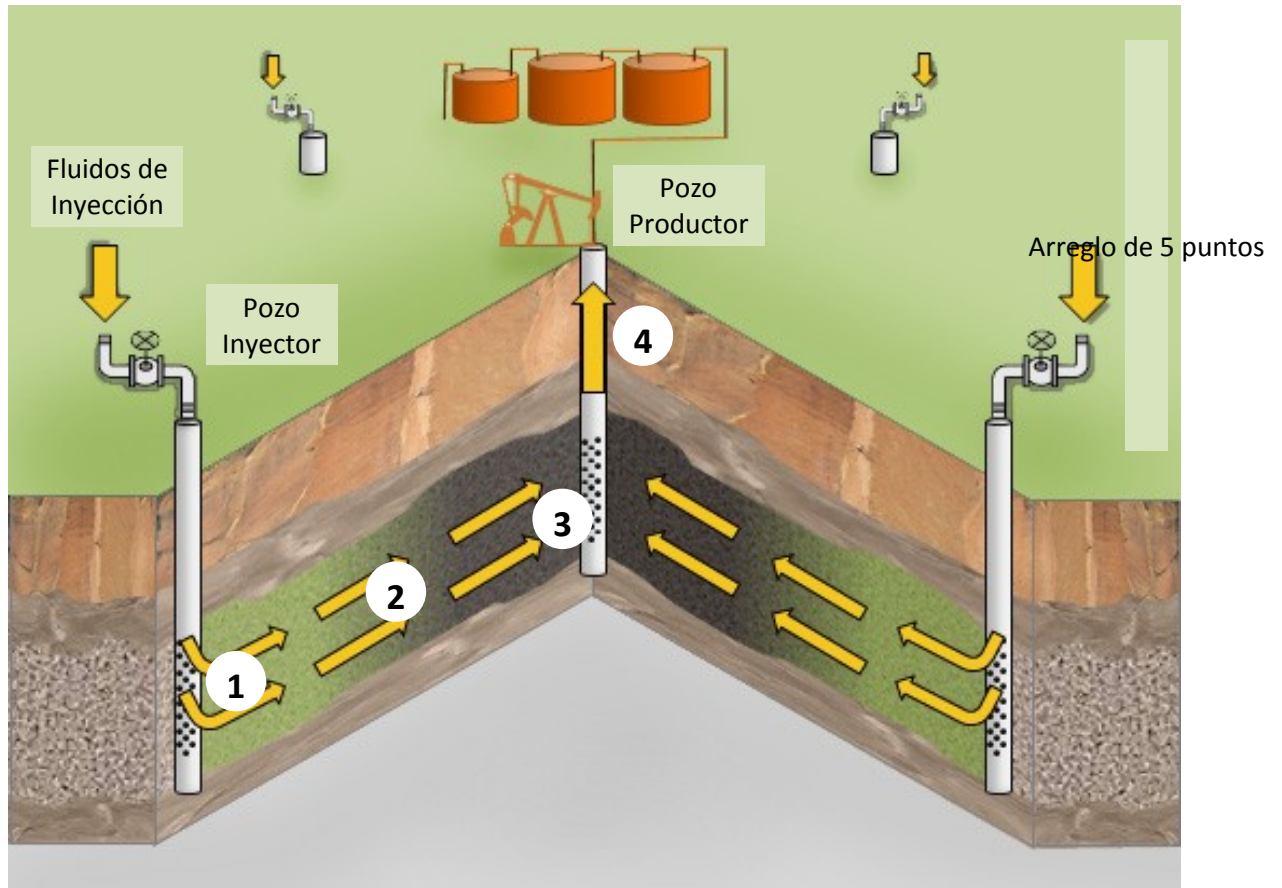
- 1.3.1.2 Inyección miscible de Nitrógeno. El uso del Nitrógeno para la recuperación de petróleo es rentable ya que éste gas puede ser obtenido a menor costo que las demás alternativas. Dado que es extraído directamente del aire por medio de separación criogénica, es una fuente ilimitada, y siendo completamente inerte no es corrosivo. En general, cuando se inyecta Nitrógeno al yacimiento, forma un frente miscible debido a que vaporiza algunos de los componentes más livianos del aceite. Este gas, ahora enriquecido a cierto modo, continúa moviéndose a través del yacimiento cada vez más lejos de los pozos inyectoros, contactando aceite “nuevo” y vaporizando más componentes, enriqueciéndose cada vez más.

Con el paso de este fenómeno, el frente de desplazamiento del gas llega a ser tan rico en componentes hidrocarburos livianos que entra en solución, o se vuelve miscible, con el petróleo. Al mismo tiempo, la interfaz entre el aceite y el gas desaparece, y los fluidos tienden a formar una sola fase.

En superficie, los fluidos producidos pueden ser separados, no solo el aceite si no el gas natural y el nitrógeno inyectado.

1.3.1.3 Inyección miscible de gas (hidrocarburo). Cuando en el petróleo no hay presentes fracciones livianas que puedan volatilizarse para formar un frente miscible con la inyección de algún gas, dicho gas a inyectar debe tener la capacidad de volverse miscible a ciertas condiciones de presión y temperatura. La forma de lograr esto es con gas natural, el cual contiene hidrocarburos livianos. El proceso es muy similar a los dos anteriores, la mayor desventaja es el alto costo del gas.

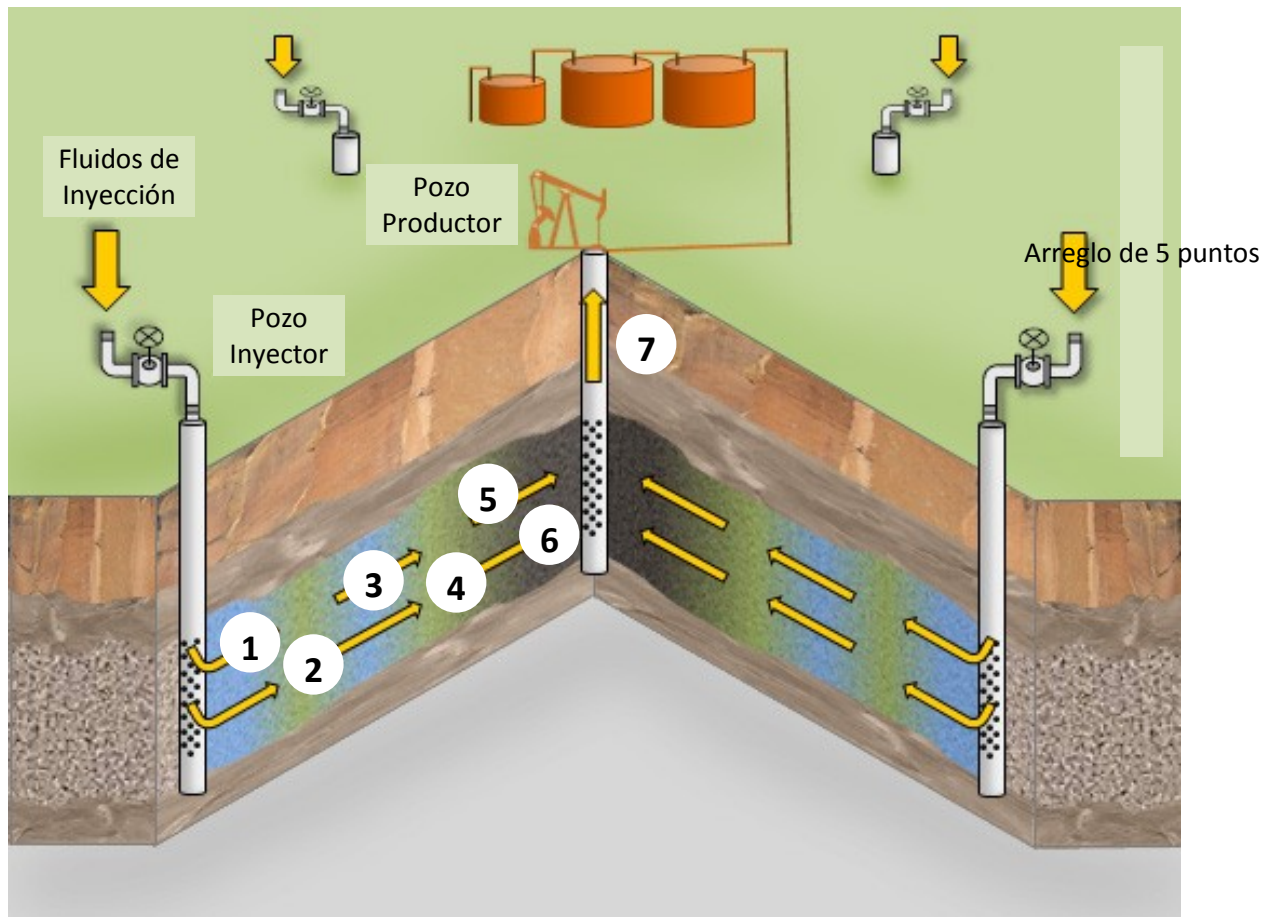
Figura 1 - Inyección miscible de gas



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA. 1. Bache de gas, 2. Zona miscible, 3. Banco de aceite, 4. Recobro adicional de petróleo.

1.3.1.4 WAG. Este método es una combinación de desplazamiento con agua y con gas con el fin de estabilizar el frente de desplazamiento. El gas usado puede ser Nitrógeno, CO₂ o gas natural. La causa principal de la ruptura de la interfaz agua – gas se debe a segregación gravitacional o bajas presiones de inyección, esto disminuye la eficiencia de barrido. El agua tiende a barrer las partes inferiores del yacimiento mientras el gas lo hace con las superiores.

Figura 2 - WAG.



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA. 1. Agua de desplazamiento, 2. Bache de gas, 3. Bache de agua, 4. Bache de gas. 5. Frente miscible, 6. Banco de aceite, 7. Recobro adicional de petróleo.

Cuando las condiciones de presión y temperatura no son suficientes para que el desplazamiento sea miscible, no se presenta intercambio de masa entre el gas de inyección y el petróleo. La inyección inmisible logra únicamente desplazar el aceite y ayudar a mantener la presión, no cambiar la viscosidad del petróleo.

1.3.2 Métodos Químicos⁶. Luego de reacondicionar el yacimiento con un “prelavado” con agua, se inyectan químicos específicos que buscan reducir la tensión interfacial, y/o mejorar el control de la movilidad (reducir la canalización). Esta acción es seguida de inyectar un fluido desplazante (agua) con el fin de mover dichos químicos y producir el aceite remanente.

1.3.2.1 Inyección de Polímeros. Ciertas condiciones del yacimiento pueden ocasionar baja eficiencia de desplazamiento en un proyecto de inyección de agua. Fracturas naturales o regiones de alta permeabilidad ocasionan que el agua inyectada se canalice y parte del aceite no sea desplazado. Además aceites más pesados o de mayor viscosidad presentan más retos en proyectos de inyección de agua, debido a su resistencia al flujo con referencia al fluido desplazante (más móvil). Para ayudar a prevenir que el fluido inyectado pase por alto ciertas zonas del yacimiento, se puede incrementar la viscosidad del agua adicionándole polímeros solubles en agua. Esto, en efecto, permite que el agua pase a través de más roca del yacimiento, resultando en una mayor eficiencia de barrido por ende mayor porcentaje de recobro.

Es necesario inyectar un bache de agua dulce luego de inyectar el polímero con el fin de prevenir que éste sea contaminado con el fluido de desplazamiento, por lo general, agua salada.

1.3.2.2 Inyección de sustancias alcalinas. Este método de recobro mejorado requiere la inyección de químicos alcalinos (soluciones causticas o hipoclorito de sodio) al yacimiento. La reacción de estos químicos con los ácidos presentes en el petróleo forman surfactantes. Estos surfactantes ayudan a que el aceite se “desprenda” de la roca por uno o más

⁶ Exploration Technologies – EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA.

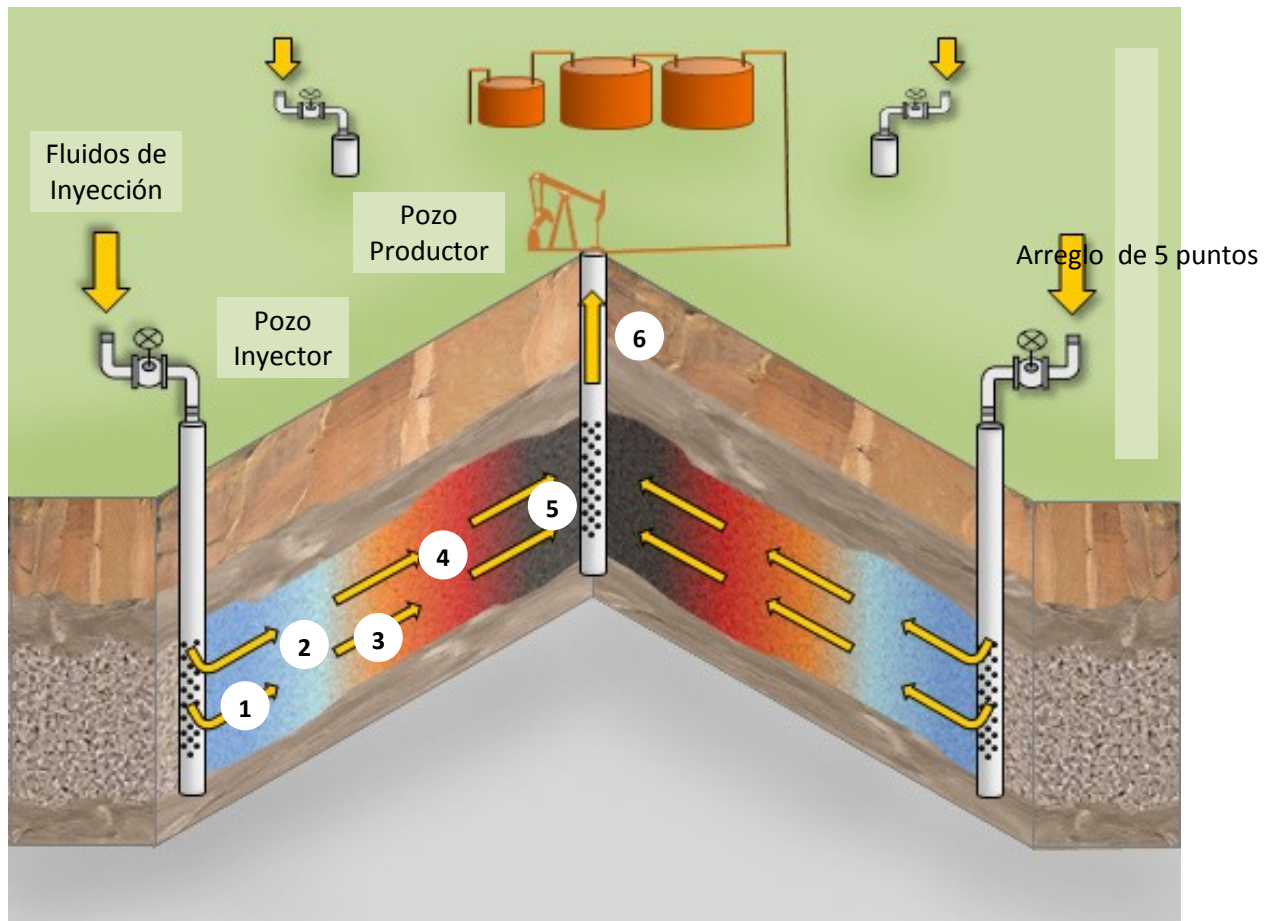
mecanismos: reducción de la tensión interfacial, emulsificación espontánea y/o cambio de mojabilidad. De esta forma, el aceite se puede desplazar fácilmente a través del yacimiento y hacia los pozos productores.

De manera similar al método anterior, se inyecta una solución de agua y polímeros luego de inyectar los químicos para ayudar a obtener un barrido más eficiente a través del yacimiento. Luego, se inyecta agua dulce para prevenir que el agua de desplazamiento contamine la solución.

Éste método es más eficiente si la presencia de ácidos en el aceite es relativamente alta. Una modificación a éste es la adición de surfactantes y polímeros a la solución alcalina, dando así un método de recobro alcalino-surfactante-polímero (ASP), el cual es menos costoso que la inyección de polímeros micelares.

1.3.2.3 Inyección de soluciones Polímero-Micelar. Este método usa la inyección de un bache de solución micelar. Este bache contiene usualmente una mezcla de surfactante, alcohol, salmuera y aceite el cual libera el petróleo atrapado en la roca para que pueda ser desplazado por el flujo de agua. Al igual que los dos métodos descritos anteriormente, es necesario inyectar un bache de agua dulce para proteger la solución activa. Este método presenta uno de las más grandes eficiencias de los métodos de recobro mejorado disponibles, pero también es uno de los más costosos de implementar.

Figura 3 - Recobro Químico.



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA. 1. Agua de desplazamiento, 2. Agua dulce, 3. Químicos para el control de movilidad, 4. Químicos para liberar el petróleo, 5. Banco de aceite, 6. Producción incremental de petróleo.

1.3.3 Métodos térmicos^{7,8}. El objetivo de estos métodos es incrementar la producción de petróleo por medio de adicionar calor, mejorando su movilidad.

⁷ Exploration Technologies – EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA.

⁸ RUSSELL, Jhon. Fundamentals of Enhanced Oil Recovery.

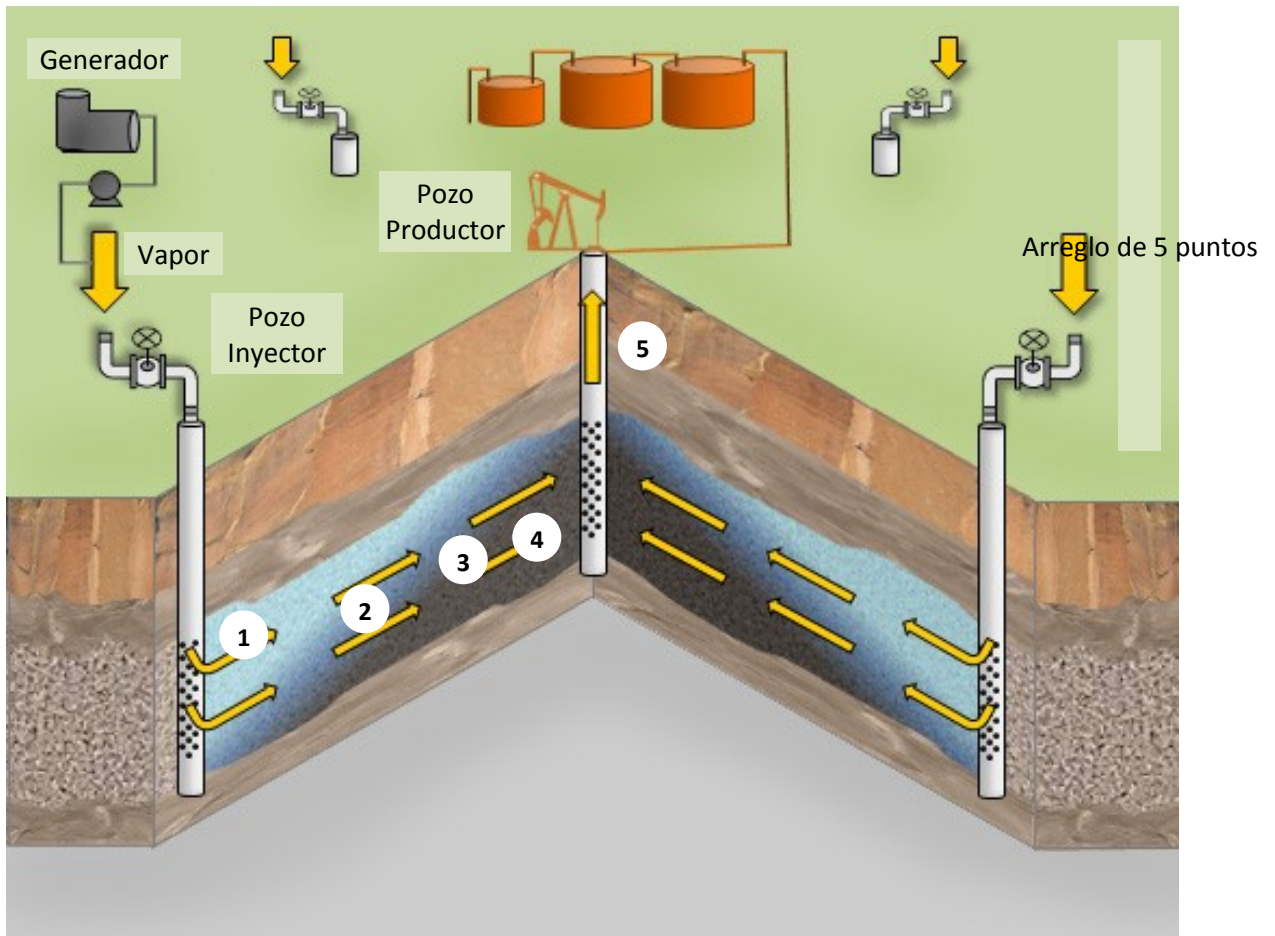
1.3.4.1 Inyección de vapor. Este método de recobro es comúnmente usado en crudos pesados, los cuales presentan una viscosidad tan alta que llega a ser poco comercial producirlos. Aunque también es usado en ciertos casos para la recuperación de aceites livianos.

Continuamente se inyecta vapor de agua a alta temperatura. Cuando el vapor transfiere calor a la formación, se condensa como agua caliente, que, junto con el continuo suministro de vapor, provee el empuje necesario para mover el aceite hacia los pozos productores.

A medida que la formación se calienta, la recuperación de aceite aumenta debido a:

- ✓ El aceite caliente es menos viscoso, esto hace que se mueva más fácilmente a través de la formación, hacia los pozos productores.
- ✓ La expansión del petróleo ayuda a que este se desprenda de la roca.
- ✓ Fracciones livianas tienden a vaporizarse cuando se calientan, se mueven hacia la parte fría de la formación delante del vapor, allí se condensan y crean una especie de banco de miscible.
- ✓ Finalmente, el vapor condensado se enfría mientras va atravesando el yacimiento y de cierta manera el proceso se convierte en un desplazamiento por agua ordinario delante de la zona caliente.

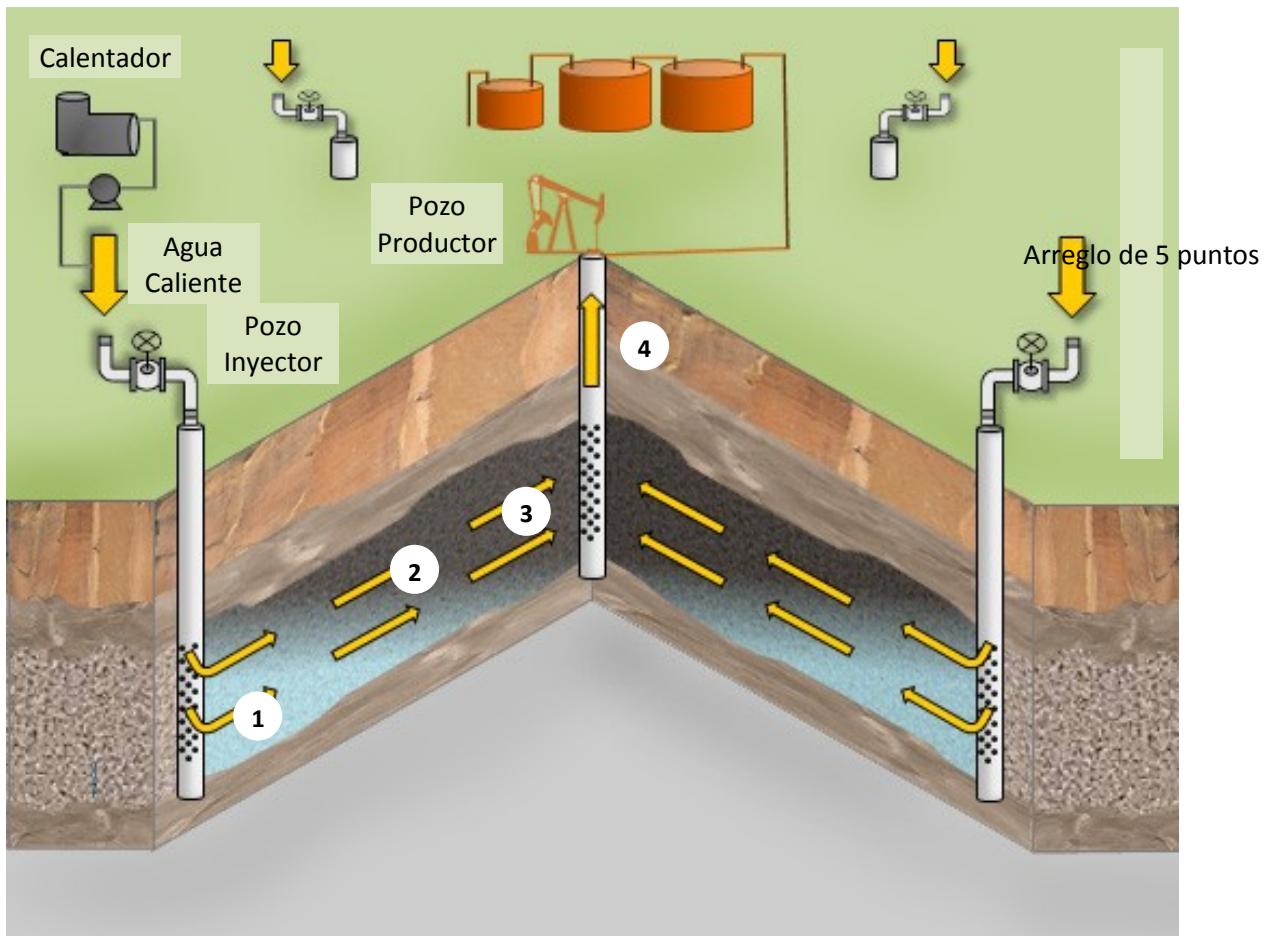
Figura 4 - Inyección de vapor.



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA. 1. Vapor, 2. Agua condensada, 3. Banco de aceite, 4. Aceite a temperatura original del yacimiento, 5. Recuperación adicional de petróleo.

1.3.4.2 Inyección de agua caliente. Involucra únicamente el flujo de dos fases: agua y petróleo. Se trata básicamente de un proceso de desplazamiento en el cual el petróleo es desplazado inmisciblemente por agua caliente. Donde el agua además de desplazar el aceite contribuye a reducir la viscosidad y expansión térmica de los fluidos de la formación.

Figura 5 - Inyección de agua caliente.



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA. 1. Agua caliente, 2. Banco de aceite, 3. Zona del yacimiento a temperatura inicial, 4. Producción incremental de petróleo.

1.3.4.3 Combustión in situ. Este método es usado algunas veces en yacimientos que contienen aceite demasiado viscoso o pesado para ser producido por técnicas convencionales. Por medio de quemar parte el aceite in situ, se crea una zona de combustión que se mueve a través de la formación hacia los pozos productores.

El proceso es iniciado comúnmente por medio de un calentador en el fondo del pozo inyector. Luego se inyecta aire por este pozo y se enciende el calentador hasta que se produzca ignición. Después de calentar la zona aledaña al pozo, se retira el calentador pero se continúa con la inyección de aire con el fin de continuar el avance del frente de combustión. Algunas veces se inyecta agua simultáneamente o alternada con el aire, esto crea vapor, el cual contribuye a distribuir mejor el calor y reduce los requerimientos de aire, a este proceso se le conoce como combustión húmeda.

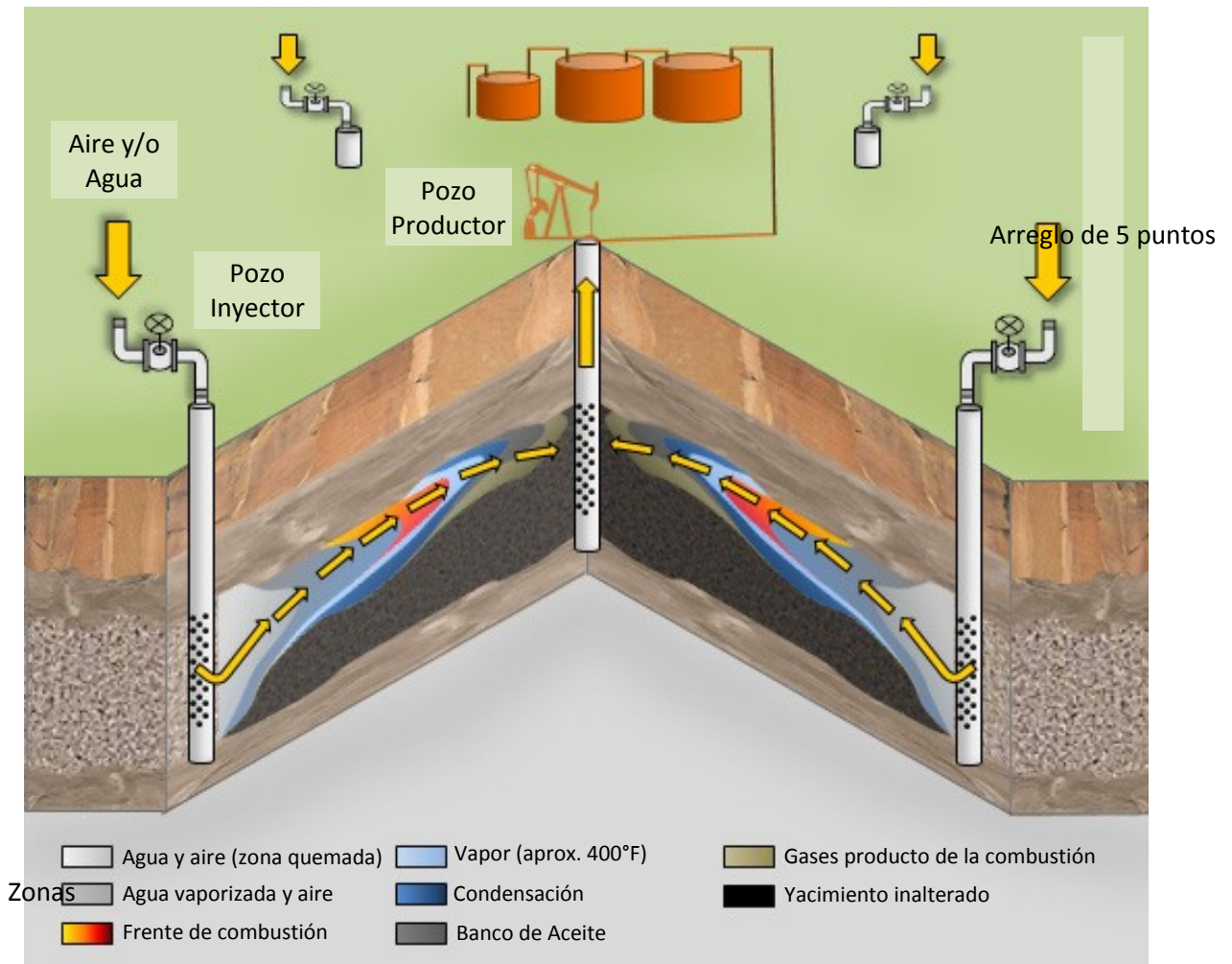
Varias interacciones ocurren en el proceso:

- ✓ Cualquier cantidad de agua presente en la formación o inyectada se convertirá en vapor. Este vapor fluye hacia la zona no quemada, ayudando a calentarla.
- ✓ La alta temperatura en el frente de combustión causa que fracciones livianas e intermedias se vaporicen, dejando atrás la fracción pesada del petróleo que servirá como combustible para continuar la combustión.
- ✓ Se crea una zona de vaporización, donde se van a concentrar las fracciones vaporizadas y el vapor.
- ✓ Delante de la zona de vaporización, debido al descenso de temperatura, se desarrolla una zona de condensación.
- ✓ El banco de aceite se enfría a medida que se dirige hacia los pozos productores hasta alcanzar una temperatura similar a la temperatura inicial del yacimiento.

El proceso es terminado cuando se detiene la inyección de aire o cuando el frente de combustión alcanza los pozos productores. Los vapores producto de la combustión tienden a segregarse hacia la zona superior del

yacimiento, disminuyendo la eficiencia de este método. La inyección de agua simultánea con el aire puede ayudar a disminuir este efecto.

Figura 6 - Combustión in situ.



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA.

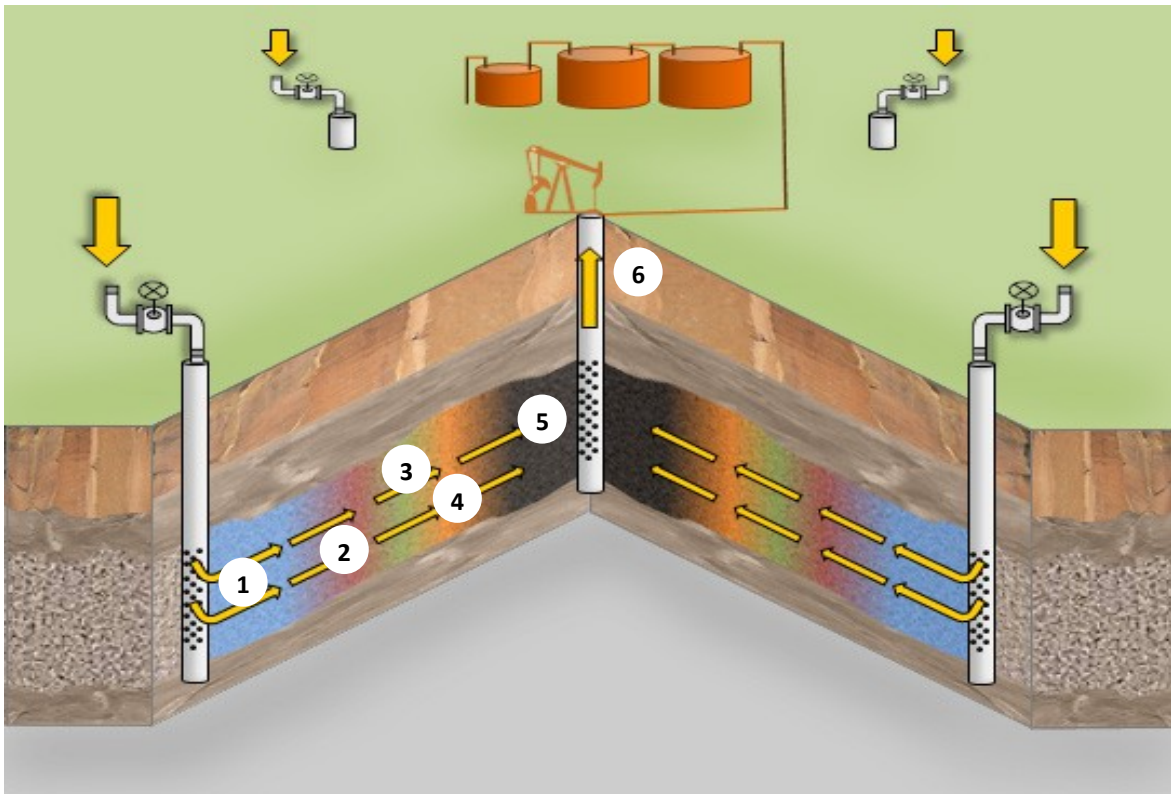
1.3.4.4 Recobro Microbial (MEOR)⁹. Este método es llevado a cabo por medio de inyectar una solución de microorganismos y nutrientes por un pozo inyector. A medida que los microorganismos se alimentan del

⁹ Exploration Technologies – EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA.

nutriente y lo metabolizan, excretan productos que van desde ácidos y surfactantes hasta gases como Hidrogeno y CO₂. Estos productos actúan de diferentes maneras, haciendo que el aceite pueda moverse más fácilmente hacia los pozos productores.

El bache de solución de microorganismos, nutriente y productos son desplazados a lo largo del yacimiento por medio de inyección de agua.

Figura 7 - MEOR.



Fuente: adaptado de Exploration Technologies –EOR Process Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy USA. 1. Agua de desplazamiento, 2. Nutriente, 3. Microorganismos, 4. Químicos producto del metabolismo de los microorganismos, 5. Banco de aceite, 6. Producción incremental.

2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE METODOS DE RECOBRO MEJORADO

Uno de los primeros pasos para la selección de un método de recobro mejorado a aplicar en un yacimiento específico es realizar un screening de las diferentes técnicas disponibles. Luego de hacer la selección se pasa a un análisis económico y técnico con el fin de llevar a cabo una selección acertada del mejor método de recobro mejorado a aplicar.

En la literatura se encuentran diferentes metodologías y criterios para seleccionar el método de recobro mejorado adecuado para un yacimiento en específico partiendo de datos de yacimiento y fluido. A continuación se analizan dos conjuntos de criterios actualizados.

2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN USADOS POR EXXONMOBIL

Un grupo de expertos en recobro mejorado de la compañía ExxonMobil, encabezado por Jasper L. Dickson y Alana Leahy-Dios recopiló una serie de criterios que se resumen en las tablas 1 a 3.

Tabla 1 – Criterios de selección para métodos de inyección de gas usados por ExxonMobil.

Propiedad	Inyección Miscible de HC	Inyección Miscible de CO ₂	Inyección miscible de nitrógeno
Gravedad API [°API]	>30-40	>22	>40
Viscosidad [cP]	< 3	<10	<0.4
Profundidad [ft]	4000 - 16000	> 2500	> 10000
Permeabilidad [mD]	> 100	> 100	> 100
Saturación de aceite [% VP]	> 30	> 20	> 40

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Tabla 2 – Criterios de selección para métodos térmicos usados por ExxonMobil.

Propiedad	CSS	Vapor	SAGD	Agua caliente
Gravedad API [°API]	8 – 35	8 – 20	7 – 12	10 – 35
Viscosidad [cP]	10 ³ -10 ⁶	10 ³ -10 ⁴	4000-10 ⁶	10 ³ -10 ⁴
Profundidad [ft]	400-3000	400-4500	250-3000	
Permeabilidad [mD]	>250	> 250	> 5000	> 35
Saturación de aceite [% VP]	> 50	> 40	> 50	> 50

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Tabla 3 – Criterios de selección para métodos químicos usados por ExxonMobil.

Propiedad	Polímero	ASP
Gravedad API [°API]	>15	>20
Viscosidad [cP]	10 – 1000	< 35
Profundidad [ft]	800 – 9000	500 – 9000
Permeabilidad [mD]	$10^2 - 10^3$	> 100
Saturación de aceite [% VP]	>30	>45
Temperatura [°F]	>170	<200

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Más adelante se analizará la importancia de la robustez de la información que será usada para el desarrollo del sistema experto. Los criterios usados por ExxonMobil son poco minuciosos para un análisis estadístico, no presentan datos como la media y en algunos casos falta una de las cotas.

2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN USADOS EN EL FUZZY LOGIC EOR SCREENING EXPERT

Dentro de la literatura revisada, el grupo de criterios de selección de métodos de recobro mejorado más completo para el análisis propuesto en este proyecto es el presentado por Ahmad Aladasani y Baojun Bai¹⁸. El screening planteado por

¹⁸ ALADASANI, Ahmad y BAI, Baojun. Recent developments and updated screening criteria of enhanced recovery techniques. SPE 130726, 2010.

estos autores está dentro de los más actualizados publicados en la SPE. Agrupa en 16 categorías los diferentes métodos disponibles y da criterios de selección completos y acordes con los requerimientos para el diseño y desarrollo del Fuzzy Logic EOR Screening Expert.

2.2.1 Criterios de selección para métodos de inyección de gas.

Esta técnica es comúnmente usada para recuperar aceites livianos en yacimientos que presentan baja permeabilidad¹⁹.

Las condiciones para que la inyección de gas sea miscible o inmisible se convierten en puntos clave para estos métodos de recobro. Las propiedades críticas son profundidad, que está directamente relacionada con la presión del yacimiento y composición del crudo, que determinará las condiciones de inyección para que el gas sea miscible o no.

¹⁹ DICKSON, J Y LEAHY-DIOS, A. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Tabla 4 - Criterios de selección para métodos de inyección de gas.

Método EOR	Propiedades del crudo		Características del yacimiento					
	Gravedad [°API]	Viscosidad [cP]	Porosidad [%]	So [%VP]	Tipo de formación	Permeabilidad [mD]	Profundidad [ft]	Temperatura [°F]
Inyección miscible de gas								
CO ₂	28 – 45 Prom. 37	0 – 35 Prom. 2.1	3 – 37 Prom. 14.8	15 – 89 Prom. 46	Arenisca y carbonato	1.5 – 4500 Prom. 201.1	1500 – 13365 Prom. 6171.2	82 – 250 Prom. 135.3
HC	23 – 57 Prom. 38.3	0.04 – 18E3 Prom. 286.1	4.25 – 45 Prom. 14.5	30 – 98 Prom. 71	Arenisca y carbonato	0.1 - 5000 Prom. 201.1	4040 – 15900 Prom. 8343.6	85 – 329 Prom. 202.2
WAG	33 – 39 Prom. 35.6	0 – 0.6 Prom. 0.3	11 – 24 Prom. 18.3		Arenisca y carbonato	130 – 10000 Prom. 1043.3	7545 – 8887 Prom. 8216.8	194 – 253 Prom. 229.4
N ₂	38 - 54 Prom. 47.6	0 – 0.2 Prom. 0.07	7.5 – 14 Prom. 11.2	0,76 – 0.8 Prom. 0,78	Arenisca y carbonato	0.2 – 35 Prom. 15	10000 – 18500 Prom. 14633.3	190 – 325 266.6
Inyección inmisible de gas								
CO ₂	11 – 35 Prom. 34.6	0.6 – 529 Prom. 65.5	17 – 32 Prom. 26.3	42 – 78 Prom. 56	Arenisca o carbonato	30 -1000 Prom. 217	1150 – 8500 Prom. 3385	82 – 198 Prom. 124
HC	22 – 48 Prom. 35	0.25 – 4 Prom. 2.1	5 – 22 Prom. 13.5	75 – 83 Prom. 79	Arenisca	40 – 1000 Prom. 520	6000 – 7000 Prom. 6500	170 – 180 Prom. 175
WAG	9,3 – 41 Prom. 31	0.17 – 16E3 Prom.3984.2	18 – 31.9 Prom. 25.09	Prom. 88	Arenisca o carbonato	100 – 6600 Prom. 2392	2650 – 9199 Prom. 7218.71	131 – 267 Prom. 198.7
N ₂	16 – 54 Prom. 34.6	0 – 18E3 Prom.2256.8	11 – 28 Prom 19.46	47 – 98.5 Prom. 71	Arenisca	3 – 2800 Prom. 1041.7	1700 – 18500 Prom. 7914.2	82 – 325 Prom. 173.1

Fuente: ALADASANI, Ahmad y BAI, Baojun. Recent developments and updated screening criteria of enhanced recovery techniques. SPE 130726, 2010.

La mayor desventaja de estos métodos radica en el poco control que se llega a ejercer en la movilidad del frente, esto se ve evidenciado en la ruptura temprana en algunos de los pozos productores, y como en algunas ocasiones el gas de inyección es ácido (por ejemplo CO₂), crea problemas de corrosión.

2.2.2 Criterios de selección para métodos químicos.

Los procesos químicos se usan en el recobro de petróleo con viscosidad demasiado alta como para implementar inyección de gas, pero muy baja como para que un proceso térmico sea necesario²⁰.

En la inyección de productos que alteran la movilidad, como polímeros, los factores más relevantes serán propiedades de flujo del medio poroso (permeabilidad), resistencia del fluido a ser desplazado (viscosidad) y saturación de los diferentes fluidos. En productos que buscan llevar a cabo una reacción química, el punto clave es garantizar las condiciones óptimas para que dicha reacción sea exitosa (temperatura, profundidad, tipo de roca y saturación de fluidos). La litología determina la aplicabilidad de estos métodos, algunos químicos son capaces de disolver fácilmente carbonatos, luego estas técnicas son descartadas para este tipo de roca.

Tabla 5 - Criterios de selección para métodos químicos.

Método EOR	Propiedades del crudo		Características del yacimiento					
	Gravedad [°API]	Viscosidad [cP]	Porosidad [%]	So [%VP]	Tipo de formación	Permeabilidad [mD]	Profundidad [ft]	Temperatura [°F]
Polímeros	13-42.5 Prom. 26.5	0.4 – 4000 Prom. 123.2	10.4 – 33 Prom. 22.5	34 – 82 Prom. 64	Arenisca	1.8 – 5500 Prom. 834.1	7000 – 9460 Prom. 4221.9	74 – 237.2 Prom. 167
ASP	23-34 Prom. 32.6	11 – 6500 Prom. 875.8	26 – 32 Prom. 26.6	68 – 74.8 Prom. 73.7	Arenisca	596 – 1520	2723 – 3900 Prom. 2984.5	118 – 158 Prom. 121.6
S+P/A	22-39 Prom. 31	3 – 15.6 Prom. 9.3	16 – 16.8 Prom. 16.4	43.5 – 53 Prom. 48	Arenisca	50 – 60 Prom. 55	625 – 5300 Prom. 2941.6	122 – 155 Prom. 138.5

Fuente: ALADASANI, Ahmad y BAI, Baojun. Recent developments and updated screening criteria of enhanced recovery techniques. SPE 130726, 2010.

²⁰ DICKSON, J Y LEAHY-DIOS, A. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

La inyección de polímeros es aplicable a yacimientos en los cuales se presenten condiciones que limiten la eficiencia de desplazamiento, como fracturas o zonas de alta permeabilidad que canalizan el fluido inyectado, o aceites pesados.

Las condiciones del agua de formación influyen directamente en la estabilidad del químico inyectado; en general, la concentración de iones cloruro debe ser inferior a 20000 ppm y de iones divalentes (Ca^{++} y Mg^{++}) inferior a 500 ppm.

2.2.3 Criterios de selección para métodos térmicos.

El objetivo de los métodos térmicos es disminuir la viscosidad del petróleo por medio de lograr una transferencia de calor desde el fluido inyectado hacia el petróleo remanente lo más eficiente posible. Para formaciones con alta porosidad y alta permeabilidad es ideal el uso de inyección de vapor, aunque, a mayor profundidad las pérdidas de calor vuelven significativas además de la disminución en el calor latente del vapor. Cuando el fluido presente en el yacimiento es demasiado viscoso como para moverse hacia los pozos productores con métodos convencionales, la mejor opción es combustión in situ.

Tabla 6 - Criterios de selección para métodos térmicos.

Método EOR	Propiedades del crudo		Características del yacimiento					
	Gravedad [°API]	Viscosidad [cP]	Porosidad [%]	So [%VP]	Tipo de formación	Permeabilidad [mD]	Profundidad [ft]	Temperatura [°F]
ISC	10 – 38 Prom. 23.6	1.44 – 2770 Prom. 504.8	14 – 35 Prom. 23.3	50 – 94 Prom. 67	Arenisca o carbonato	10 – 15E3 Prom. 1981.5	400 – 11300 Prom. 5569.6	64.4 – 230 Prom. 175.5
SF	8 – 30 Prom. 14.5	3 – 5E6 Prom. 32971	12 – 65 Prom. 32.5	35 – 90 Prom. 66	Arenisca	1 – 15E3 Prom. 2605.7	200 – 9000 Prom. 1643.6	10 – 350 Prom. 105.8
HWF	12 – 25 Prom. 18.6	170 – 8000 Prom. 2002	25 – 37 Prom. 31.2	15 – 85 Prom. 58.5	Arenisca	900 – 6000 Prom. 3346	500 – 2950 Prom. 1942	75 – 135 Prom. 98.5

Fuente: ALADASANI, Ahmad y BAI, Baojun. Recent developments and updated screening criteria of enhanced recovery techniques. SPE 130726, 2010.

En combustión, la mayor limitante es continuar la combustión, el frente de combustión es difícil de controlar y monitorear. En general, la porosidad debe ser alta para minimizar las pérdidas de calor hacia la matriz de la roca.

2.2.4 Criterios de selección para MEOR

A pesar que hay gran incertidumbre en cuanto a la sensibilidad y el impacto de agentes biológicos en el yacimiento, el recobro usando microbios es bastante prometedor y atractivo debido a su bajo costo y gran potencial para mejorar la eficiencia de desplazamiento microscópica y macroscópica.

Tabla 7 – Criterios de selección para métodos MEOR.

Método EOR	Propiedades del crudo		Características del yacimiento					
	Gravedad [°API]	Viscosidad [cP]	Porosidad [%]	So [%VP]	Tipo de formación	Permeabilidad [mD]	Profundidad [ft]	Temperatura [°F]
MEOR	12 – 33 Prom. 26.6	1.7 – 8900 Prom. 2977.5	12 – 26 Prom. 19	55 – 65 Prom. 60	Arenisca	180 – 200 Prom. 190	1572 – 3464 Prom. 2445.3	86 – 90 Prom. 88

Fuente: ALADASANI, Ahmad y BAI, Baojun. Recent developments and updated screening criteria of enhanced recovery techniques. SPE 130726, 2010.

3. FUNDAMENTOS DE SISTEMA EXPERTO Y LOGICA DIFUSA

3.1 SISTEMA EXPERTO²⁴

No hace mucho tiempo, se creía que algunos problemas como la demostración de teoremas, el reconocimiento de la voz y el de patrones, ciertos juegos (como el ajedrez o las damas), y sistemas altamente complejos de tipo determinista o estocástico, debían ser resueltos por personas, dado que su formulación y resolución requieren ciertas habilidades que sólo se encuentran en los seres humanos (por ejemplo, la habilidad de pensar, observar, memorizar, aprender, ver, oler, etc.). Sin embargo, el trabajo realizado en las tres últimas décadas por investigadores procedentes de varios campos, muestra que muchos de estos problemas pueden ser formulados y resueltos por máquinas.

3.1.1 ¿Qué es un Sistema Experto?

En la literatura existente se pueden encontrar muchas definiciones de sistema experto. Por ejemplo, Stevens (1984), página 40, da la definición siguiente:

Los sistemas expertos son máquinas que piensan y razonan como un experto lo haría en una cierta especialidad o campo. Por ejemplo, un sistema experto en diagnóstico médico requeriría como datos los

²⁴ STEVENS, L. Artificial Intelligence, The search of the perfect machine.

síntomas del paciente, los resultados de análisis clínicos y otros hechos relevantes, y, utilizando estos, buscaría en una base de datos la información necesaria para poder identificar la correspondiente enfermedad. [. . .] Un Sistema Experto de verdad, no sólo realiza las funciones tradicionales de manejar grandes cantidades de datos, sino que también manipula esos datos de forma tal que el resultado sea inteligible y tenga significado para responder a preguntas incluso no completamente especificadas²⁵.

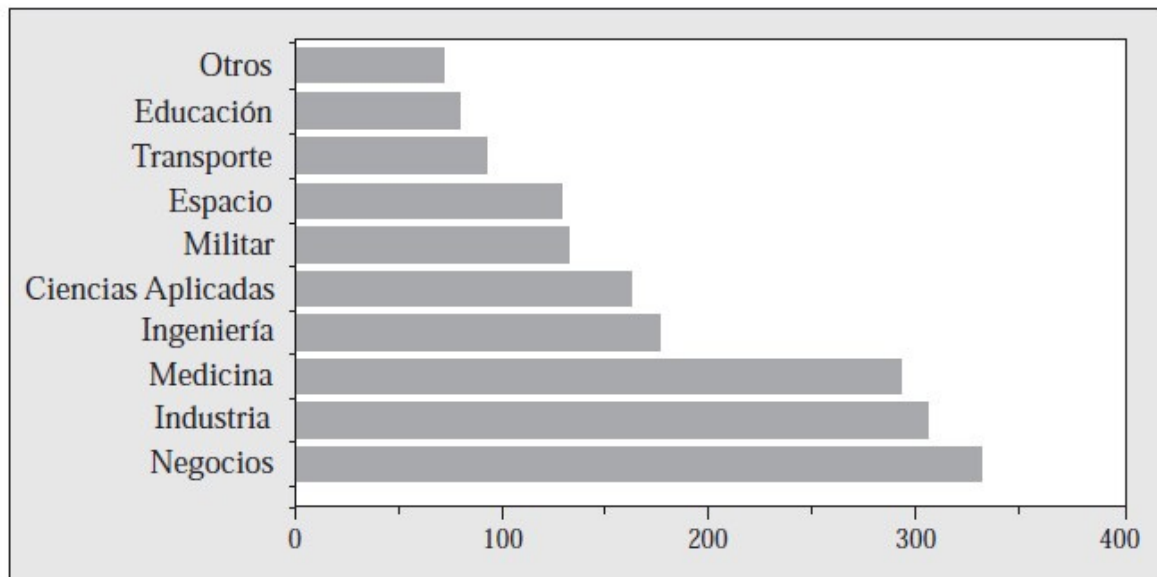
Un sistema experto puede definirse como un sistema informático (hardware y software) que simula a los expertos humanos en un área de especialización dada.

Como tal, un sistema experto debería ser capaz de procesar y memorizar información, aprender y razonar en situaciones deterministas e inciertas, comunicar con los hombres y/u otros sistemas expertos, tomar decisiones apropiadas, y explicar por qué se han tomado tales decisiones. Se puede pensar también en un sistema experto como un *consultor* que puede suministrar ayuda a (o en algunos casos sustituir completamente) los expertos humanos con un grado razonable de fiabilidad.

Durante la última década se han desarrollado muy rápidamente numerosas aplicaciones de sistemas expertos a muchos campos. Durkin (1994) examina unos 2,500 sistemas expertos y los clasifica por criterios, tales como áreas de aplicación, tareas realizadas, etc. La economía, la industria, la medicina e ingeniería continúan siendo los campos dominantes entre aquellos en los que se utilizan los sistemas expertos.

Figura 8 - Campos de aplicación de sistemas expertos.

²⁵ STEVENS, L. Artificial Intelligence, The search of the perfect machine.



Fuente: CASTILLO, E. GUTIERREZ, J Y HADI, A. Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas.

3.1.2 ¿Por qué un Sistema Experto?

El desarrollo o la adquisición de un sistema experto es generalmente caro, pero el mantenimiento y el coste marginal de su uso repetido es relativamente bajo. Por otra parte, la ganancia en términos monetarios, tiempo, y precisión resultantes del uso de los sistemas expertos son muy altas, y la amortización es muy rápida. Sin embargo, antes de desarrollar o adquirir un sistema experto debe realizarse un análisis de factibilidad y de coste-beneficio. Hay varias razones para utilizar sistemas expertos. Las más importantes son:

- ✓ Con la ayuda de un sistema experto, personal con poca experiencia puede resolver problemas que requieren un conocimiento de experto. Esto es también importante en casos en los que hay pocos expertos humanos.

Además, el número de personas con acceso al conocimiento aumenta con el uso de sistemas expertos.

- ✓ El conocimiento de varios expertos humanos puede combinarse, lo que da lugar a sistemas expertos más fiables, ya que se obtiene un sistema experto que combina la sabiduría colectiva de varios expertos humanos en lugar de la de uno solo.
- ✓ Los sistemas expertos pueden responder a preguntas y resolver problemas mucho más rápidamente que un experto humano. Por ello, los sistemas son muy valiosos en casos en los que el tiempo de respuesta es crítico.
- ✓ En algunos casos, la complejidad del problema impide al experto humano resolverlo. En otros casos la solución de los expertos humanos no es fiable. Debido a la capacidad de los ordenadores de procesar un elevadísimo número de operaciones complejas de forma rápida y aproximada, los sistemas expertos suministran respuestas rápidas y fiables en situaciones en las que los expertos humanos no pueden.
- ✓ Los sistemas expertos pueden ser utilizados para realizar operaciones monótonas, aburridas e incómodas para los humanos. En verdad, los sistemas expertos pueden ser la única solución viable en una situación en la que la tarea a realizar desborda al ser humano (por ejemplo, un avión o una cápsula espacial dirigida por un sistema experto).
- ✓ Se pueden obtener enormes ahorros mediante el uso de sistemas expertos.

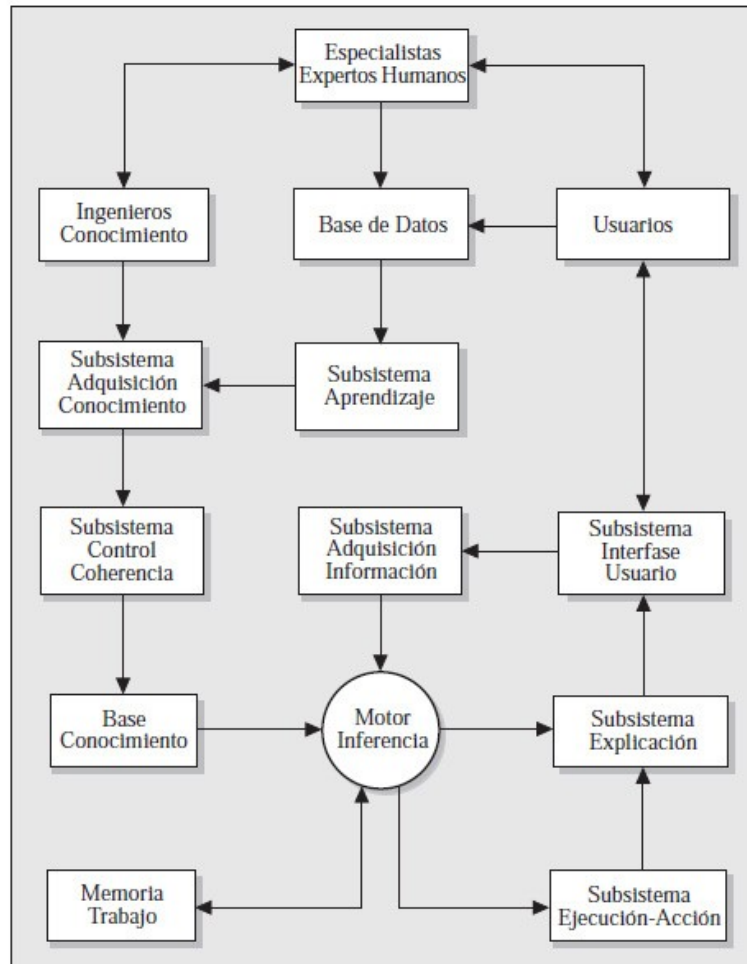
3.1.3 Componentes de un Sistema Experto

La definición de sistema experto se entiende mejor cuando se examinan los principales componentes de los sistemas expertos.

- Componente Humano. Un sistema experto es generalmente el resultado de la colaboración de uno o varios *expertos humanos especialistas en el tema de estudio* y los *ingenieros del conocimiento*, con los *usuarios* en mente. Los expertos humanos suministran el conocimiento básico en el tema de interés, y los ingenieros del conocimiento trasladan este conocimiento a un lenguaje, que el sistema experto pueda entender. La colaboración de los expertos humanos, los ingenieros del conocimiento y los usuarios es, quizás, el elemento más importante en el desarrollo de un sistema experto. Esta etapa requiere una enorme dedicación y un gran esfuerzo debido a los diferentes lenguajes que hablan las distintas partes y a las diferentes experiencias que tienen.
- Base de Conocimiento. Los especialistas son responsables de suministrar a los ingenieros del conocimiento una base de conocimiento ordenada y estructurada, y un conjunto de relaciones bien definidas y explicadas. Esta forma estructurada de pensar requiere que los expertos humanos repiensen, reorganicen, y reestructuren la base de conocimiento y, como resultado, el especialista se convierte en un mejor conocedor de su propio campo de especialidad.

Hay que diferenciar entre *datos* y *conocimiento*. El conocimiento se refiere a afirmaciones de validez general tales como reglas, distribuciones de probabilidad, etc. Los datos se refieren a la información relacionada con una aplicación particular. Mientras el conocimiento es permanente, los datos son efímeros, es decir, no forman parte de la componente permanente de un sistema y son destruidos después de usarlos. El conocimiento se almacena en la base de conocimiento y los datos se almacenan en la *memoria de trabajo*. Todos los procedimientos de los diferentes sistemas y subsistemas que son de carácter transitorio se almacenan también en la memoria de trabajo.

Figura 9 - Componentes típicos de un sistema experto.



Fuente: CASTILLO, E. GUTIERREZ, J Y HADI, A. Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas. Las flechas representan el flujo de la información.

- Subsistema de adquisición de conocimiento. El subsistema de adquisición de conocimiento controla el flujo del nuevo conocimiento que fluye del experto humano a la base de datos. El sistema determina qué nuevo conocimiento se necesita, o si el conocimiento recibido es en realidad nuevo, es decir, si debe incluirse en la base de datos y, en caso necesario, incorpora estos conocimientos a la misma.

- Control de la coherencia. El subsistema de control de la coherencia ha aparecido en los sistemas expertos muy recientemente. Sin embargo, es una componente esencial de un sistema experto. Este subsistema controla la consistencia de la base de datos y evita que unidades de conocimiento inconsistentes entren en la misma. En situaciones complejas incluso un experto humano puede formular afirmaciones inconsistentes. Por ello, sin un subsistema de control de la coherencia, unidades de conocimiento contradictorio pueden formar parte de la base de conocimiento, dando lugar a un comportamiento insatisfactorio del sistema. Es también bastante común, especialmente en sistemas con mecanismos de propagación de incertidumbre, que se llegue a conclusiones absurdas o en conflicto como, por ejemplo, situaciones en las que el sistema genera probabilidades mayores que la unidad o negativas. Por ello, el subsistema de control de la coherencia comprueba e informa a los expertos de las inconsistencias. Por otra parte, cuando se solicita información de los expertos humanos, éste subsistema informa sobre las restricciones que ésta debe cumplir para ser coherente con la existente en la base de conocimiento. De esta forma, ayuda a los expertos humanos a dar información fiable.
- Motor de inherencia. El motor de inherencia es el corazón de todo sistema experto. El cometido principal de esta componente es el de sacar conclusiones aplicando el conocimiento a los datos. Las conclusiones del motor de inferencia pueden estar basadas en *conocimiento determinista* o *conocimiento probabilístico*. Como puede esperarse, el tratamiento de situaciones de incertidumbre (probabilísticas) puede ser considerablemente más difícil que el tratamiento de situaciones ciertas (deterministas). En muchos casos, algunos hechos (datos) no se conocen con absoluta certeza. Puede darse el caso de tener que trabajar con conocimiento de tipo no determinista, es decir, de casos en los que se dispone sólo de información aleatoria o difusa. El motor de inferencia es también

responsable de la propagación de este conocimiento incierto. De hecho, en los sistemas expertos basados en probabilidad, la propagación de incertidumbre es la tarea principal del motor de inferencia, que permite sacar conclusiones bajo incertidumbre. Esta tarea es tan compleja que da lugar a que ésta sea probablemente la componente más débil de casi todos los sistemas expertos existentes.

- Adquisición de conocimiento. Si el conocimiento inicial es muy limitado y no se pueden sacar conclusiones, el motor de inferencia utiliza el *subsistema de adquisición de conocimiento* para obtener el conocimiento necesario y continuar con el proceso de inferencia hasta que se hayan sacado conclusiones. En algunos casos, el usuario puede suministrar la información requerida para éste y otros objetivos. De ello resulta la necesidad de una *interface de usuario* y de una comprobación de la consistencia de la información suministrada por el usuario antes de introducirla en la memoria de trabajo.
- Interface de Usuario. La interface de usuario es el enlace entre el sistema experto y el usuario. Por ello, para que un sistema experto sea una herramienta efectiva, debe incorporar mecanismos eficientes para mostrar y obtener información de forma fácil y agradable.
- Subsistema de ejecución de órdenes. El *subsistema de ejecución de órdenes* es la componente que permite al sistema experto iniciar acciones. Estas acciones se basan en las conclusiones sacadas por el motor de inferencia. La explicación de las razones por las que se inician estas acciones pueden darse al usuario mediante el *subsistema de explicación*.

- Subsistema de explicación. El usuario puede pedir una explicación de las conclusiones sacadas o de las acciones iniciadas por el sistema experto. Por ello, es necesario un subsistema que explique el proceso seguido por el motor de inferencia o por el subsistema de ejecución. En muchos dominios de aplicaciones, es necesaria la explicación de las conclusiones debido a los riesgos asociados con las acciones a ejecutar.
- Subsistema de aprendizaje. Una de las principales características de un sistema experto es su capacidad para aprender. Otra característica de los sistemas expertos es su habilidad para obtener *experiencia* a partir de los *datos* disponibles. Estos datos pueden ser obtenidos por expertos y no expertos y pueden utilizarse por el *subsistema de adquisición de conocimiento* y por el *subsistema de aprendizaje*.

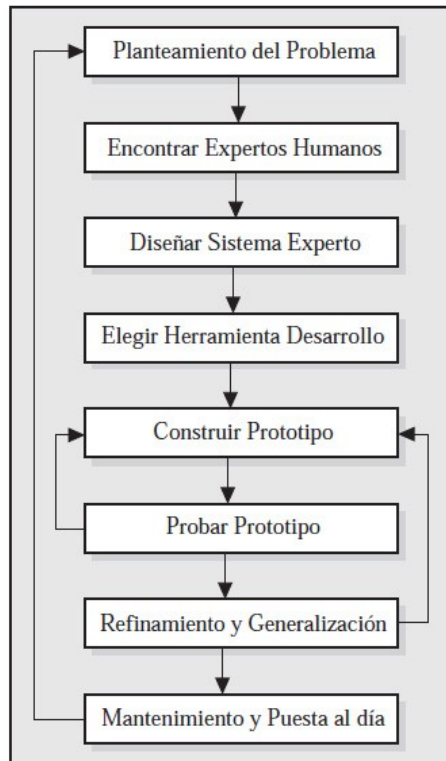
3.1.4 Desarrollo de un sistema experto.

Las etapas del diseño e implementación de un sistema experto son las siguientes:

- Planteamiento del problema. La primera etapa en cualquier proyecto es normalmente la definición del problema a resolver. Puesto que el objetivo principal de un sistema experto es responder a preguntas y resolver problemas, esta etapa es quizás la más importante en el desarrollo de un sistema experto. Si el sistema está mal definido, se espera que suministre respuestas erróneas.
- Encontrar expertos humanos que puedan resolver el problema. En algunos casos, sin embargo, las bases de datos pueden jugar el papel del experto humano.

- Diseño de un sistema experto. Esta etapa incluye el diseño de estructuras para almacenar el conocimiento, el motor de inferencia, el subsistema de explicación, la interface de usuario, etc.
- Elección de la herramienta de desarrollo o lenguaje de programación. Debe decidirse si realizar un sistema experto a medida, o utilizar una concha, una herramienta, o un lenguaje de programación. Si existiera una concha satisfaciendo todos los requerimientos del diseño, ésta debería ser la elección, no sólo por razones de tipo financiero sino también por razones de fiabilidad. Las conchas y herramientas comerciales están sujetas a controles de calidad, a los que otros programas no lo están.
- Desarrollo y prueba de un prototipo. Si el prototipo no pasa las pruebas requeridas, las etapas anteriores (con las modificaciones apropiadas) deben ser repetidas hasta que se obtenga un prototipo satisfactorio.
- Refinamiento y generalización. En esta etapa se corrigen los fallos y se incluyen nuevas posibilidades no incorporadas en el diseño inicial.
- Mantenimiento y puesta al día. En esta etapa el usuario plantea problemas o defectos del prototipo, corrige errores, actualiza el producto con nuevos avances, etc.

Figura 10 - Etapas en el desarrollo de un sistema experto.



Fuente: CASTILLO, E. GUTIERREZ, J Y HADI, A. Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas.

Todas las etapas influyen en la calidad del sistema experto resultante, que siempre debe ser evaluado en función de las aportaciones de los usuarios.

3.2 CONJUNTOS DIFUSOS²⁶

La teoría de conjuntos borrosos se introduce como un mecanismo para representar la vaguedad e imprecisión de los conceptos empleados en el lenguaje natural. Estos conjuntos borrosos son definidos como una extensión de los conjuntos clásicos capaz de modelar la imprecisión propia de los conceptos

²⁶ KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.

humanos. A mediados de los 70 se amplía el concepto de conjunto al de lógica, apareciendo lógicas difusas y aplicaciones a sistemas de control. Hoy en día son muchas las aplicaciones tanto industriales como domésticas que hacen uso de este paradigma.

3.2.1 Revisión de conjuntos.

Como se ha apuntado, el origen de la lógica difusa es la noción de conjunto difuso. Antes de abordar el estudio de la teoría de conjuntos borrosos, se revisaran algunos conceptos básicos de teoría clásica, con el objeto de alcanzar una mayor comprensión de ambas.

El punto de partida de la teoría de conjuntos son las nociones de *elemento* y *conjunto*. Un conjunto se define genéricamente como una colección de elementos. Típicamente los elementos que forman parte de un conjunto tienen algún tipo de propiedad en común que les haga susceptibles de pertenecer al conjunto. El conjunto suele representarse con una letra mayúscula y los elementos del mismo se representan con una letra minúscula.

Sobre los conjuntos se define una relación de pertenencia, la cual se denota con el símbolo \in . Así pues, si el elemento a pertenece al conjunto A , este hecho se formaliza mediante la expresión

$$a \in A$$

En el caso en que b no pertenezca a A se escribe

$$b \notin A$$

Respecto a la forma de descripción del conjunto, ésta se puede realizar de manera enumerativa, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Se define el cardinal de un conjunto como el número de elementos que forman parte de dicho conjunto. Si dicho cardinal es un número finito, el conjunto se denominara finito. Caso contrario será infinito. Dentro de estos últimos, deben distinguirse los de cardinal numerable, que eran aquellos cuyos elementos se pueden poner en relación 1:1 con los números enteros (por ejemplo, el conjunto de números pares); por otra parte se encuentran conjuntos de cardinal no numerable, como, por ejemplo, el conjunto de números reales comprendidos entre dos números a y b .

La relación de inclusión se deriva de la relación de pertenencia; un conjunto B se dice que está incluido dentro de un conjunto A cuando todos los elementos de B están en A . Si tal es el caso, se puede expresar de forma abreviada como $B \subset A$, o bien $A \supset B$. Si se verifica que $B \subset A$ y que $A \subset B$ de forma simultánea, entonces es que los dos conjuntos son iguales.

Se dice que dos conjuntos son *disjuntos* si no tienen ningún elemento en común. A estos conjuntos se les denomina también mutuamente excluyentes.

Dado un problema, el conjunto universal, denotado por S^2 , será el conjunto formado por todos los elementos del problema. De forma complementaria, el conjunto vacío, denotado por \emptyset , será un conjunto sin ningún elemento. Como es natural, los conjuntos S y \emptyset son mutuamente excluyentes.

En teoría clásica de conjuntos, cualquier elemento x perteneciente a S pertenece o no pertenece al subconjunto A de manera clara e inequívoca. Sin que exista ninguna otra posibilidad al margen de estas dos.

El concepto de pertenencia o no de un elemento a un conjunto A puede expresarse numéricamente mediante una función característica. Esta función asigna a cada elemento x del universo de discurso un dígito binario (1 o 0) según x pertenezca o no al conjunto A .

$$\varphi_A: S \rightarrow 0,1 \quad \varphi_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Cualquier conjunto $A \subset S$ se puede definir por los pares que forman cada elemento x del universo y su función característica, expresándose de la siguiente forma:

$$A = \{(x, \varphi_A(x)) | x \in S\}$$

Por ejemplo, el conjunto $A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ se puede representar por su función característica:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\} \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Dados dos conjuntos cualesquiera A y B incluidos en S es posible definir un conjunto de operaciones básicas entre ellos:

- ✓ Complemento: el complemento de A se denota por A^c , y está formado por todos los elementos de S que no pertenecen a A (operador unitario).

$$x \in A \text{ si } x \notin A$$

- ✓ Intersección: se denota $A \cap B$ y se define como el conjunto formado por aquellos elementos de S que pertenecen a A y a B simultáneamente.

$$x \in A \cap B \text{ si } x \in A \text{ y } x \in B$$

- ✓ Unión: es el conjunto formado por aquellos elementos que pertenecen a A , o pertenecen a B , o bien a ambos simultáneamente. Se denota por $A \cup B$.

Las operaciones entre dos conjuntos clásicos presentan ciertas leyes y propiedades, algunas de ellas son:

- ✓ Propiedad conmutativa

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = A \cap B$$

- ✓ Propiedad asociativa

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$$

- ✓ Ley de idempotencia

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

- ✓ Ley de absorción

$$A \cup (A \cap B) = A$$

$$A \cap (A \cup B) = A$$

- ✓ Propiedad distributiva

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap B \cup C = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

- ✓ Propiedades de absorción por S y \emptyset

$$A \cup S = S$$

$$A \cup \emptyset = A$$

- ✓ Propiedades de identidad

$$A \cup \emptyset = A$$

$$A \cap S = A$$

3.2.2. Extensión a Conjuntos difusos.

Los conjuntos difusos se definen mediante un predicado que da lugar a una clara bipartición del universo de discurso S . sin embargo, el razonamiento humano utiliza frecuentemente predicados de los cuales no resulta esa bipartición; son los denominados *predicados vagos*.

La manera más apropiada de dar solución a este problema es considerar que la pertenencia o no pertenencia de un elemento x al conjunto A no es absoluta sino gradual.

Los conjuntos difusos se pueden definir a través de una serie de postulados:

- ✓ Conjunto vacío: se dice que un conjunto difuso A está vacío, y se escribe $A = \emptyset$, si y sólo si

$$\mu_A(x) = 0, \quad \forall x \in U$$

- ✓ Igualdad: se dice que dos conjuntos difusos A y B definidos sobre el mismo universo de discurso U son iguales, y se escribe $A = B$ si y sólo si

$$\mu_A x = \mu_B x, \quad \forall x \in U$$

- ✓ Contención: se dice que un conjunto borroso A definido en U está contenido en B en U (o alternativamente, es un subconjunto de B), y se escribe $A \subseteq B$ si y sólo si

$$\mu_A x \leq \mu_B x, \quad \forall x \in U$$

- ✓ Normalidad: se dice que un conjunto difuso A definido en U es normal si y solo si

$$\max_{x \in U} \mu_A x = 1$$

- ✓ Soporte: el soporte de un conjunto difusos A en U (escrito $\text{supp}A$ o bien S_A) es el conjunto no borroso

$$S_A = \{x \in U : \mu_A x > 0\}$$

- ✓ Partición completa: se dice que los conjuntos difusos A_1, A_2, \dots, A_N son una partición completa de U si $\forall x \in U$ existe al menos un A_i ($1 \leq i \leq N$) tal que $A_i(x) > 0$. Por simplicidad, se dice que los conjuntos A_1, A_2, \dots, A_N son completos si forman una partición completa.
- ✓ Consistencia: se dice que los conjuntos difusos A_1, A_2, \dots, A_N son consistentes si se verifica que si $A_i(x_0) = 1$ para algún $x_0 \in U$, entonces $\forall j \neq i, A_j(x_0) = 0$.
- ✓ Subconjunto normal: se define el subconjunto normal de un conjunto difuso normal A como

$$M(A) = \max_{x \in U} \mu_A(x)$$

- ✓ Orden entre conjuntos difusos normales: para dos conjuntos difusos normales A y B U, se dice que A > B si $M(A) > M(B)$, definiéndose esta desigualdad como

$$\max_x \mu_A(x) > \max_x \mu_B(x)$$

3.2.2.1 Funciones de pertenencia. La función característica es reemplazada por una función de pertenencia, que se define:

$$\mu_A: S \rightarrow [0,1]$$

De tal modo que $\mu_A(x) \in [0,1]$ es el grado con el que un elemento $x \in S$ (siendo S el universo de discurso) pertenece al conjunto difuso A. cuando $\mu_A(x) = 0$ el elemento no pertenece al conjunto, y cuando $\mu_A(x) = 1$ pertenece totalmente.

La forma de la función de pertenencia tiene una cierta componente subjetiva, frente a la forma rígida (objetiva) de las funciones características de la lógica clásica. En función de la aplicación de los conjuntos o de los conceptos representados por ellos, estas funciones pueden adquirir muy diversas formas, y muchas veces pueden ser elegidas con un amplio grado de libertad por parte del “diseñador”, lo que en la práctica puede traducirse como la posibilidad de incluir cierto conocimiento experto.

A pesar de que las funciones podrían tener cualquier forma, en la literatura se tiende a trabajar con funciones de pertenencia estándares:

✓ Funciones triangulares y trapezoidales. Se definen en función de los vértices de dichas funciones; $\Delta(a,b,c)$ para las triangulares y $T(a, b, c,d)$ para las trapezoidales. Son muy sencillas de manejar en algoritmos numéricos.

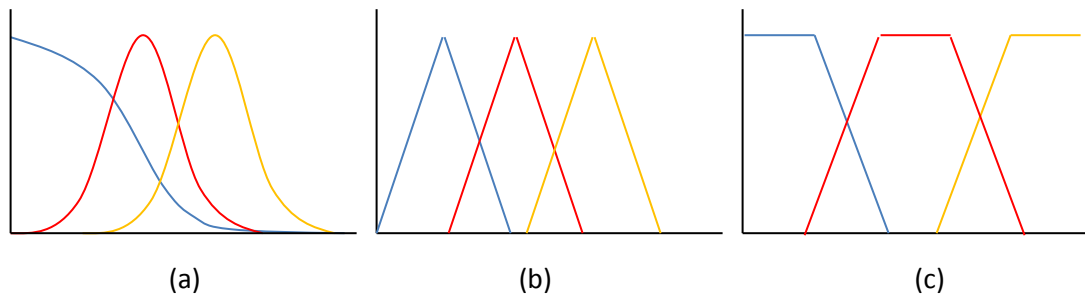
✓ Funciones Gaussianas. Está definida por la siguiente ecuación (donde a, b, c y d son constantes):

$$\mu x = a + b \exp -\frac{1}{2} \frac{x - c}{d}^2$$

✓ Funciones Sigmoidales:

$$\mu x = a + \frac{b}{1 + \exp(-\frac{x - c}{d})}$$

Figura 11 - Funciones de pertenencia típicas.



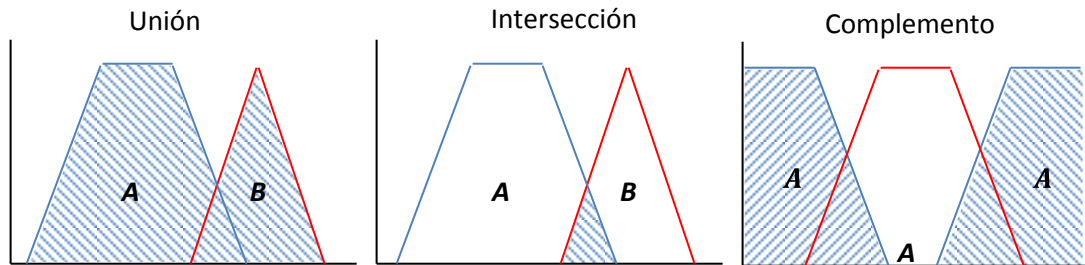
Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.
a) Gaussiana y Sigmoidal, b) triangulares, c) trapezoidales.

3.2.2.2. Operaciones con conjuntos difusos. Las tres operaciones básicas definidas sobre los conjuntos clásicos (complemento, intersección y unión) pueden ser generalizadas a los conjuntos difusos de diversas formas.

Dentro de la teoría de conjuntos difusos tiene especial relevancia la que hace uso de operaciones conocidas como operaciones estándar, definidas como:

- ✓ Intersección $\mu_{A \cap B} x = \min(\mu_A x, \mu_B x)$
- ✓ Unión $\mu_{A \cup B} x = \max(\mu_A x, \mu_B x)$
- ✓ Complemento $\mu_{\bar{A}} x = 1 - \mu_A x$

Figura 12 - Operaciones básicas entre conjuntos.



Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.

No obstante, al contrario que pasa con los conjuntos clásicos, esta no es la única forma posible de definir estas operaciones; diferentes funciones pueden ser apropiadas para representarlas en diferentes contextos. Por lo tanto, no solo las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos van a ser dependientes del contexto sino también las operaciones sobre dichos conjuntos.

Complemento. Dado un conjunto difuso $A \subset U$, se define su complemento como el conjunto difuso \bar{A} cuya función de pertenencia viene dada por la expresión:

$$\mu_{\bar{A}} x = 1 - \mu_A x, \quad \forall x \in U$$

Donde $C(x)$ es una función que debe cumplir las siguientes propiedades:

- ✓ Condiciones de contorno: $C(0) = 1, C(1) = 0$
- ✓ Monotonía: $\forall a, b \in [0,1],$ si $a \leq b,$ entonces $C(a) \geq C(b)$

La función $C(x)$ es conocida comúnmente como *C-norma*.

Intersección. Dados dos conjuntos difusos A y B , definidos sobre un mismo universo de discurso U , se define su intersección como un conjunto difuso $A \cap B$ cuya función de pertenencia viene dada por la expresión:

$$\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in U$$

Donde $T(x,y)$ es una norma triangular o *t-norma*.

Unión. Dados dos conjuntos difusos A y B definidos sobre el mismo universo de discurso U , se define su unión como un conjunto difuso $A \cup B$ cuya función de pertenencia viene dada por la expresión:

$$\mu_{A \cup B}(x) = S(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in U$$

Donde la función $S(x,y)$ es una conorma triangular, también llamada *t-conorma* o *s-norma*

3.2.2.3 Propiedades de los conjuntos difusos. Las leyes y propiedades que cumplen los conjuntos clásicos no siempre se cumplen en el caso de conjuntos difusos. A continuación se analizan que leyes verifican los conjuntos difusos y cuales no:

- ✓ Propiedad conmutativa: siempre se verifica, debido a que las t-normas y las t-conormas son conmutativas por definición.
- ✓ Propiedad asociativa: también se verifica pues que las t-normas y las t-conormas también son asociativas.
- ✓ Leyes de idempotencia: se cumplen si se elige el mínimo y el máximo como operadores para la intersección y la unión respectivamente. Pero si se escoge el producto algebraico y la suma algebraica no se cumplen.
- ✓ Leyes de absorción: también se cumplen si se elige el par máximo-mínimo. Con otras normas no ocurre necesariamente lo mismo.
- ✓ Propiedad distributiva: también se cumple para el mínimo y máximo, pero no necesariamente para otras normas.
- ✓ Propiedades de absorción e identidad: siempre se cumplen debido a la última propiedad de las t-normas y t-conormas.

3.3 LOGICA DIFUSA²⁷

La teoría de conjuntos difusos puede utilizarse para representar expresiones lingüísticas de las que se hace uso para describir conjuntos o algoritmos. Los conjuntos difusos son capaces de captar por si mismos la vaguedad lingüística de palabras y frases comúnmente aceptadas. La habilidad humana de comunicarse mediante definiciones vagas o inciertas es un atributo importante de la inteligencia.

Una variable lingüística es una variable cuyos valores son palabras o sentencias que se enmarcan en un lenguaje predeterminado. Cada una de estas palabras o

²⁷ KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.

términos se conoce como etiqueta lingüística y se representa mediante un conjunto difuso definido sobre el universo de discurso de la variable. Por ejemplo, la temperatura del cuerpo humano puede catalogarse como 'baja', 'normal', 'alta' o 'muy alta'. Cada uno de estos términos es una etiqueta lingüística que puede definirse como un conjunto difuso.

3.3.1 Sistemas de lógica difusa

Un sistema de lógica difusa es la aplicación de la inferencia difusa a la automatización de procesos. En la literatura especializada se distinguen tres clases de sistemas basados en reglas difusas (SBRD), de acuerdo con la forma de las reglas y del tipo de entradas y salidas:

- ✓ **Sistemas puros:** estos sistemas tienen como entrada y como salida conjuntos difusos. Al no realizar ninguna transformación sobre las entradas o sobre las salidas, tienen solo dos componentes principales: una base de conocimiento y un motor de inferencias.

Las reglas lingüísticas empleadas son de la forma

Si X_1 es A_1 y ... X_n es A_n ENTONCES Y es B

Donde X_i e Y son variables lingüísticas, y los A_i y B son etiquetas lingüísticas asociadas a conjuntos difusos.

- ✓ **Sistemas tipo Mamdani:** está compuesto por una base de conocimiento, un motor de inferencias e interfaces de borrosificación y desborrosificación.

Las reglas que manejan esta clase de sistemas son de la forma

Si X_1 es A_1 y ... X_n es A_n ENTONCES Y es B

Donde las entradas X_i y la salida Y son ahora números (no difusos), en lugar e términos lingüísticos (como en el caso anterior), y por lo tanto, los A_i y B son conjuntos difusos sin interpretación directa, en lugar de etiquetas lingüísticas.

- ✓ **Sistemas tipo Takagi-Sugeno-Kang:** en lugar de trabajar con reglas lingüísticas, se basa en reglas donde el antecedente está compuesto de variables lingüísticas y el consecuente se representa como una función de las variables de entrada. La forma más habitual de esta clase de reglas es la siguiente:

Si X_1 es A_1 y ... X_n es A_n ENTONCES $Y = p_1 \cdot X_1 + \dots p_n \cdot X_n$

Siendo X_i las variables de entrada, Y la variable de salida y p_i parámetros de análisis. Esta clase de reglas se conocen como reglas TSK.

La salida de un sistema TSK que usa una base de conocimiento de m reglas o funciones de pertenencia se obtiene como la media ponderada de las salidas individuales proporcionadas por cada regla o función, Y_i , ($i=1, \dots, m$). así:

$$\frac{\sum_{i=1}^m h_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^m h_i}$$

Siendo h_i el grado de emparejamiento entre la parte antecedente de la regla i .

3.3.2 Elementos de un sistema de lógica difusa.

En general un sistema de lógica difusa contiene cuatro componentes fundamentales:

- Interface de difusificación. Realiza un escalado de los valores de las entradas para adecuarlos a los valores típicos para los que se define el sistema, y una difusificación que convierte los datos de entrada en valores lingüísticos adecuados para la manipulación de estos como entidades difusas.
- Base de conocimiento. Formada por una base de datos, que recoge la definición de las funciones de pertenencia de las estradas y el sistema, y una base de reglas, que caracteriza y resume la política y objetivos del control de un experto por medio de un conjunto de reglas lingüísticas de control.
- Motor de inferencias. Representa el núcleo del sistema de logia difusa, agrupa toda la lógica de inferencia difusa del sistema, de barrido de reglas, elección refinada de reglas a usar, etc.
- Interface de desdifusificación. Convierte la acción difusa actualmente inferida en una acción concreta susceptible de aplicación sobre el proceso, realiza un escalado para adecuar los rangos de salida para los que se ha definido el sistema con las entradas del proceso.

4. DESARROLLO DEL FUZZY LOGIC EOR SCREENING EXPERT

Como se analizó en el capítulo anterior, en este trabajo se propone el desarrollo de un sistema experto a partir de un proceso similar al método científico. A continuación se trata punto por punto como fue diseñado y desarrollado el Fuzzy Logic EOR Screening Expert.

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el recobro mejorado de petróleo hay presentes gran cantidad de fenómenos y variables; esto hace que la selección del método correcto requiera la experiencia y conocimiento de un grupo de profesionales altamente calificados.

Cada técnica específica, a pesar de tener objetivos similares, es completamente diferente de las demás opciones, y día a día se actualizan sus criterios de aplicabilidad. De ahí que sea complicado establecer una metodología definitiva para la selección de estas. La propuesta de este proyecto es una metodología novedosa para este propósito, usando una técnica alternativa de selección que emplea criterios estadísticos.

4.2 RECOPIACION DEL CONOCIMIENTO

En el capítulo dos del presente proyecto se trató la recopilación de datos necesarios para aplicar en la selección de los diferentes métodos de recobro. Estos rangos de aplicabilidad constituirán el fundamento para construir la base de conocimiento del sistema experto.

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA EXPERTO

El componente más importante del Fuzzy Logic EOR Screening Expert es su base de conocimiento. Este sistema consiste en una interfaz con el usuario, destinada a recolectar los datos necesarios para el análisis; dado que dicho análisis se hace directamente en base a la información del yacimiento y del fluido, no es necesario implementar una interfaz de difusificación y una interfaz con el usuario para un fácil análisis de los resultados.

La base de conocimiento del sistema experto consiste de una serie de funciones de pertenencia construidas a partir de los datos de selección mencionados en el capítulo dos del presente proyecto.

4.3.1 Construcción de la base de conocimiento. Las funciones de pertenencia usadas son sigmoideas y gaussianas en su mayoría; el proceso

es bastante sencillo y como se mencionó en el capítulo tres, depende en gran medida de la interpretación del diseñador.

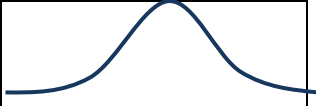
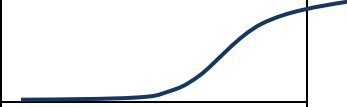
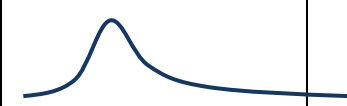
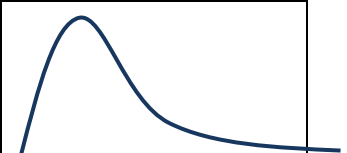
El Fuzzy Logic EOR Screening Expert analiza 16 técnicas (mencionadas en el capítulo 1 del presente proyecto) teniendo en cuenta 7 propiedades:

- ✓ Gravedad API
- ✓ Porosidad
- ✓ Permeabilidad
- ✓ Saturación de aceite
- ✓ Profundidad
- ✓ Temperatura
- ✓ Viscosidad

Para construir cada función de pertenencia es necesario contar con el rango de aplicación de cada propiedad, la media y un par de puntos intermedios. Los valores extremos de cada rango tendrán valor de pertenencia igual a cero, la media de uno y los valores intermedios serán determinados por el diseñador. Este proceso es prueba y error, los valores intermedios se varían hasta lograr que la curva se ajuste. Esto se puede llevar a cabo usando un software estadístico que sea capaz de ajustar curvas de probabilidad. En la gráfica 13 se puede apreciar el diagrama de flujo del proceso de construcción de cada función de pertenencia.

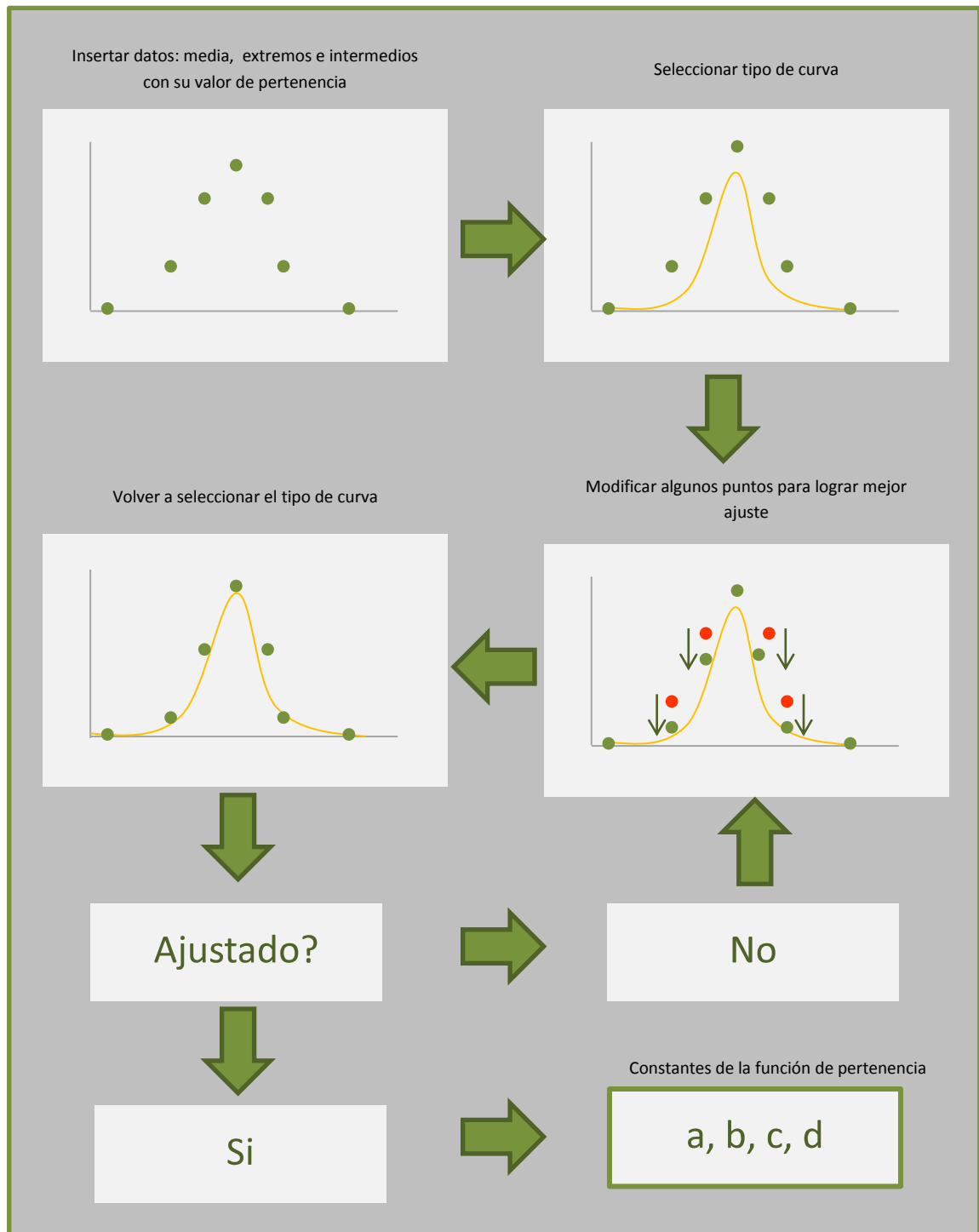
El software estadístico proporcionará las constantes (a,b,c,d) para las funciones de pertenencia, este programa cumple el objetivo de generar un ajuste basándose en los datos de entrada que se han suministrado previamente. Las funciones usadas fueron las siguientes (véase anexo A):

Tabla 8 – Tipos de funciones de pertenencia usadas en el Fuzzy Logic EOR Screening Expert.

Tipo de función	Función de pertenencia	Forma Característica
Gaussiana	$\mu(x) = a + b \exp -\frac{1}{2} \frac{x - c}{d}^2$	
Sigmoidal	$\mu(x) = a + \frac{b}{1 + \exp -\frac{x-c}{d}}$	
Valor extremo	$\mu(x) = a \exp -\exp -\frac{x-b}{c} - \frac{x-b}{c} + 1$	
Log normal	$\mu(x) = a + b \exp -\frac{1}{2} \frac{\ln \frac{x}{c}}{d}^2$	

En total se crearon 105 funciones; cada técnica tendrá una función por cada propiedad.

Figura 13 – Diagrama de flujo para la construcción de funciones de pertenencia usadas en el Fuzzy Logic EOR Screening Expert.



4.3.2 Modulo de selección y ranking

Dado que para cada técnica tiene una función de pertenencia para cada propiedad, es necesario crear una rutina que logre establecer valor de pertenencia de cada método de recobro mejorado. Cada propiedad tiene el mismo peso a la hora de determinar el puntaje final para cada método de recobro mejorado; esto se hace de la siguiente forma:

$$Puntaje\ Final_{metodo\ i} : \mu_{API} + \mu_{\mu} + \mu_{\phi} + \mu_{SO} + \mu_k + \mu_D + \mu_T$$

Cada μ_i se obtiene producto de evaluar cada función y tienen valores entre cero y uno. Una vez se han obtenido todos los 16 puntajes finales se organizan de manera descendente usando el método de burbuja y se normalizan dividiendo el puntaje final de cada método por el puntaje final más alto (primera selección).

$$Puntaje\ Final_{metodo\ i} = \frac{Puntaje\ Final_{metodo\ i}}{Puntaje\ Final_{primera\ selección}}$$

Al final del proceso, el método más adecuado tendrá puntaje final de uno y los demás métodos obtendrán calificación entre cero y uno.

A modo de ejemplo, la tabla 6 presenta las propiedades de un campo X con las cuales se hará el análisis paso a paso para dar más claridad a la metodología.

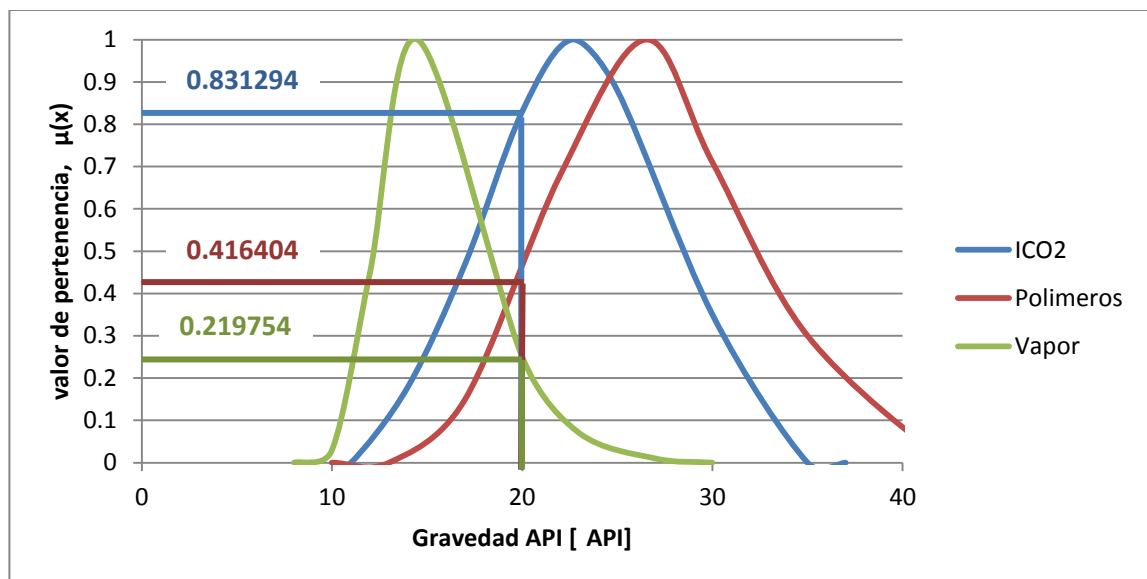
Tabla 9 – Propiedades de un campo X dado como ejemplo.

Gravedad API [°API]	20
Porosidad [%]	15
Permeabilidad [mD]	150
Viscosidad [cP]	10
Saturación de aceite [%VP]	70
Temperatura [°F]	120
Profundidad [ft]	4000

Con el fin de hacer menos dispendioso el ejemplo, solo se analizarán los procesos de Inyección Inmiscible de CO₂, Polímeros y Vapor.

Para los tres métodos, las funciones de pertenencia correspondientes a la gravedad API evaluadas en el dato del ejemplo son las siguientes:

Figura 14 – Forma gráfica de hallar puntajes para Gravedad API.



El sistema experto halla los puntajes de forma analítica, usando una matriz para almacenar todas las constantes de las funciones de pertenencia.

$$\mu_{API\ CO_2} = -2.91E - 2 + 1.029649 \exp -\frac{1}{2} \frac{API - 22.97554}{4.965481}^2$$

$$\mu_{API\ CO_2} = -2.91E - 2 + 1.029649 \exp -\frac{1}{2} \frac{20 - 22.97554}{4.965481}^2 = 0.831294$$

$$\mu_{API\ Polimeros} = 1.95E - 3 + 0.999401 \exp -\frac{1}{2} \frac{API - 30.88131}{2.274669}^2$$

$$\mu_{API\ Polimeros} = 1.95E - 3 + 0.999401 \exp -\frac{1}{2} \frac{20 - 30.88131}{2.274669}^2 = 0.426404$$

$$\mu_{(API)Vapor} = \exp -\exp -\frac{API - 14.40865}{2.30387} - \frac{API - 14.40865}{2.30387} + 1$$

$$\mu_{(API)Vapor} = \exp -\exp -\frac{20 - 14.40865}{2.30387} - \frac{20 - 14.40865}{2.30387} + 1 = 0.219754$$

De igual forma se evalúan las funciones de pertenencia para las demás propiedades, en la siguiente tabla se muestran los resultados de todas las funciones de pertenencia para los tres métodos:

Tabla 10 – Puntajes parciales.

	ICO ₂	Polímeros	Vapor
$\mu_{(API)}$	0.831294	0.426404	0.219754
$\mu_{(porosidad)}$	0.029447	0.173776	1.7E-05
$\mu_{(permeabilidad)}$	0.002153	0.3652	0.000268
$\mu_{(viscosidad)}$	0	0.629516	0.86
$\mu_{(So)}$	0.740842	0.229428	0.001303
$\mu_{(temperatura)}$	0.852579	0.999474	0.2155
$\mu_{(profundidad)}$	0.970865	0.060509	0.971823

Ahora, para hallar el puntaje total, se suman resultados anteriores para cada método.

Puntaje Total _{ICO₂}

$$: \mu_{API\ ICO_2} + \mu_{\mu\ ICO_2} + \mu_{\phi\ ICO_2} + \mu_{(So)} + \mu_{(k)} + \mu_{D\ ICO_2} + \mu_{T\ ICO_2}$$

Puntaje Total _{ICO₂}

$$: 0.831294 + 0.029447 + 0.002153 + 0 + 0.740842 + 0.852579 + 0.970865$$

$$Puntaje\ Total_{ICO_2} : 3.42718$$

$$Puntaje\ Total_{polimero} : 2.884307$$

$$Puntaje\ Total_{vapor} : 2.268665$$

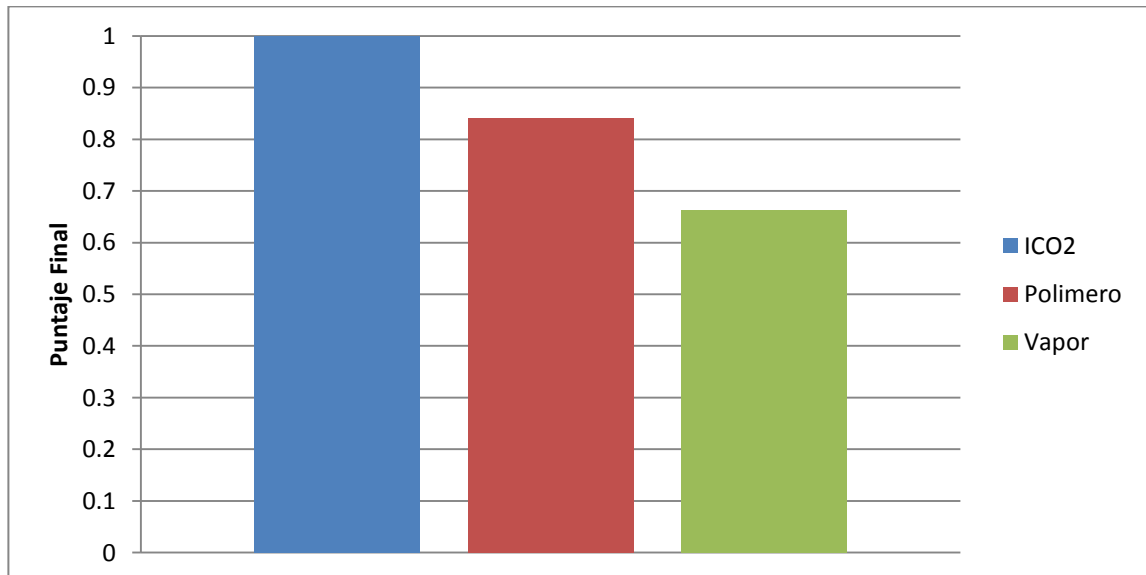
Para terminar, se dividen todos los puntajes totales en el puntaje más alto, en este caso corresponde a inyección inmiscible de CO₂.

Tabla 11 – Puntajes totales y finales.

	Puntaje Total	Puntaje Final
ICO2	3.42718	1
Polímero	2.884307	0.84159781
Vapor	2.268665	0.66201249

Con base en estos resultados, se puede interpretar que la inyección inmiscible de CO₂ sería el método más adecuado para implementar y que inyección de polímeros y vapor tendrían una probabilidad de éxito relativo a I-CO₂ del 84 y 66% respectivamente.

Figura15 – Resultados Finales



4.4 ELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE DESARROLLO

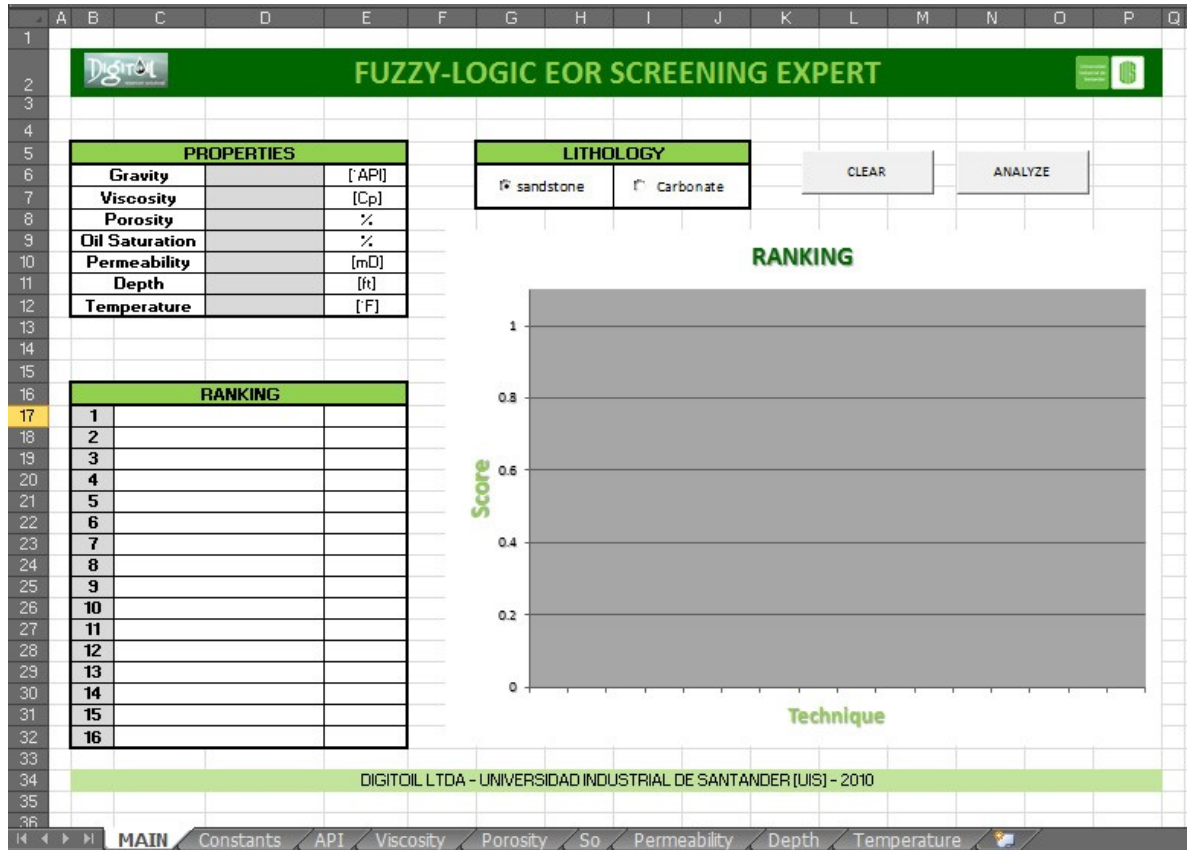
Dada que la programación del sistema es sencilla, el lenguaje de programación no ha de ser tan avanzado. Se decidió usar Visual Basic por su sencillo manejo y capacidad para crear interfaces limpias y comprensibles.

4.5 PRUEBA DE PROTOTIPO Y DESARROLLO PRELIMINAR

Antes de comenzar la construcción del sistema experto en Visual Basic, se construyó un prototipo en Microsoft Excel. Se usaron las mismas funciones de pertenencia y metodología previamente analizada en el presente capítulo.

Con el prototipo se buscaba establecer la funcionalidad de la base de conocimiento así como de la metodología de puntuación y ranking. En el siguiente capítulo se analizará como se probó el sistema, tanto el prototipo como el Fuzzy Logic EOR Screening Expert final.

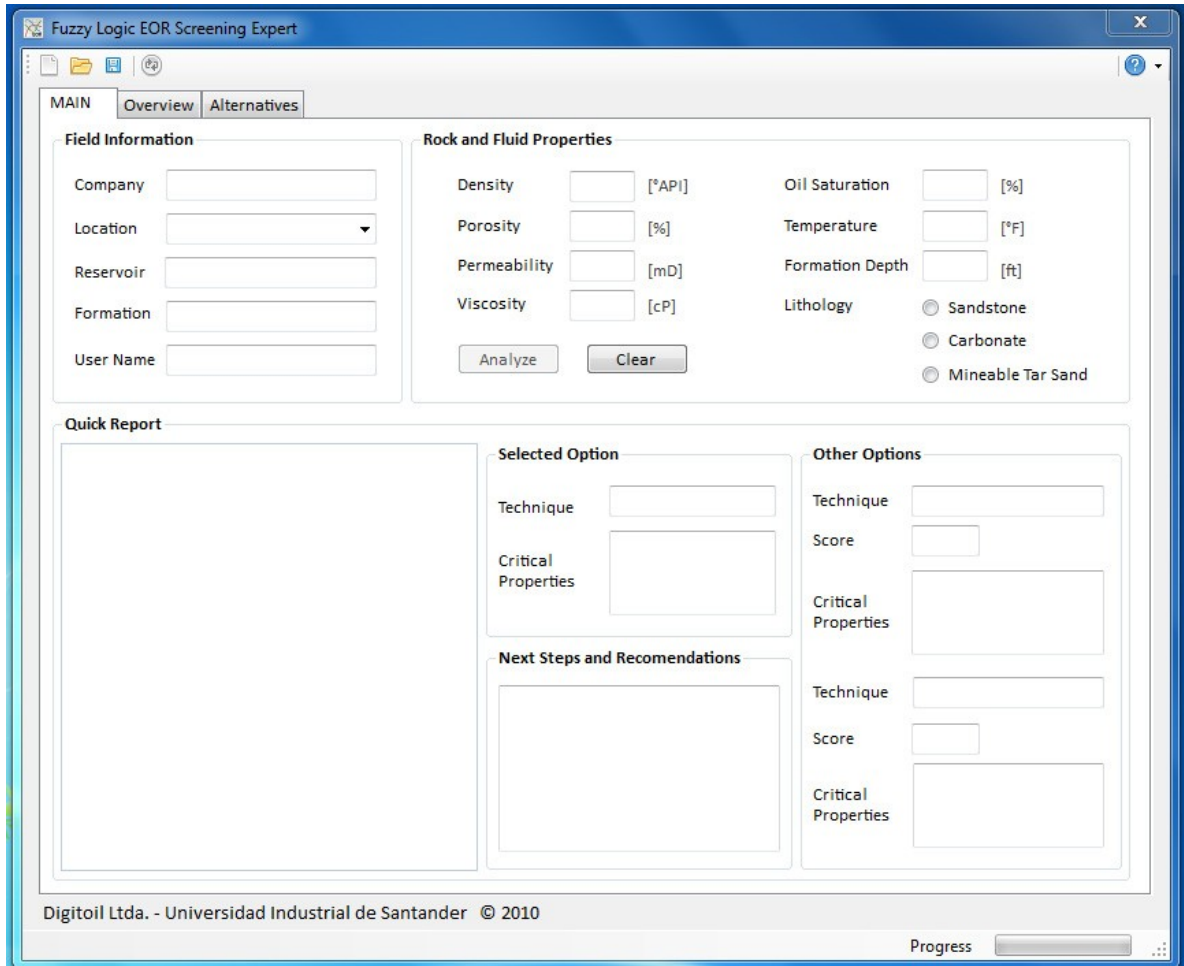
Figura 16 – Prototipo en Excel del sistema experto.



Ya que el prototipo presentó los resultados esperados, se pasó a la construcción del sistema experto final, el objetivo principal es la fácil visualización del análisis y los resultados del sistema. Se busca lograr este objetivo a través de diferentes gráficos y cuadros de texto expícito que ayudan a comprender el motivo de las selecciones hechas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert.

La ventana principal del programa está diseñada con el propósito de poder ingresar de forma eficiente los datos del yacimiento y fluido; además de ser interactiva con el usuario para fácil análisis de los resultados.

Figura 17 – Versión final del Fuzzy Logic EOR Screening Expert.



4.6 MANTENIMIENTO Y PUESTA AL DÍA

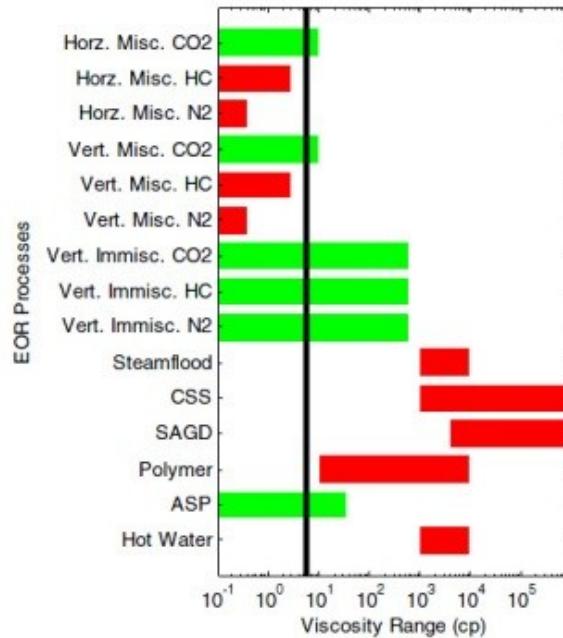
Como se mencionó anteriormente, las técnicas de recobro mejorado se actualizan constantemente; por lo tanto es fundamental continuar alimentando el sistema experto con funciones de pertenencia acordes a las mejoras en las técnicas.

5. VALIDACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

Con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema experto, se usaron los datos y resultados del análisis hecho por L. Dickson y A. Leahy-Dios en el paper SPE 129768. La metodología usada por los autores para la selección de técnicas de recobro mejorado es simple y práctica, aunque, en algunos casos los rangos del screening están incompletos (no hay presentes medias y en algunos casos únicamente presentan una cota), a priori se puede inferir que los resultados variarán.

La metodología para realizar el screening de métodos de recobro mejorado propuesta por L. Dickson y A. Leahy-Dios consiste en un test “pass/fail” el cual utiliza los intervalos de aplicación para cada tecnología para determinar si es o no viable para un yacimiento en específico. La línea negra en la gráfica 18 representa en valor de la propiedad, las barras verdes el rango de cada tecnología para dicha propiedad en el cual se aprueba el test y las barras rojas el rango de las tecnologías que no pasaron el test.

Figura 18 – Ejemplo de la metodología de screening usada por L. Dickson y A. Leahy-Dios.



Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Luego se procede a asignar un puntaje a cada tecnología en base a los resultados del test. Para cada propiedad, las tecnologías que aprueban dicho test reciben puntaje de 1; por otro lado, las que no pasan la prueba, reciben puntaje de -1. Se suman los resultados para cada propiedad y se normalizan para que el puntaje final para cada propiedad este entre -1 y 1.

La validación para esta metodología usada por L. Dickson y A. Leahy-Dios se hizo usando 4 campos “tipo”: Jay (Estados Unidos), Judy Creek (Canadá), Cold Lake (Canadá), Marmul (Omán) y un yacimiento de carbonato del cual no se reporta el nombre. A continuación se presentan los datos y resultados obtenidos por L. Dickson y A. Leahy-Dios comparados con los resultados del sistema experto.

5.1 CAMPO JAY

Este campo ha tenido éxito usando inyección de nitrógeno desde 1981. Los datos de fluido y yacimiento están contenidos en la tabla 12.

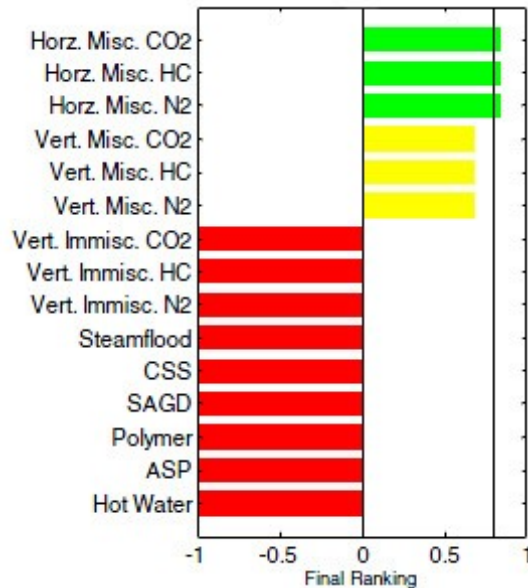
Tabla 12 – Propiedades del campo Jay.

Campo Jay	
Viscosidad [cP]	0.18
Profundidad [ft]	15,400
Permeabilidad [mD]	35.4
Temperatura [F]	285
Saturación de Aceite [%]	87.3
Gravedad API [API]	51

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Según los resultados del análisis hecho por los autores, la inyección de CO₂, Hidrocarburos y, como era de esperarse, Nitrógeno son las tecnologías más opcionadas para este campo (Fig. 19).

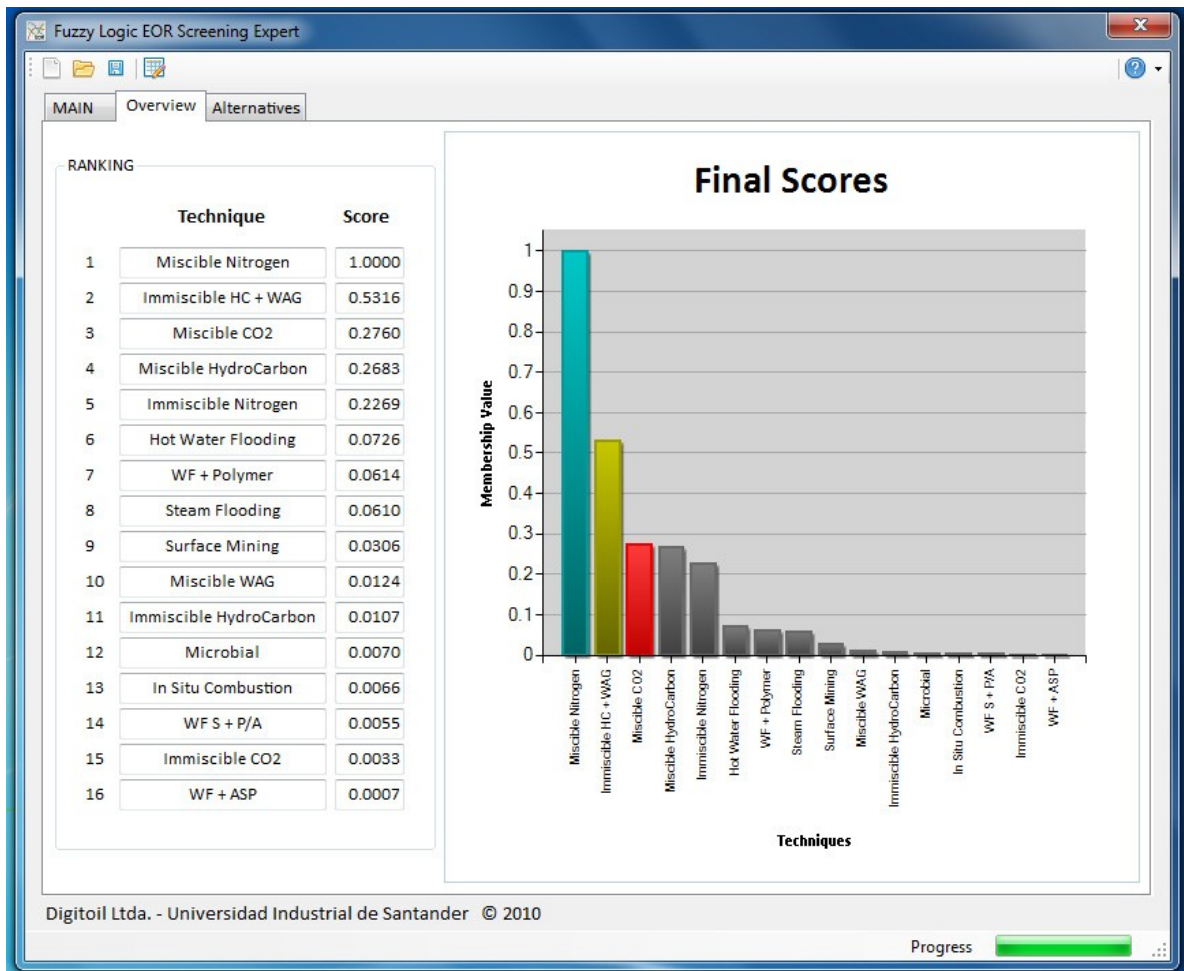
Figura 19 – Resultados del caso comparativo para el campo Jay.



Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

En la figura 20 se puede apreciar que la inyección miscible de Nitrógeno es el método de recobro mejorado más opcionado para este yacimiento, además de inyección miscible de CO₂ y de un proceso de inyección inmisible de Hidrocarburo. La inyección de CO₂, a pesar de ser uno de los métodos seleccionados por el sistema experto, es poco probable que presente buenos resultados ya que su puntaje final es muy bajo (cercano a 0.3). Como se mencionó anteriormente, la implementación de inyección miscible de Nitrógeno como método de recobro ha sido exitosa en este yacimiento. Luego, en este caso, el funcionamiento del Fuzzy Logic EOR Screening Expert es mucho más preciso que la metodología usada por L. Dickson y A. Leahy-Dios

Figura 20 – Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Jay.



5.2. CAMPO JUDY CREEK

Desde 1980 se inyecta en procesos miscibles CO₂ e Hidrocarburo obteniendo buenos resultados. En la siguiente tabla se muestran los datos de este campo.

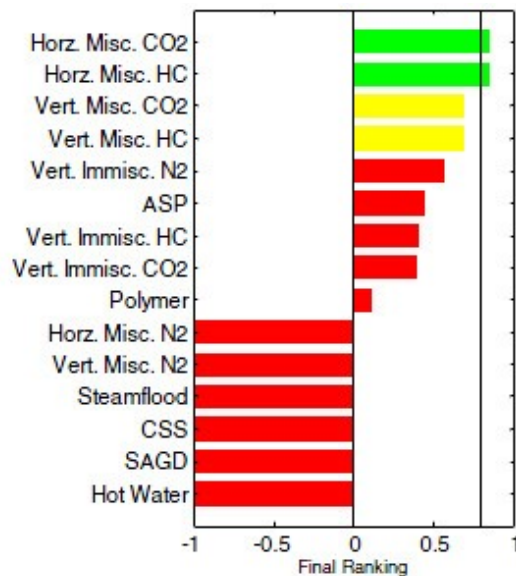
Tabla 13 – Propiedades del campo Judy Creek.

Campo Judy Creek	
Viscosidad [cP]	-
Profundidad [ft]	5,100
Permeabilidad [mD]	45
Temperatura [F]	206
Saturacion de Aceite [%]	84
Gravedad API [API]	41

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Los resultados obtenidos por los autores luego del análisis indican que tanto la inyección de CO₂ como de Hidrocarburo en procesos miscibles es la mejor opción para el recobro mejorado de este yacimiento.

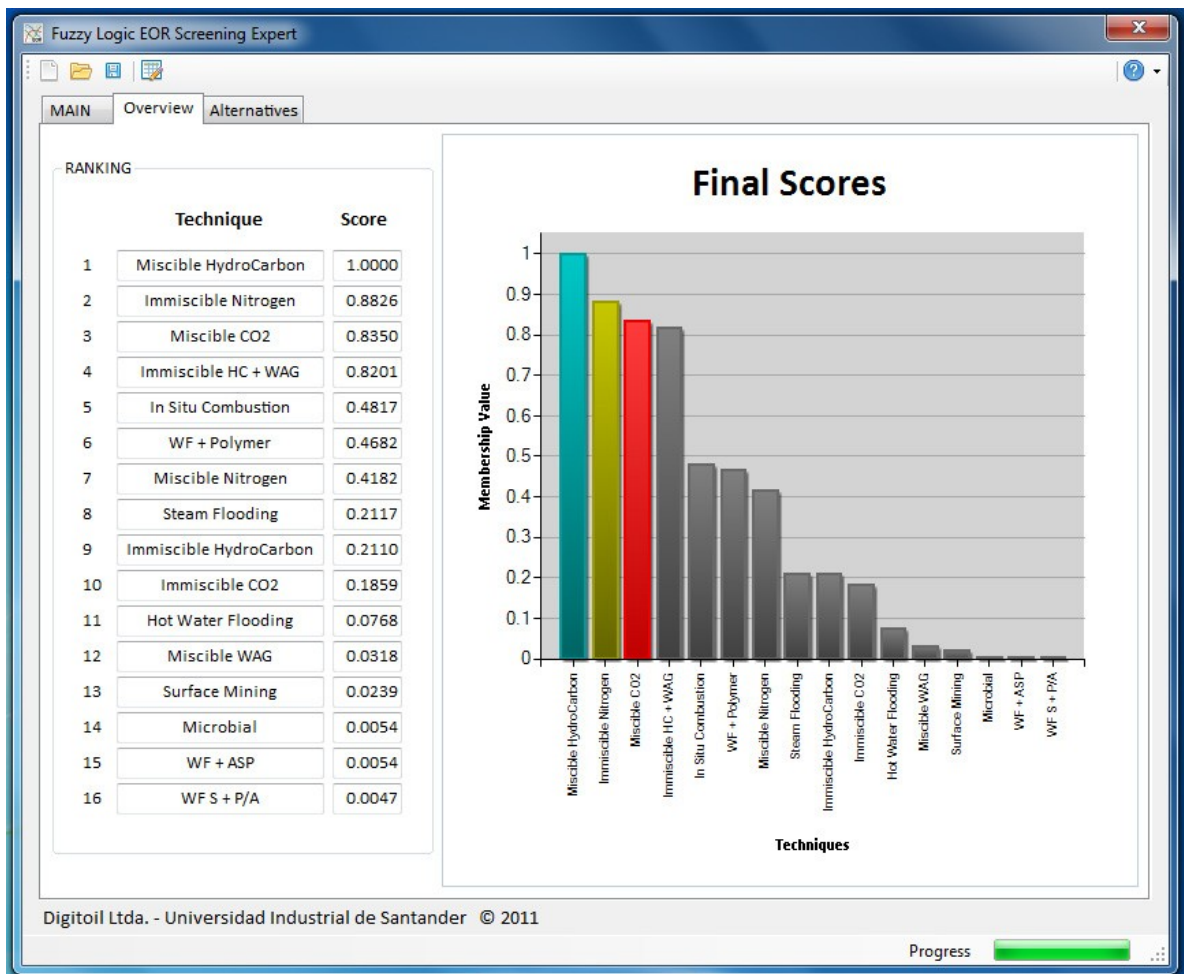
Figura 21 – Resultados del caso comparativo para el campo Judy Creek.



Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Como se muestra en la gráfica 22, el sistema experto seleccionó inyección miscible de Hidrocarburos, inmisible de Nitrógeno y miscible de CO₂. En este campo ya se ha comprobado el éxito de la inyección miscible de CO₂ e Hidrocarburos; el resultado del caso comparativo es bastante similar. Estos resultados comprueban el buen funcionamiento del sistema.

Figura 22 – Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Judy Creek.



5.3. CAMPO COLD LAKE

Este campo es un buen ejemplo del recobro térmico. A este se le han aplicado procesos de inyección de vapor desde 1964.

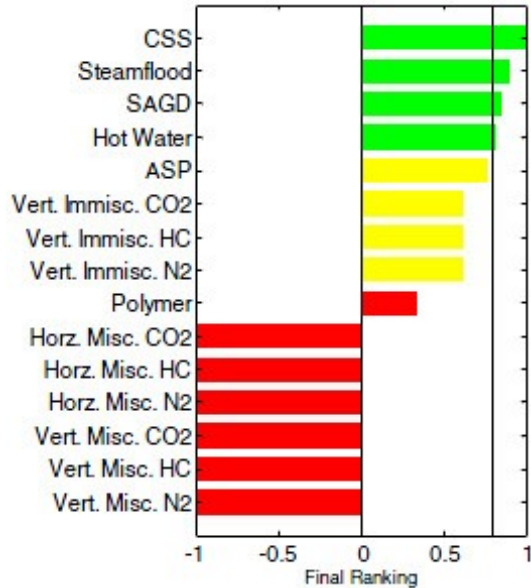
Tabla 14 – Propiedades del campo Cold Lake.

Campo Cold Lake	
Viscosidad [cP]	150,000
Profundidad [ft]	1,000
Permeabilidad [mD]	500 – 5,000
Temperatura [F]	50
Saturacion de Aceite [%]	78
Gravedad API [API]	12

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

Una vez más, la metodología funciona de forma correcta, dando como mejores opciones las técnicas en las cuales se usa vapor (SAGD, CSS e inyección continua de vapor).

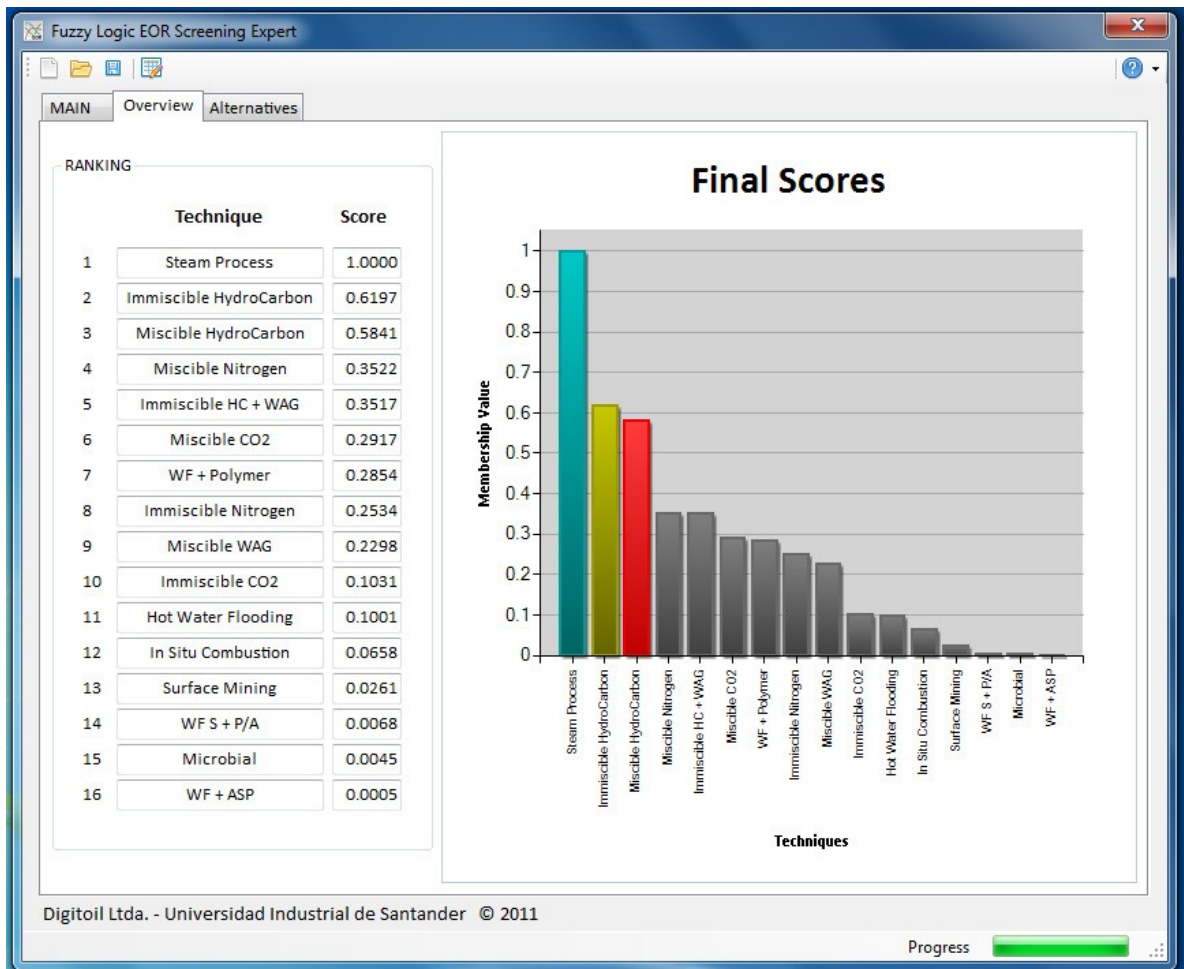
Figura 23 – Resultados del caso comparativo para el campo Cold Lake.



Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

El método de recobro usado históricamente en este yacimiento es el vapor. Desde 1964 se han llevado a cabo procesos de recobro usando vapor y se han obtenido resultados buenos. El análisis hecho en el caso comparativo determina que los métodos de recobro usando vapor son prácticamente la única opción para este campo; de igual modo, el Fuzzy Logic EOR Screening Expert seleccionó los procesos de vapor como el método de recobro aplicable al campo Cold Lake; cabe recordar que procesos como CSS y SAGD están agrupados bajo “procesos de vapor” en el sistema experto.

Figura 24 – Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Cold Lake.



5.4. CAMPO MARMUL

Este, es uno de los campos insignia de la inyección de polímeros en el medio oriente. En la década de los 80's tuvieron éxito algunas pruebas que involucraban el desplazamiento de petróleo empleando polímeros.

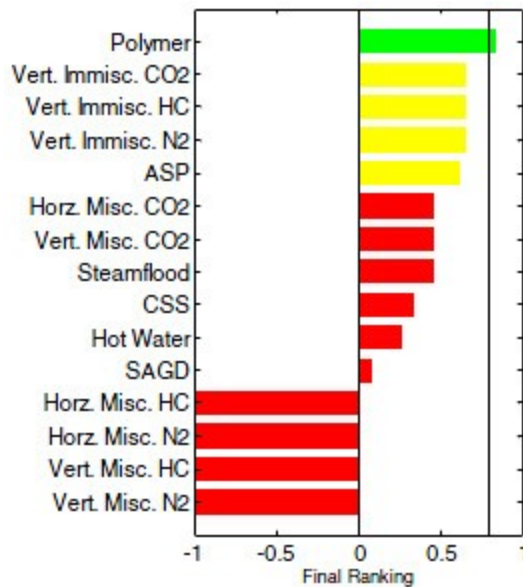
Tabla 15 – Propiedades del campo Marmul.

Campo Marmul	
Viscosidad [cP]	80
Profundidad [ft]	3,150
Permeabilidad [mD]	15
Temperatura [F]	115
Saturacion de Aceite [%]	30
Gravedad API [API]	28

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

El resultado del análisis hecho por L. Dickson y A. Leahy-Dios tiene como resultado la inyección de polímeros como la única opción real para este campo.

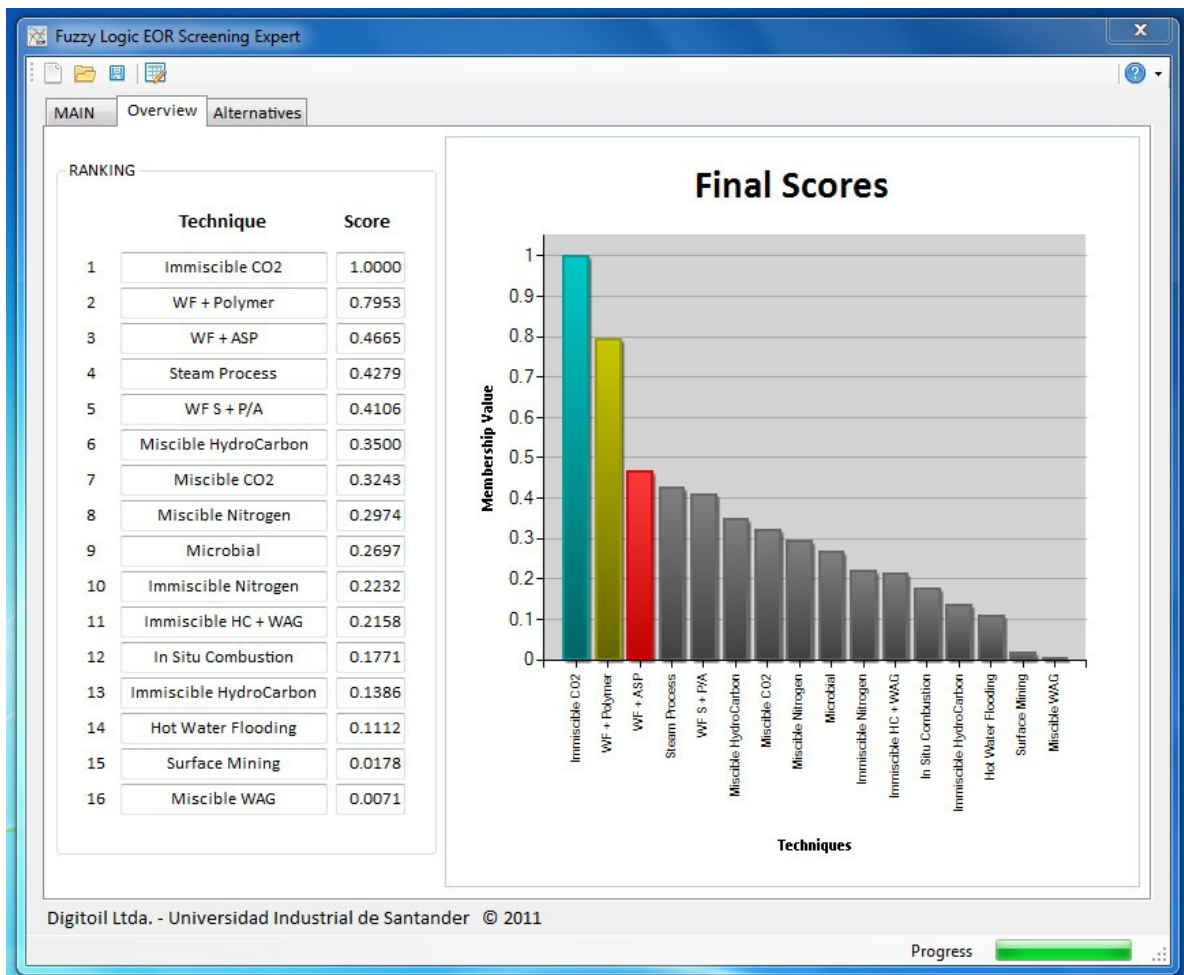
Figura 25 – Resultados del caso comparativo para el campo Marmul.



Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

El sistema experto Fuzzy Logic EOR Screening Expert identificó la inyección inmisible de CO₂ e inyección de Polímeros como las dos mejores opciones para el campo Marmul; El análisis presentado en el caso comparativo señala estos dos métodos también como mejores opciones. Del historial del campo se puede resaltar que la inyección de Polímeros ha sido exitosa; no hay información sobre intentos de inyectar CO₂.

Figura 26 – Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el campo Marmul.



5.5. YACIMIENTO DE CARBONATO

La litología de los cuatro yacimientos previos en el análisis hecho por los autores es arenisca. Con el fin de comprobar el comportamiento de la metodología en yacimientos de carbonato, los autores usaron datos de un campo X; los datos de este campo están resumidos en la siguiente tabla.

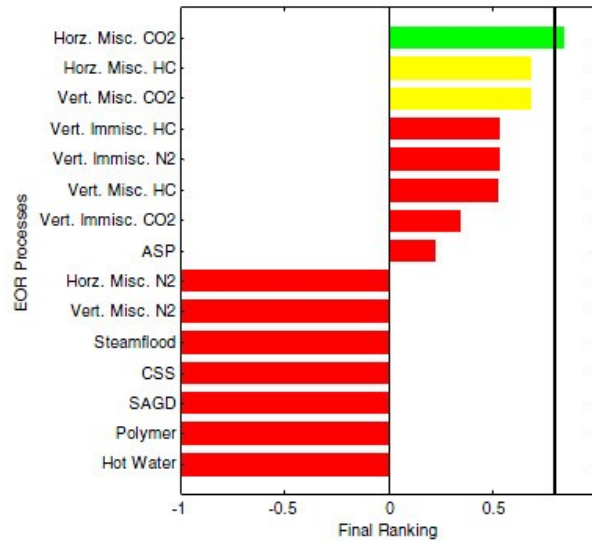
Tabla 16 – Propiedades del yacimiento de carbonato.

Yacimiento de carbonato	
Viscosidad [cP]	
Profundidad [ft]	7,991
Permeabilidad [mD]	31
Temperatura [F]	245
Saturacion de Aceite [%]	88.8
Gravedad API [API]	39.8

Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

La mejor opción para este yacimiento, según la metodología con la cual se compara el Fuzzy Logic EOR Screening Expert, es la inyección miscible de CO₂.

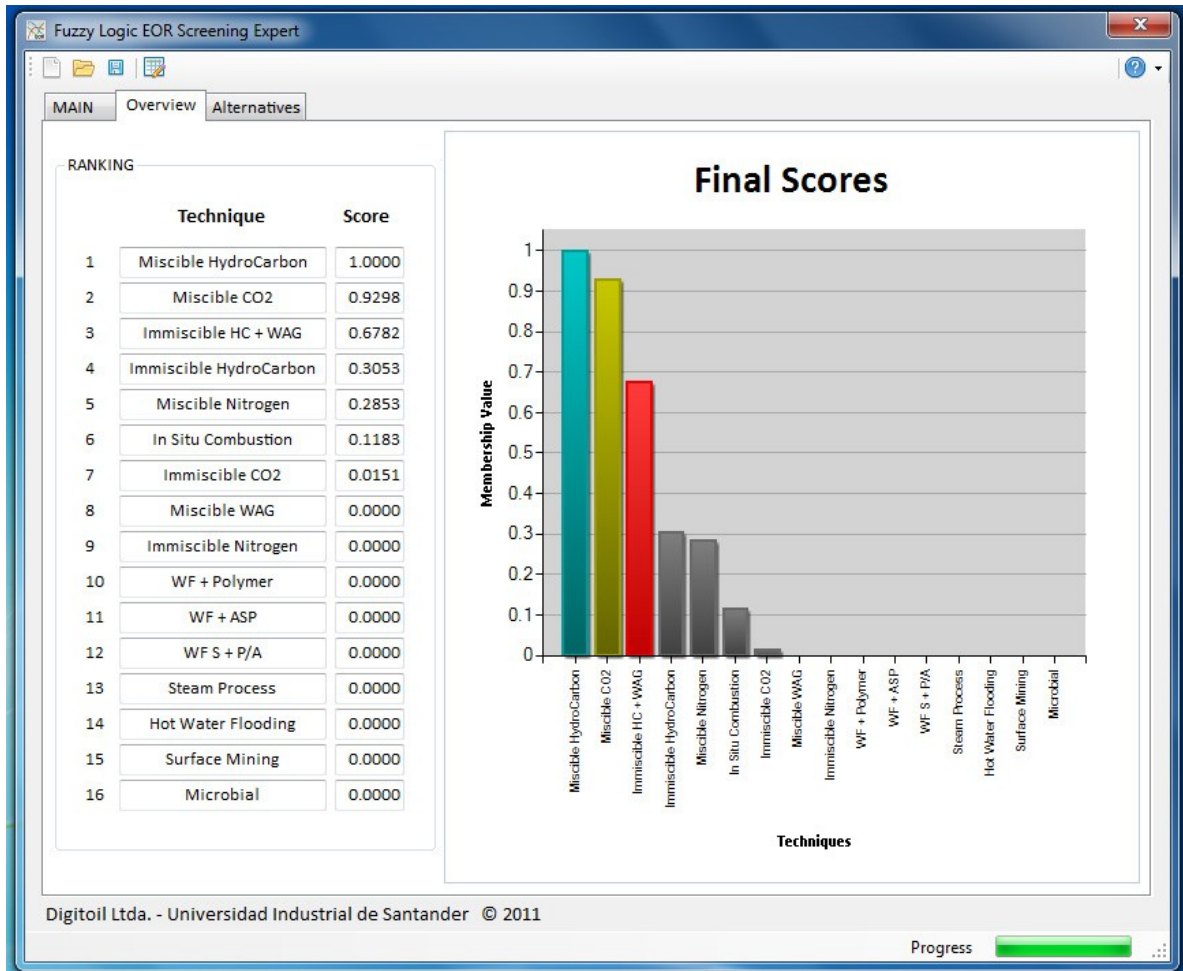
Figura 27 – Resultados del caso comparativo para el yacimiento de carbonato.



Fuente: DICKSON, Jasper Y LEAHY-DIOS, Alana. Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies. SPE 129768, 2010.

En este caso la opción preferida, según el análisis comparativo, es la inyección miscible de CO₂, seguido por inyección miscible de Hidrocarburos. El sistema experto selecciona igualmente estos dos métodos como aplicables a este yacimiento. No se cuenta con historial del campo, luego es complicado determinar el grado de validez de los resultados.

Figura 28 - Resultados obtenidos por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert para el yacimiento de carbonato.



CONCLUSIONES

- Una novedosa metodología para creación y aplicación de funciones de pertenencia ha sido aplicada en el desarrollo del sistema Fuzzy Logic EOR Screening Expert. El cual incorpora un análisis estadístico basado en criterios actualizados para selección de métodos de recobro mejorado.
- El sistema Fuzzy Logic EOR Screening Expert es una herramienta práctica, gráfica e inteligente que se vale de metodologías nuevas de lógica difusa para efectuar una selección de métodos de recobro mejorado.
- Las pruebas realizadas en la validación del sistema prueban el buen funcionamiento del sistema experto, lo cual lo hace una herramienta confiable en la selección de métodos de recobro mejorado.
- Los resultados que se obtienen del Fuzzy Logic EOR Screening Expert son importantes, representan la etapa preliminar en la selección de métodos de recobro mejorado. El sistema se convierte en un soporte acompañado de simulación, pruebas de laboratorio y análisis económico en la determinación del método más adecuado a ejecutar.
- El recobro mejorado de petróleo es un área en la cual se puede llegar a aplicar lógica difusa de forma exitosa. En este caso con el uso de sistemas expertos, dando como resultado una nueva herramienta para la selección de métodos de recobro.

RECOMENDACIONES

- Los resultados del Fuzzy Logic EOR Screening Expert deben ser complementados con simulación numérica, pruebas de laboratorio y análisis económico para confirmar la factibilidad del método de recobro mejorado seleccionado.
- El software desarrollado en este proyecto es confiable y efectivo, aunque, podría ser complementado con módulos de análisis económico, técnico e inclusive con enlace a un simulador numérico como ECLIPSE o CMG con el fin de no solo efectuar un screening si no una selección de métodos de recobro mejorado más avanzada y sustentada.
- Anualmente se llevan a cabo numerosos congresos y sesiones técnicas en los cuales se dan a conocer los adelantos y mejoras en todos los campos de la ingeniería de petróleos; la recuperación mejorada no es la excepción, por lo que se recomienda revisar periódicamente dichos adelantos y actualizar la base de conocimiento del sistema experto con el propósito de mantener al día el programa Fuzzy Logic EOR Screening Expert.

BIBLIOGRAFIA

1. ALASADANI, Ahmad y BAI, Baojun, "Recent developments and updated screening criteria of enhanced recovery techniques", SPE 130726, 2010.
2. CASTILLO, E, GUTIERREZ, J y HADI, A. Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas.
3. DICKSON, Jasper y LEAHY-DIOS, Alana, "Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies". SPE 129768, 2010.
4. Exploration Technologies – EOR Drawings, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy, USA.
5. FAYERS, Jhon. Enhance Oil Recovery.
6. KLIR, George y YUAN, Bo, Fuzzy Logic Sets and Fuzzy Logic.
7. RUSSELL, Jhon. Fundamentals of Enhanced Oil Recovery.
8. SALAGER, J. Recuperación Mejorada de Petróleo. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
9. STEVENS, L. Artificial Intelligence, "The search of the perfect machine".

ANEXO A. BASE DE CONOCIMIENTO DEL FUZZY LOGIC EOR SCREENING EXPERT

A continuación se presentan las funciones de pertenencia que componen la base de conocimiento del sistema experto.

Tabla 1 – Tipos de funciones empleados en la base de conocimiento.

Tipo de función	Función de pertenencia	Código de la función
Gaussiana	$\mu(x) = a + b \exp -\frac{1}{2} \frac{x - c}{d}^2$	1
Sigmoidal	$\mu(x) = a + \frac{b}{1 + \exp -\frac{x - c}{d}}$	2
Valor extremo	$\mu(x) = a \exp -\exp -\frac{x - b}{c} - \frac{x - b}{c} + 1$	3
Log normal	$\mu(x) = a + b \exp -\frac{1}{2} \frac{\ln \frac{x}{c}}{d}^2$	4

A1. FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA METODOS DE INYECCION MISCIBLE

Tabla 2 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección miscible de CO₂.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-0.00027	1.000574	36.97522	3.958613	1
Viscosidad	0.005801	0.994482	2.139403	1.133521	4
Porosidad	1.003057	14.53738	3.273984		3
Saturación de aceite	-0.00229	0.995542	46.57738	9.887505	1
permeabilidad	-0.00039	1.000231	211.9879	1.356972	4
Profundidad	1.0001	6178.536	1703.65		3
Temperatura	1.001528	138.3684	25.91981		3

Tabla 3 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección miscible de hidrocarburos.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-7.92E-05	1.000706	38.4776	5.018745	1
Viscosidad	-7.43E-05	1.000196	181.8063	2.232375	4
Porosidad	0.007574	0.993484	14.92	2.5996	1
Saturación de aceite	-0.00175	1.002682	70.05671	11.04885	1
permeabilidad	1.003182	697.4388	399.4375		3
Profundidad	0.00027	1.001349	8434.753	1475.894	1
Temperatura	-0.00509	1.00647	203.2621	37.92286	1

Tabla 4 – Constantes de las funciones de pertenencia para WAG

	a	b	c	d	Código de la función
API	-2.61E-04	1.000562	35.87643	0.954242	1
Viscosidad	0.017834	0.982202	0.6	0.102645	1
Porosidad	0.006179	0.993818	18.34069	1.170447	1
Saturación de aceite	--	--	--	--	--
permeabilidad	-0.02014	1.02048	1046.412	0.775816	4
Profundidad	-0.07428	1.074775	8195.194	288.0394	1
Temperatura	-0.00082	1.000748	229.3152	0.044704	4

Tabla 5 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección miscible de nitrógeno.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-1.77E-07	1.000589	47.6788	2.2964	1
Viscosidad	4.42E-11	1.000002	0.088378	-0.004	2
Porosidad	0.000384	0.998763	11.04658	1.036034	1
Saturación de aceite	-0.00427	1.004259	78	0.629421	1
permeabilidad	1.00192	14.86006	6.546241		3
Profundidad	-0.03089	1.033339	14582.43	1702.539	1
Temperatura	-0.00822	1.008678	265.0294	19.82458	1

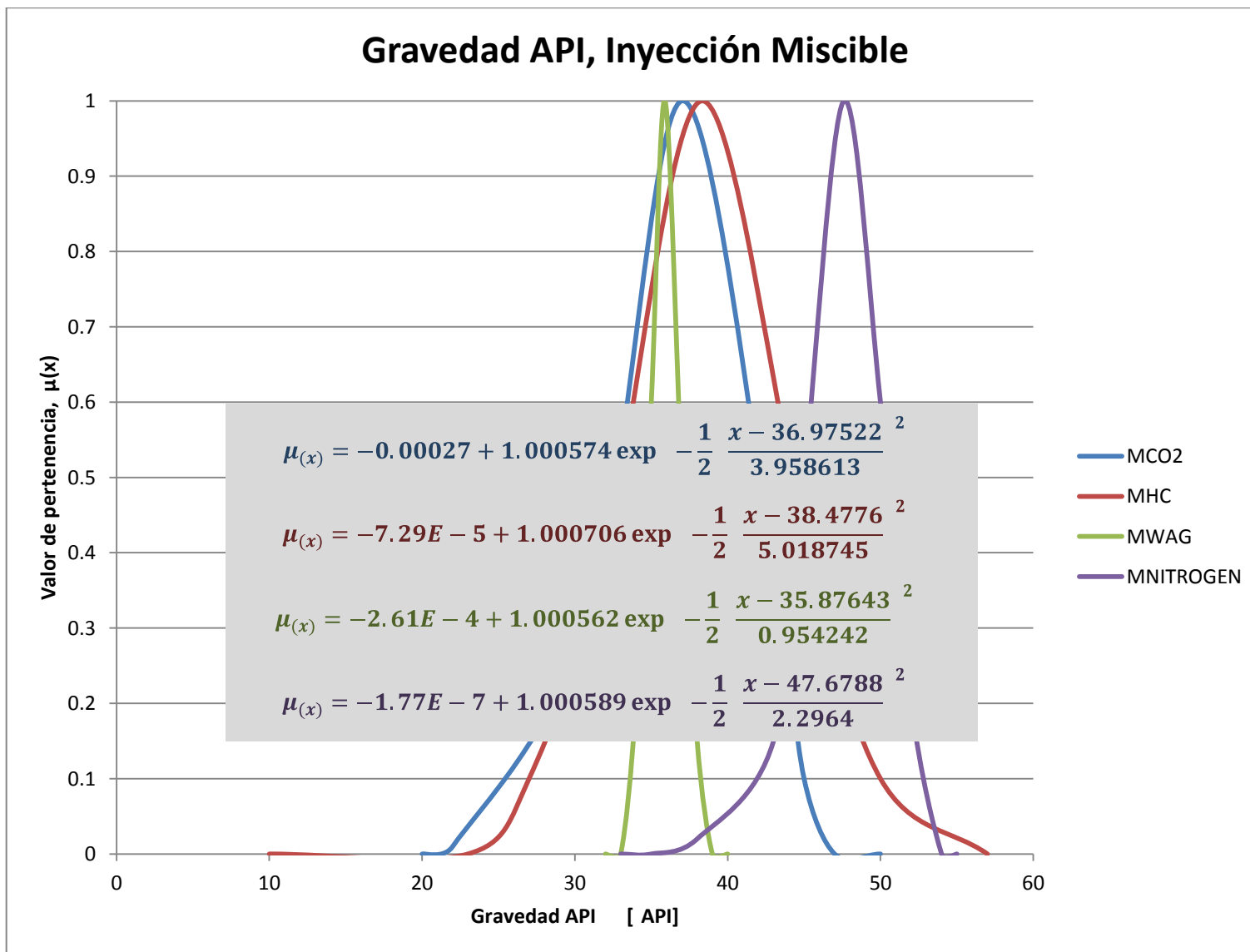


Figura 1. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Gravedad API.

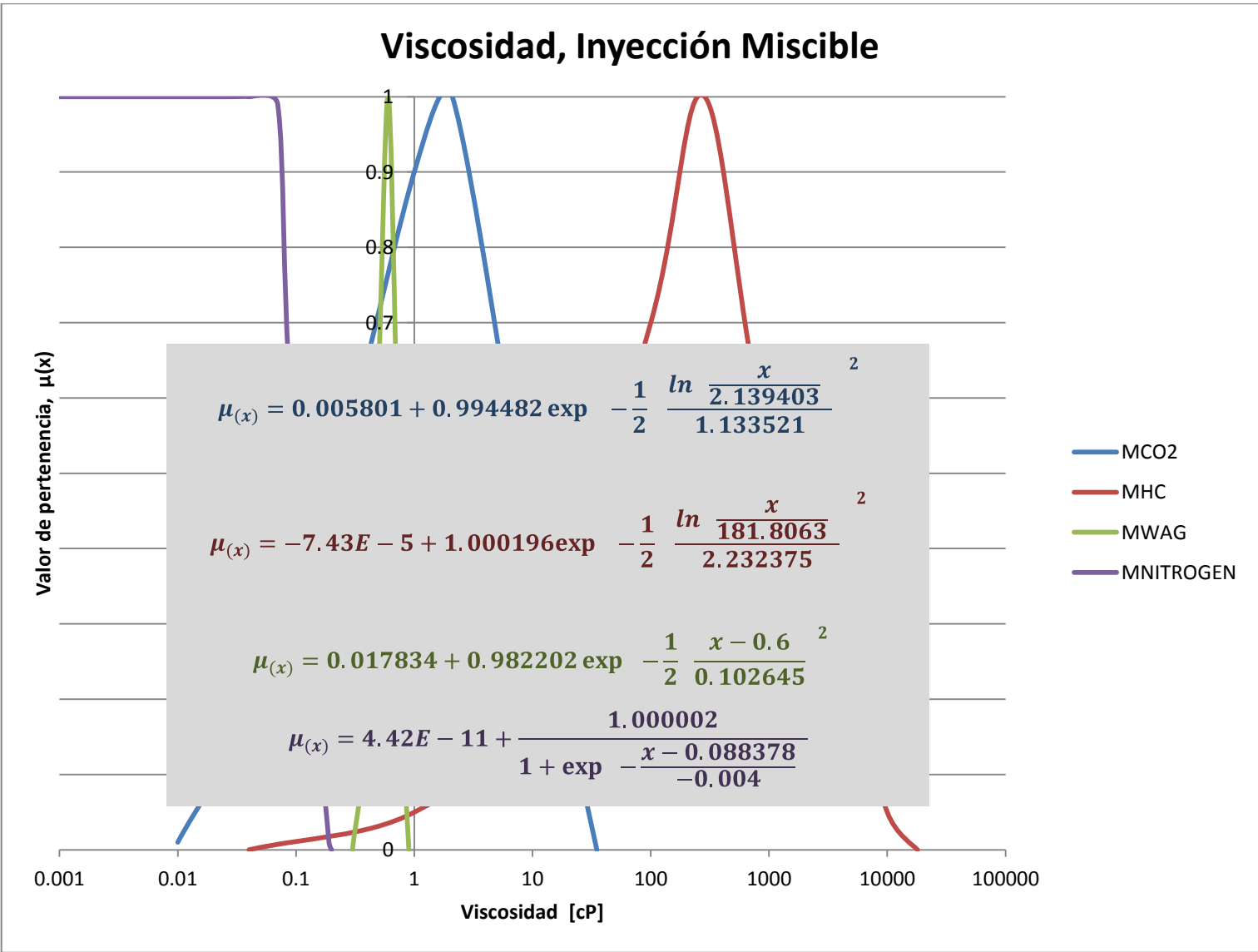


Figura 2. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Viscosidad.

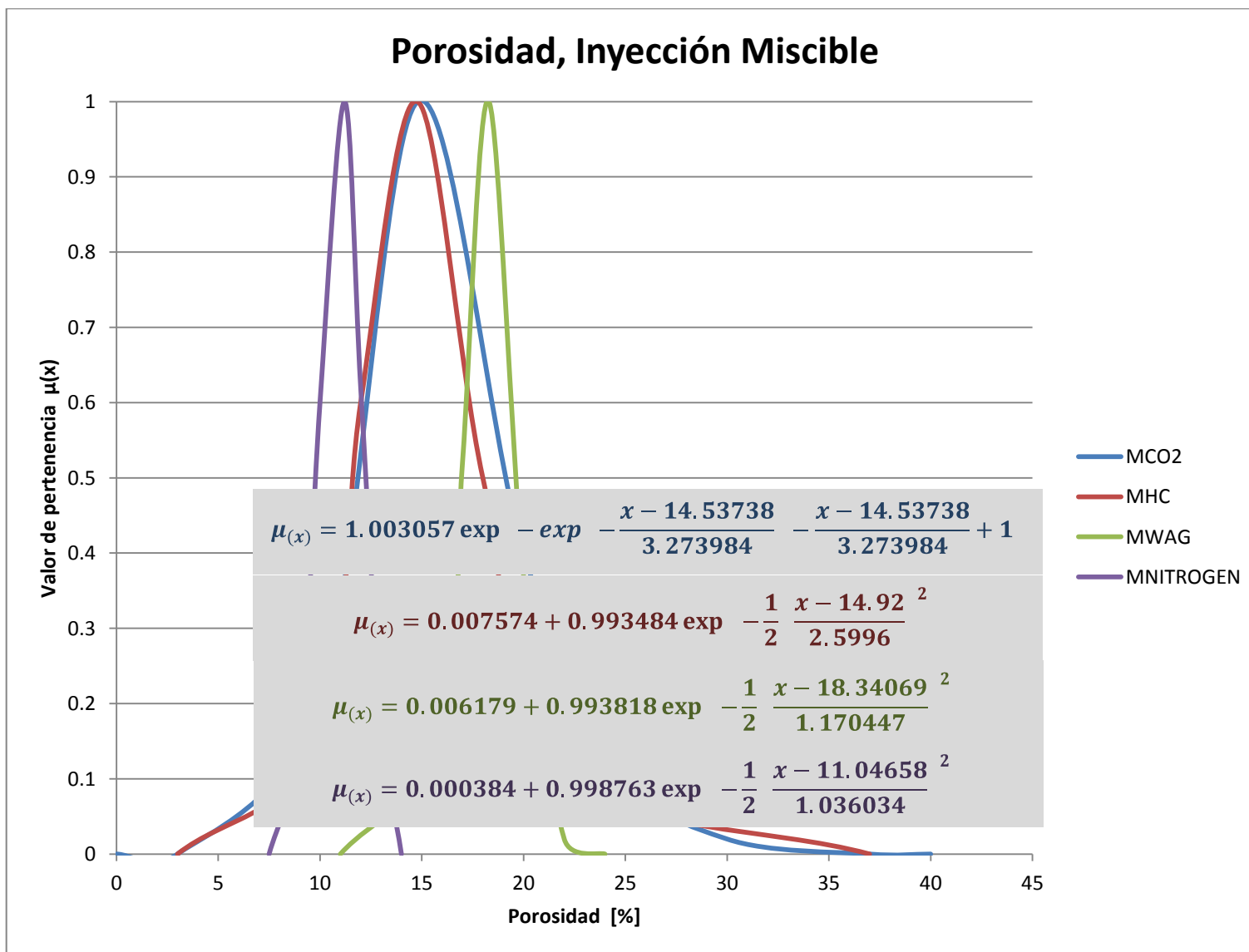


Figura 3. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Porosidad.

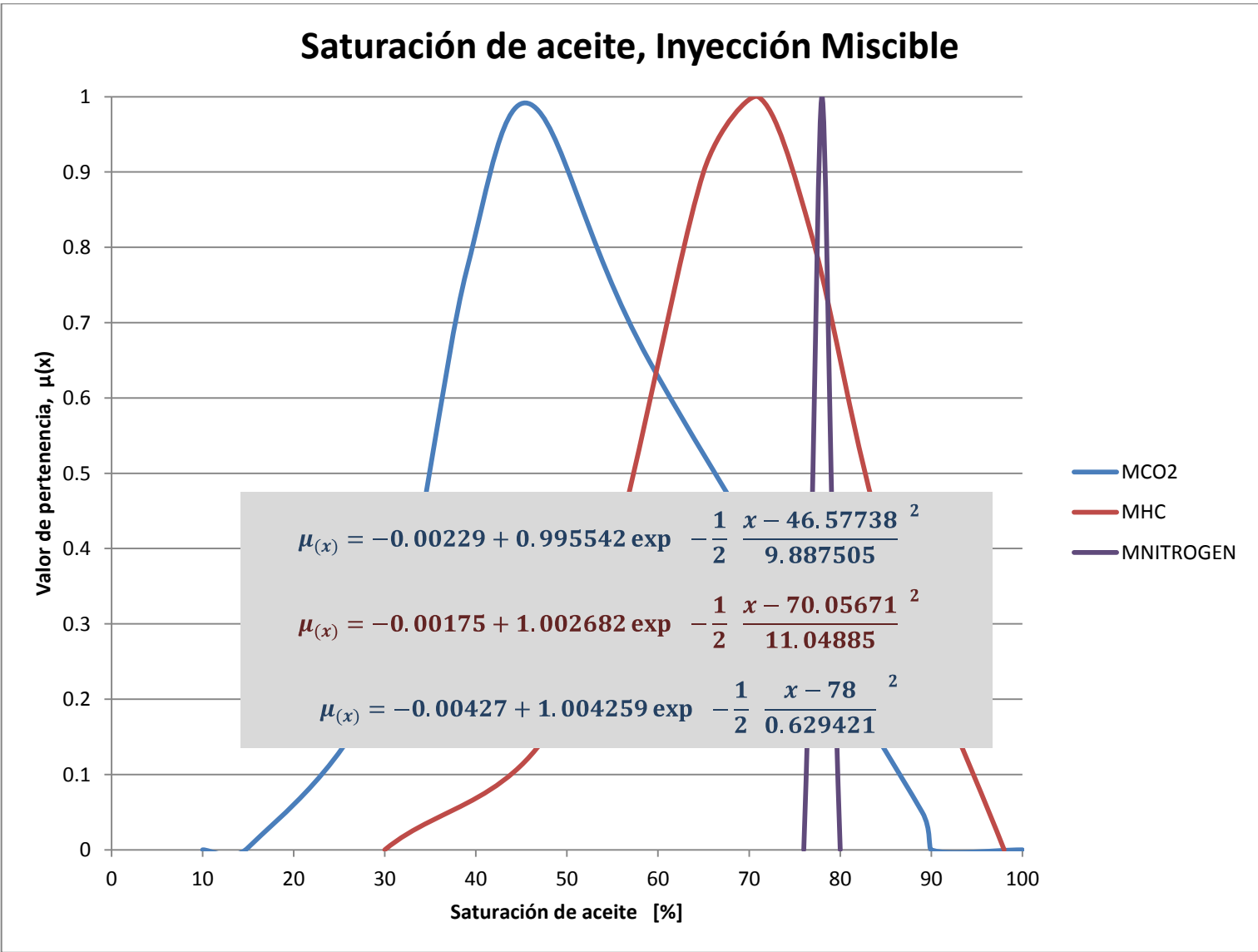


Figura 4. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Saturación de aceite.

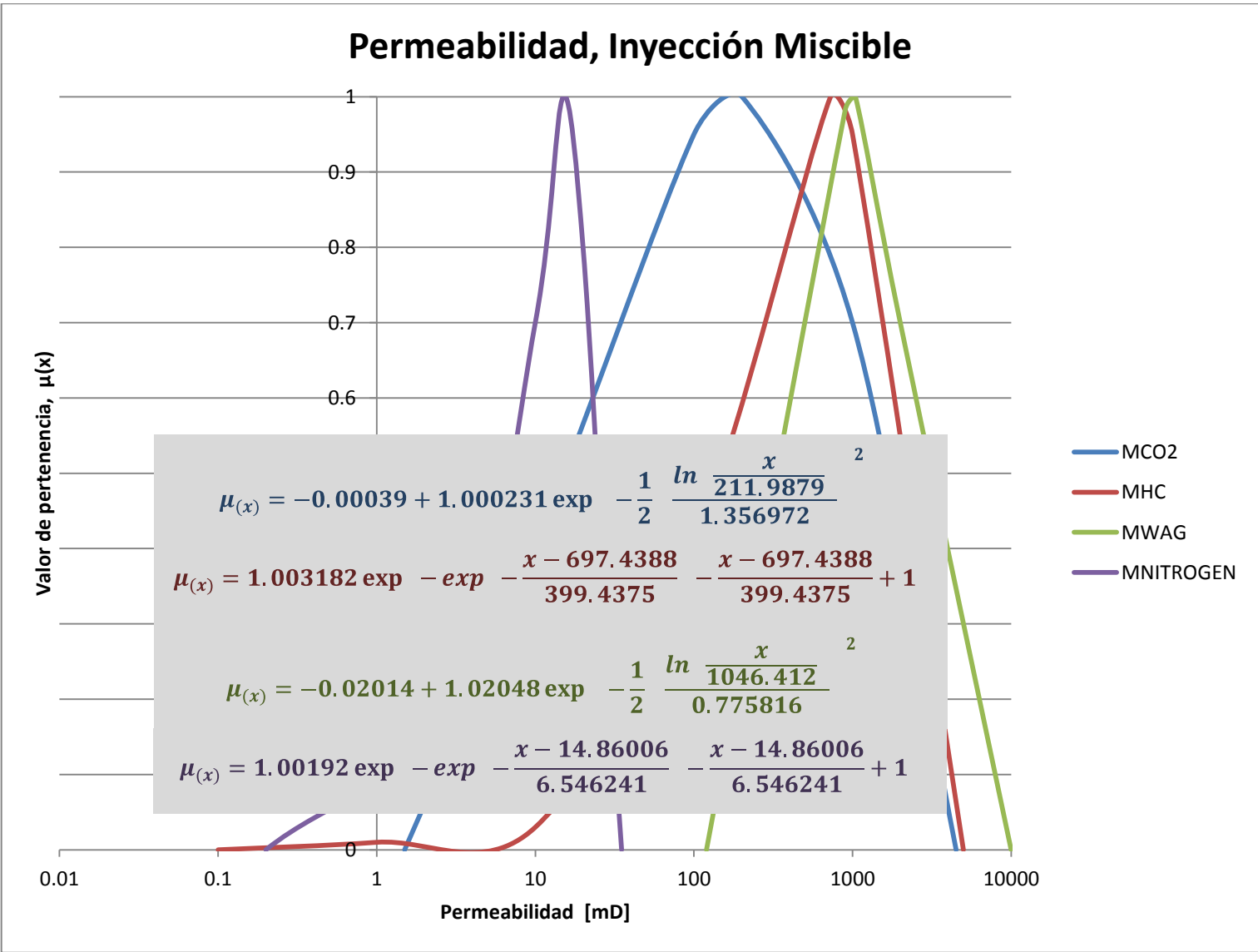


Figura 5. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Permeabilidad

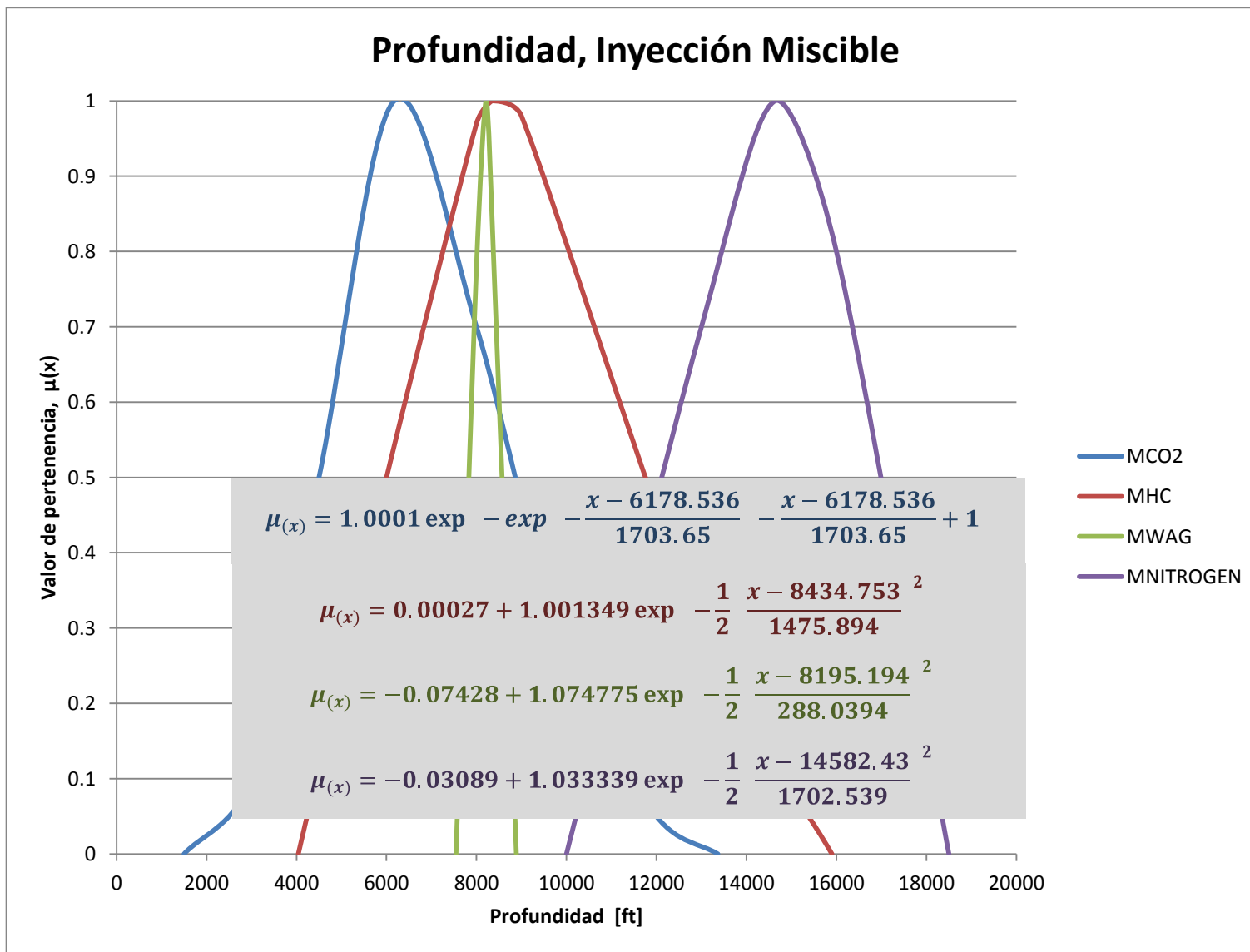


Figura 6. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Profundidad.

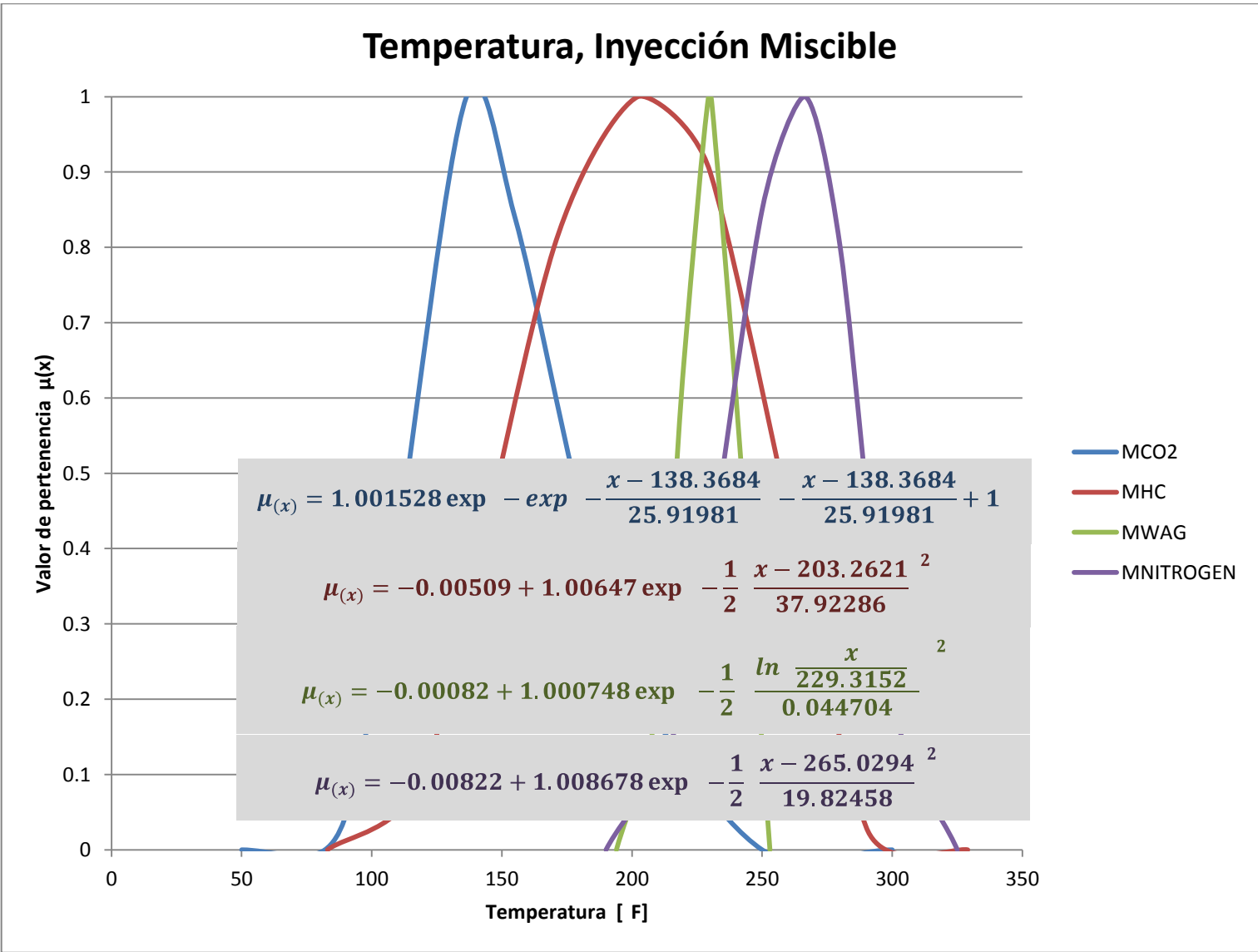


Figura 7. Funciones de pertenencia para métodos de inyección miscible. Propiedad: Temperatura

A2. FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA METODOS DE INYECCION INMISCIBLE

Tabla 6 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección inmiscible de nitrógeno.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-3.15E-02	1.032312	35.59064	7.166781	1
Viscosidad	0.01	0.991738	2344.877	0.646366	4
Porosidad	0.007914	0.992991	19.38876	1.59187	1
Saturación de aceite	0.003768	0.996608	71.19487	8.034729	1
permeabilidad	0.998742	1020.776	230.6772		3
Profundidad	-0.00517	1.005449	7973.759	0.319925	4
Temperatura	-0.00305	1.000274	176.3825	0.225706	4

Tabla 7 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección inmiscible de CO₂.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-2.91E-02	1.029649	22.97554	4.965481	1
Viscosidad	0.002882	0.998787	62.96226	0.683157	4
Porosidad	0.00215	0.994772	25.70471	2.110372	1
Saturación de aceite	-0.02297	1.023458	55.81638	5.019308	1
permeabilidad	0.000315	0.999702	217.63	0.480382	4
Profundidad	1.002174	3326.224	1072.881		3
Temperatura	1.000301	124.0839	17.38949		3

Tabla 8 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección inmiscible de hidrocarburos

	a	b	c	d	Código de la función
API	-6.99E-02	1.065506	34.75586	5.674212	1
Viscosidad	0.012562	0.987712	2.085142	0.616235	1
Porosidad	-0.06106	1.059398	13.82041	3.705219	1
Saturación de aceite	-0.01503	1.011708	79	1.377118	1
permeabilidad	-0.00531	1.005779	525.874	148.4039	1
Profundidad	-0.00427	1.004259	6500	157.3552	1
Temperatura	-0.02489	1.025332	175	1.833461	1

Tabla 9 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección de hidrocarburos usando método WAG.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-1.20E-04	1.002645	31.25366	3.697604	1
Viscosidad	1.000027	3932.082	2184.057		3
Porosidad	-0.0133	1.015384	25.32643	2.51204	1
Saturación de aceite	1.56E-11	1	68.24043	1.474782	2
permeabilidad	1.001366	2431.064	754.2485		3
Profundidad	-0.00124	1.001718	7289.851	832.0564	1
Temperatura	-0.01289	1.01289	198.6983	23.11663	1

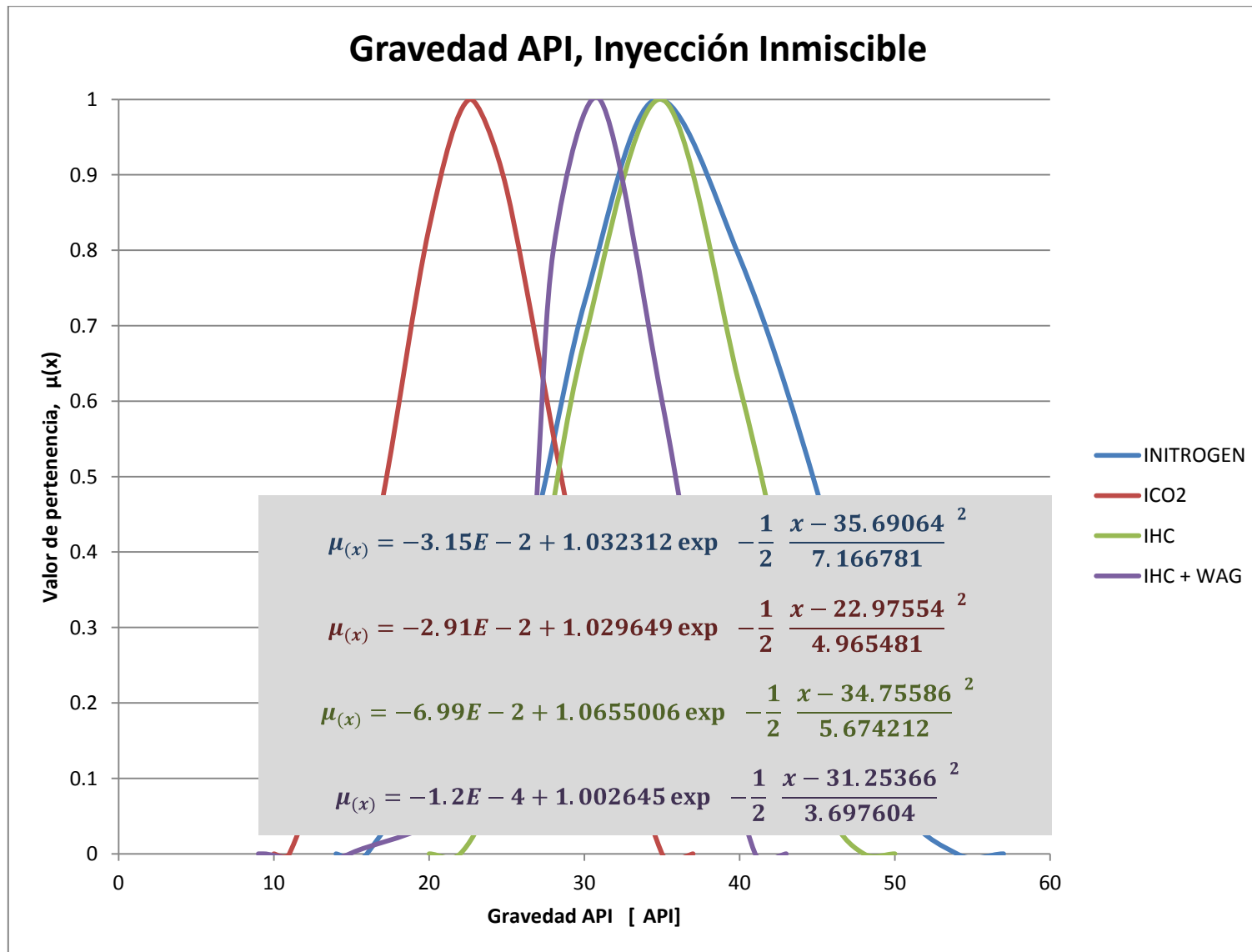


Figura 8. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Gravedad API

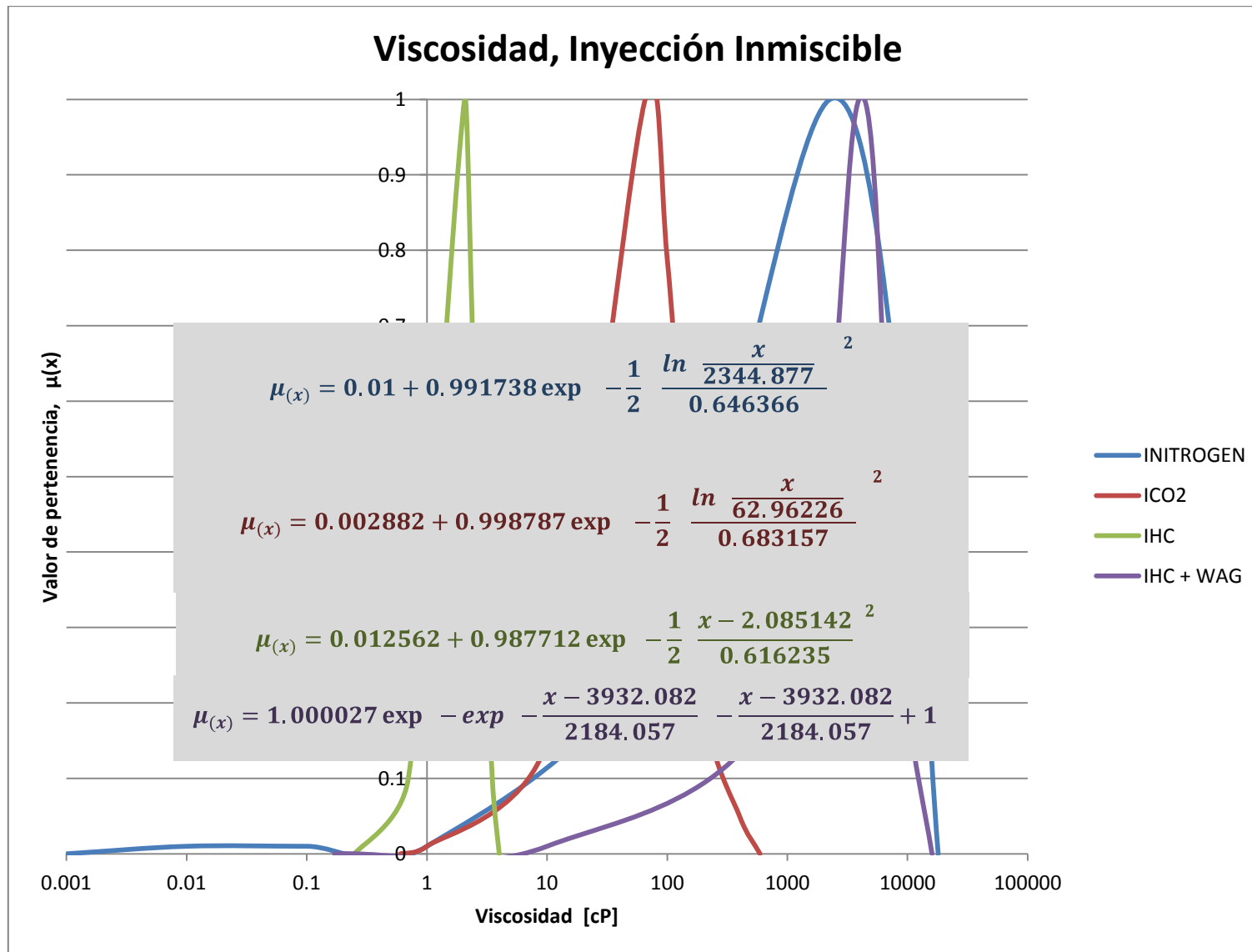


Figura 9. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Viscosidad

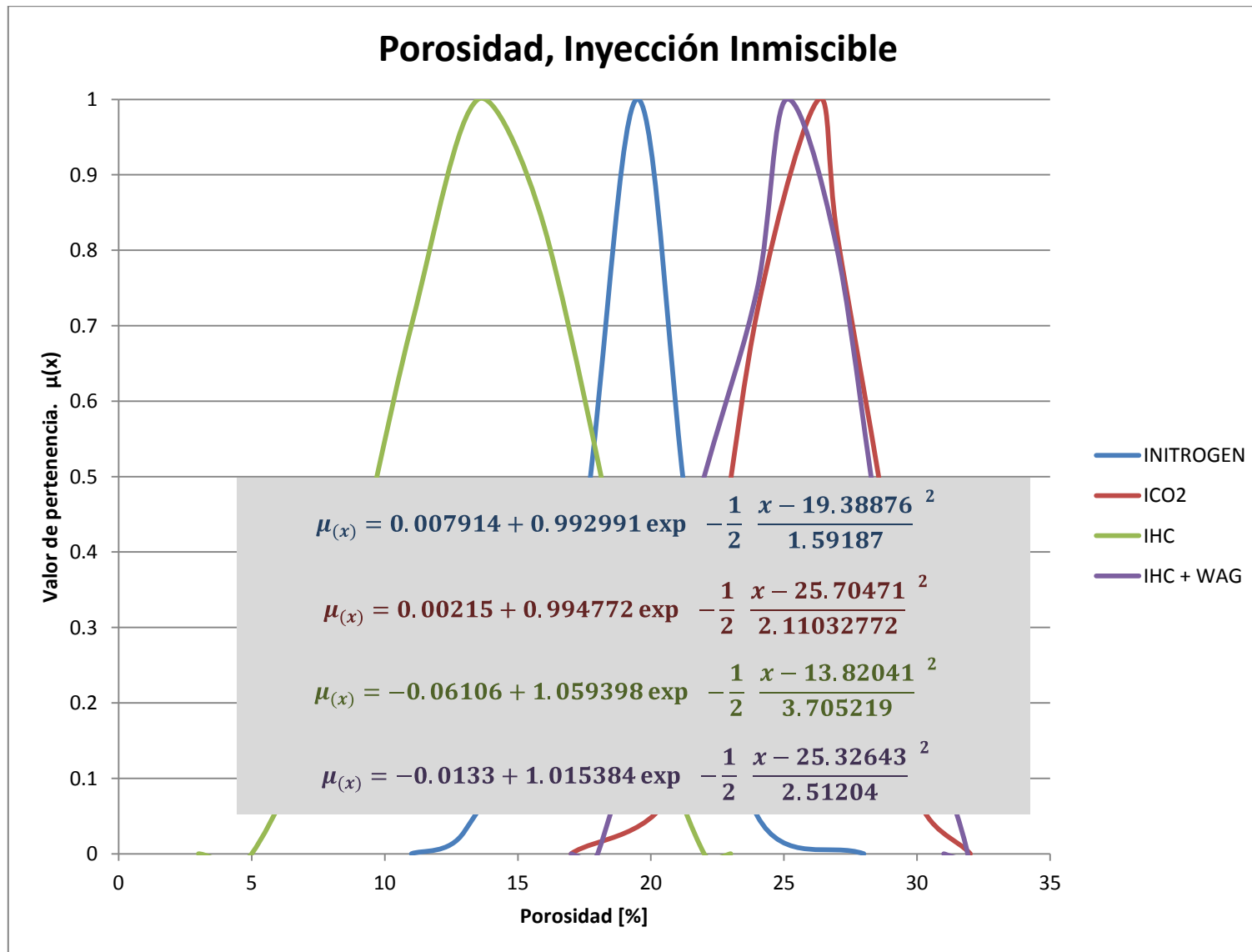


Figura 10. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Porosidad.

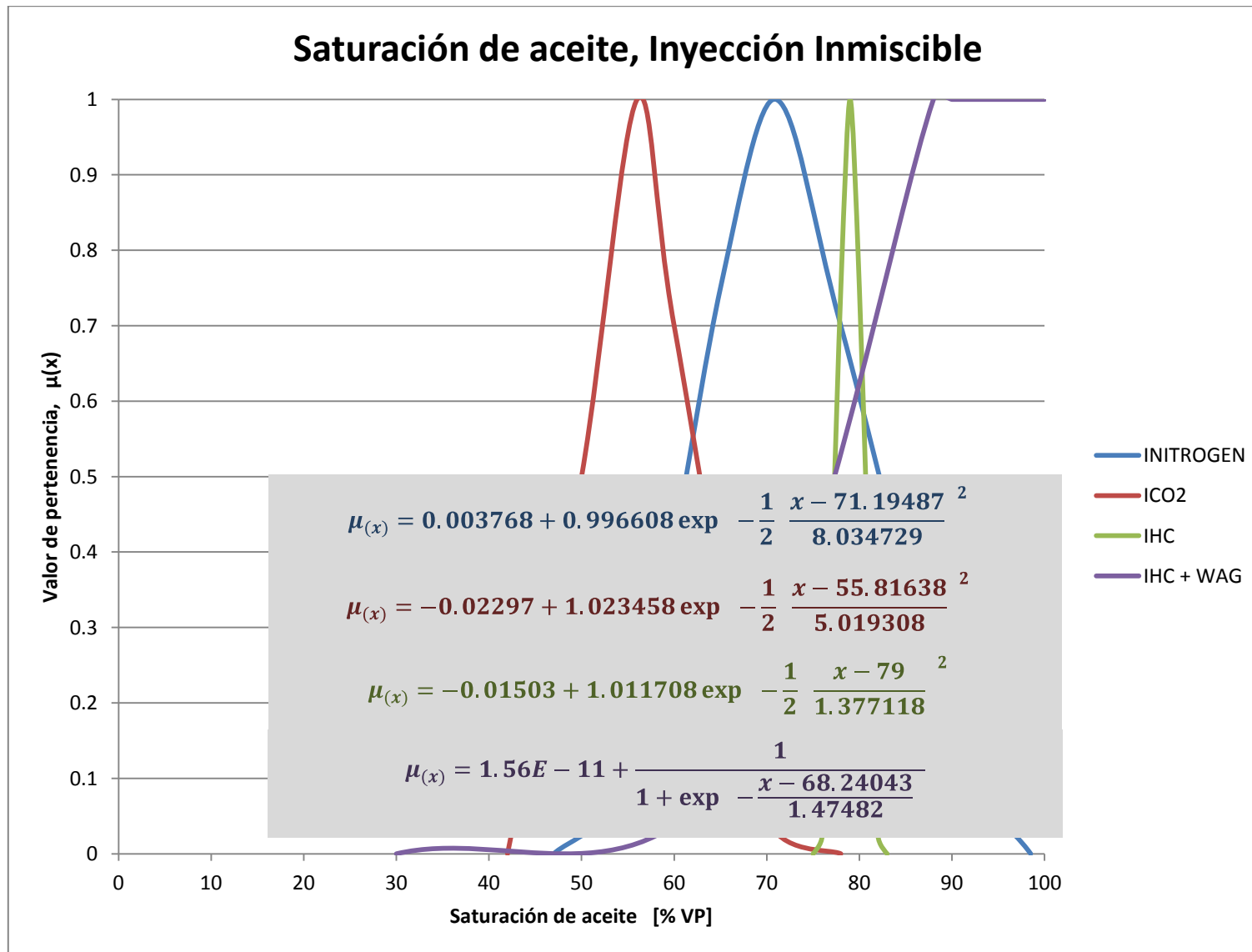


Figura 11. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Saturación de aceite.

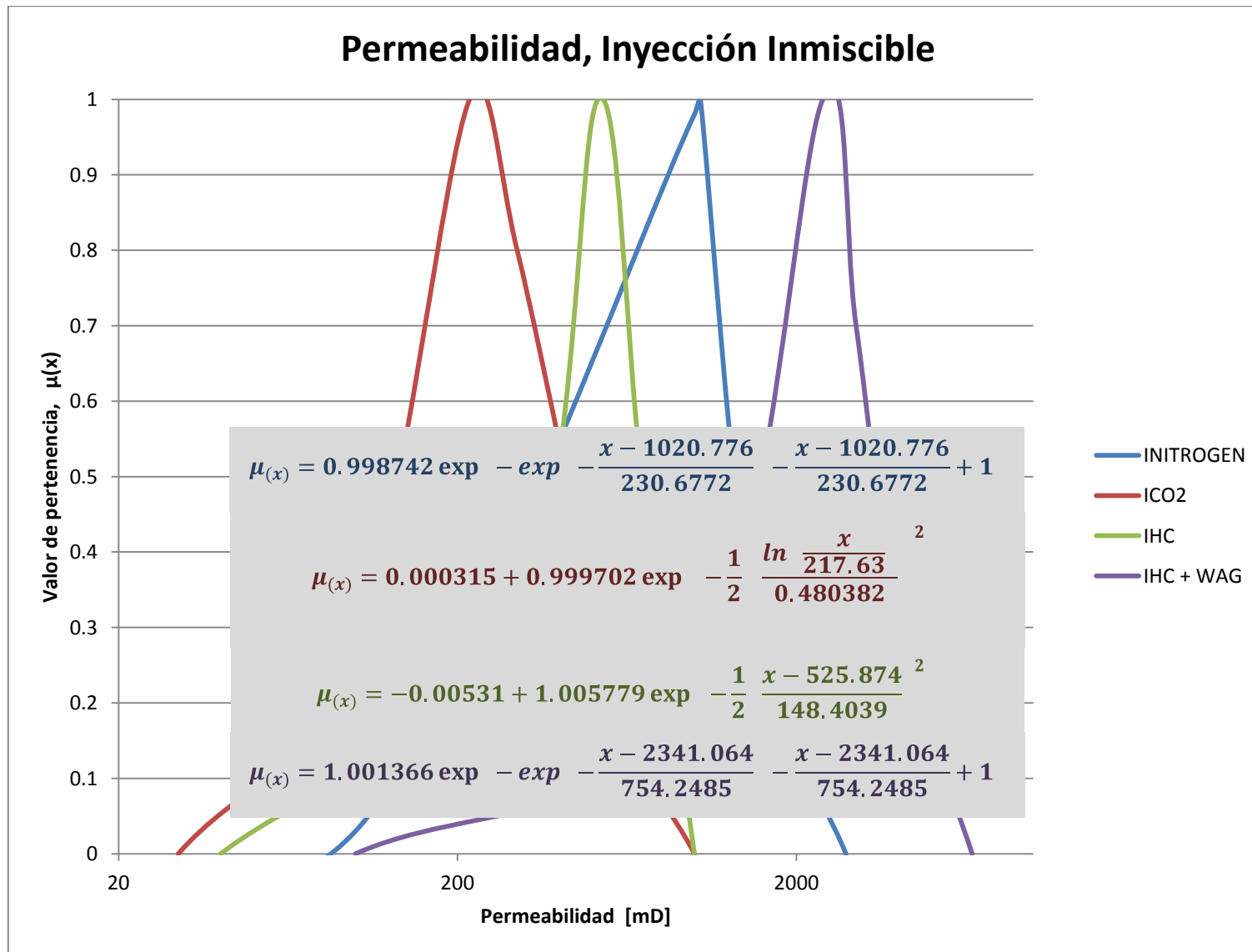


Figura 12. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Permeabilidad.

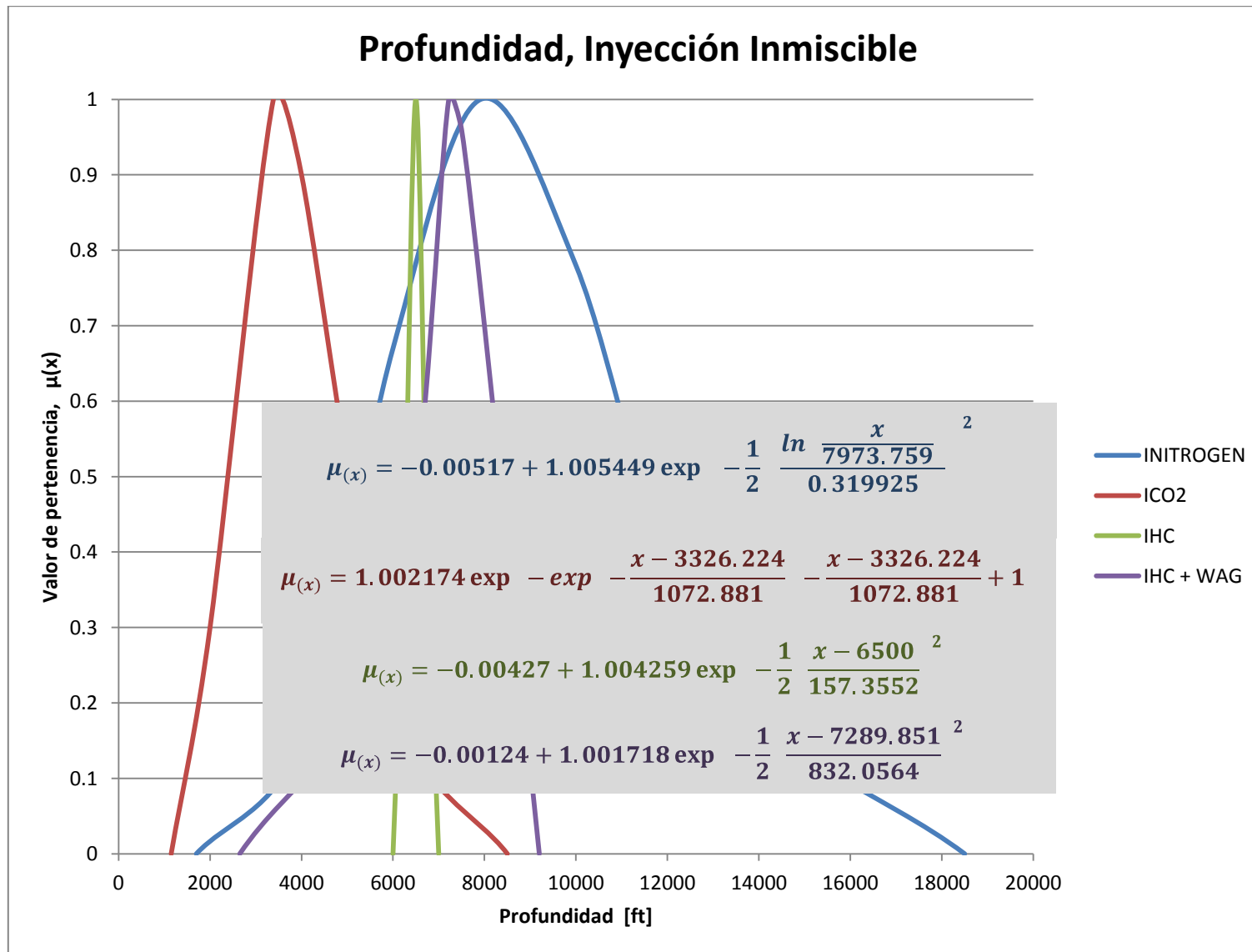


Figura 13. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Profundidad.

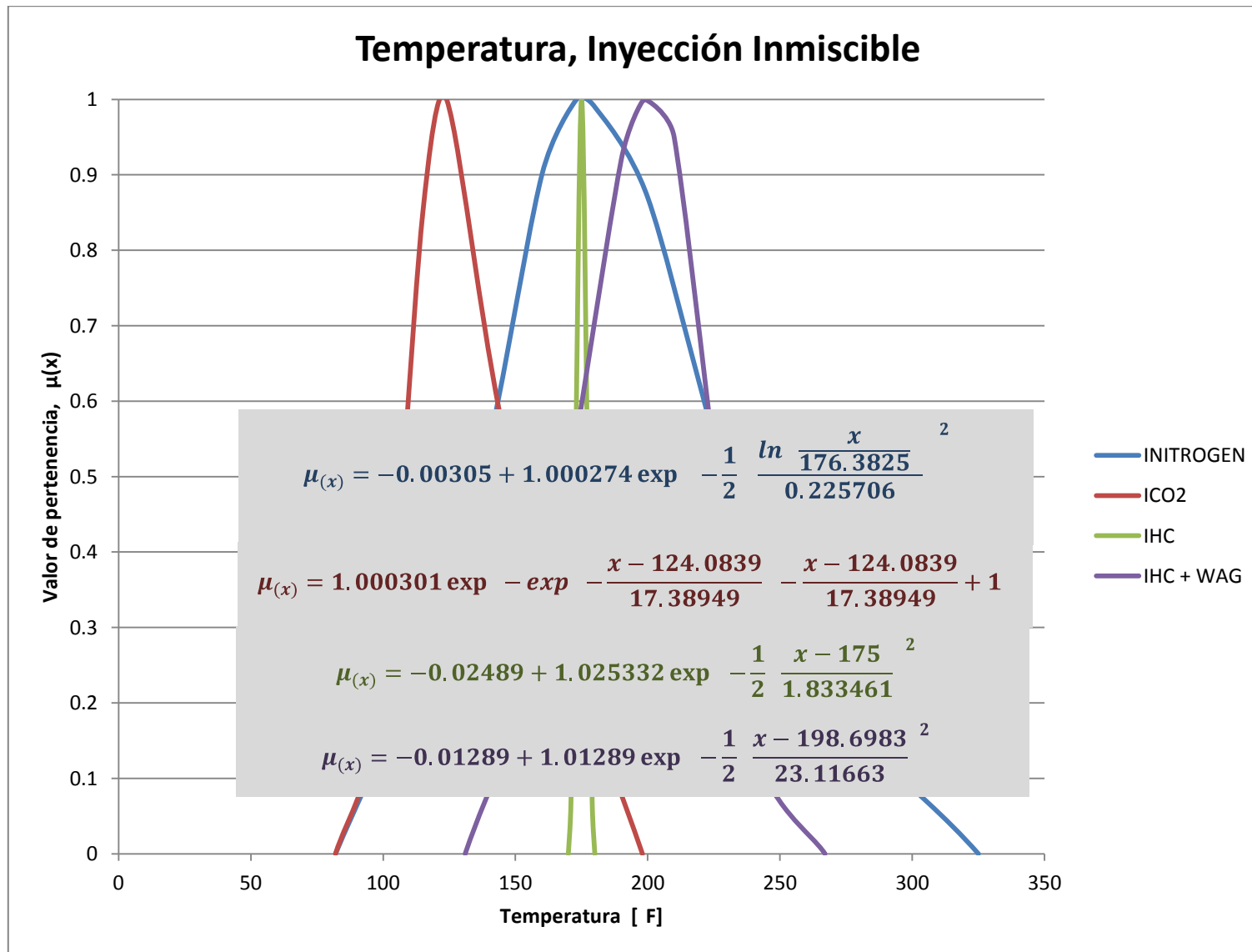


Figura 14. Funciones de pertenencia para métodos de inyección inmiscible. Propiedad: Temperatura.

A3. FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA METODOS DE RECOBRO QUIMICO

Tabla 10 – Funciones de pertenencia para inyección de polímeros.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-1.98E-03	1.003435	26.12712	4.696059	1
Viscosidad	-0.00199	1.003124	109.7791	1.283705	4
Porosidad	-0.05959	1.058662	21.97749	5.163057	1
Saturación de aceite	0.000107	1.000191	63.96659	6.268732	1
permeabilidad	0.999391	900.6175	561.2768		3
Profundidad	-0.00429	1.008439	4112.77	0.288364	4
Temperatura	-9.81E-05	1.00219	165.5413	0.135821	4

Tabla 11 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección de soluciones alcalino-surfactante-polímero.

	a	b	c	d	Código de la función
API	5.78E-04	0.998893	32.65984	0.924639	1
Viscosidad	0	1	937.9	0.747543	4
Porosidad	1.003247	26.63285	0.484626		3
Saturación de aceite	0.000765	0.999047	73.68841	0.546624	1
permeabilidad	-0.01522	1.015345	1056.906	164.408	1
Profundidad	1.002298	2994.915	143.0532		3
Temperatura	1.00011	121.3757	15.68096		3

Tabla 12 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección de surfactante y polímero o alcalino.

	a	b	c	d	Código de la función
API	1.95E-03	0.999401	30.88131	2.274669	1
Viscosidad	-0.00395	1.004195	9.346897	1.882458	1
Porosidad	-0.00427	1.004259	16.4	0.125884	1
Saturación de aceite	-0.00593	1.005945	48.00007	1.632752	1
permeabilidad	0.008722	0.991197	55	1.759633	1
Profundidad	-0.00082	1.002502	2901.605	621.692	1
Temperatura	-0.01508	1.015276	138.6135	5.718262	1

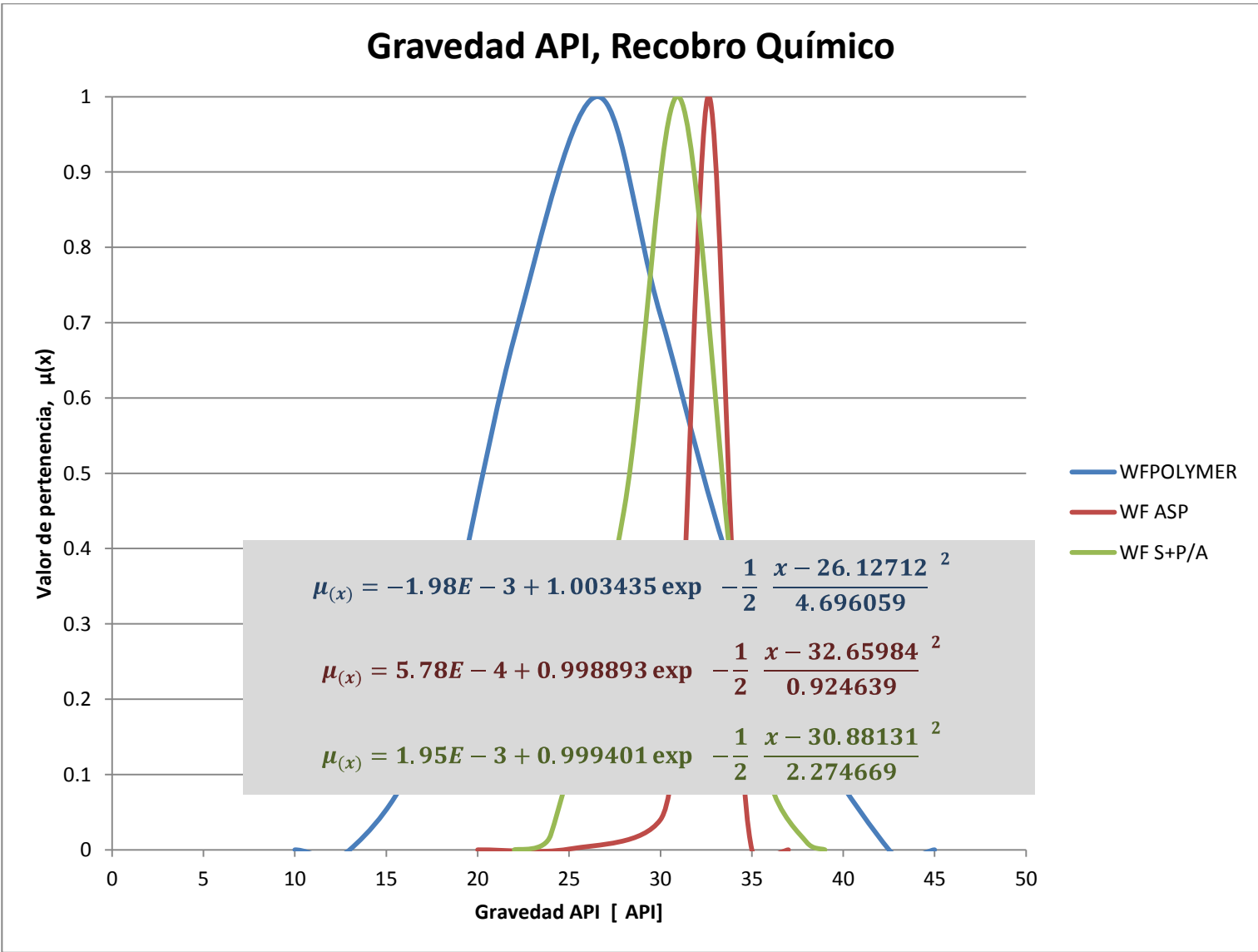


Figura 15. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Gravedad API.

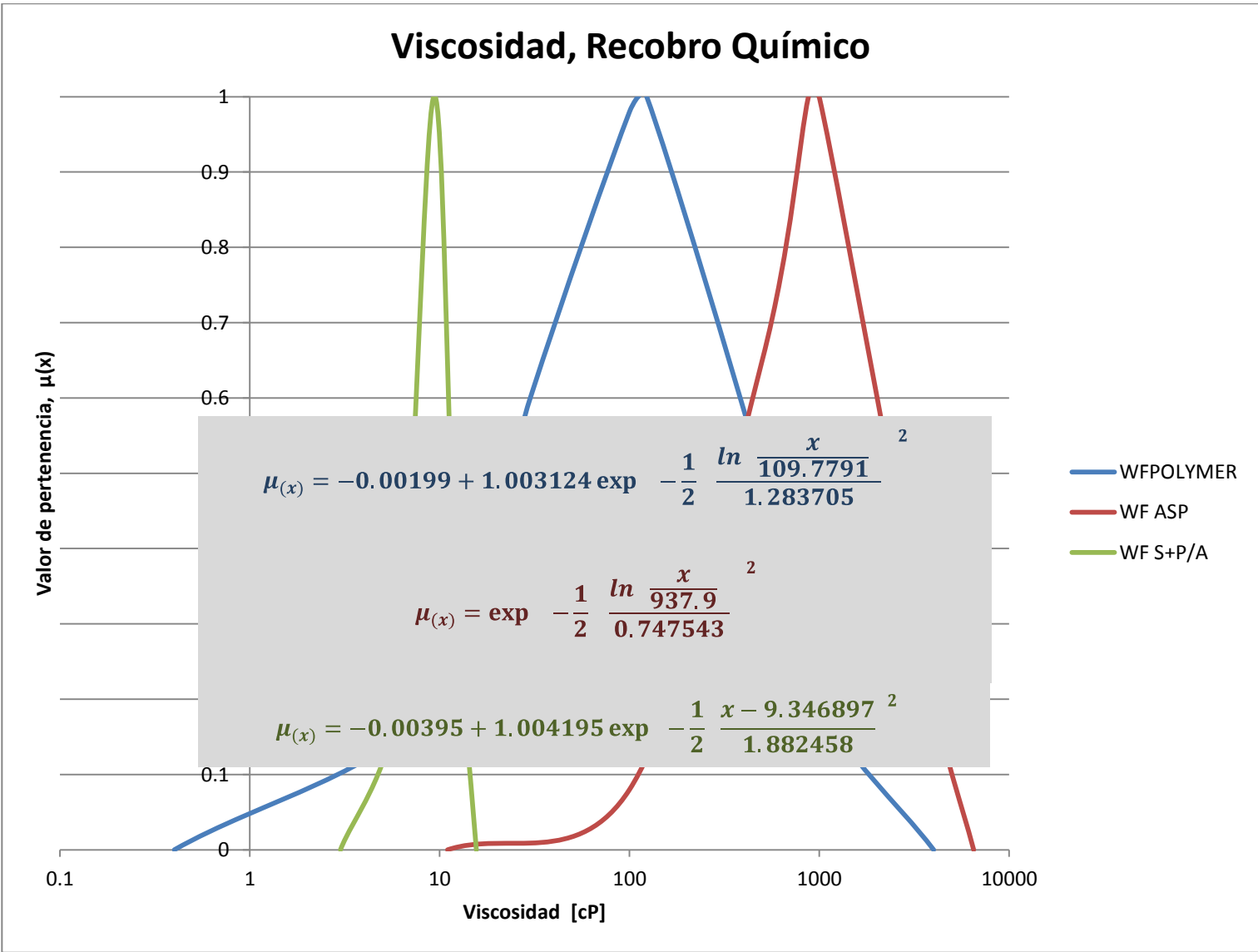


Figura 16. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Viscosidad.

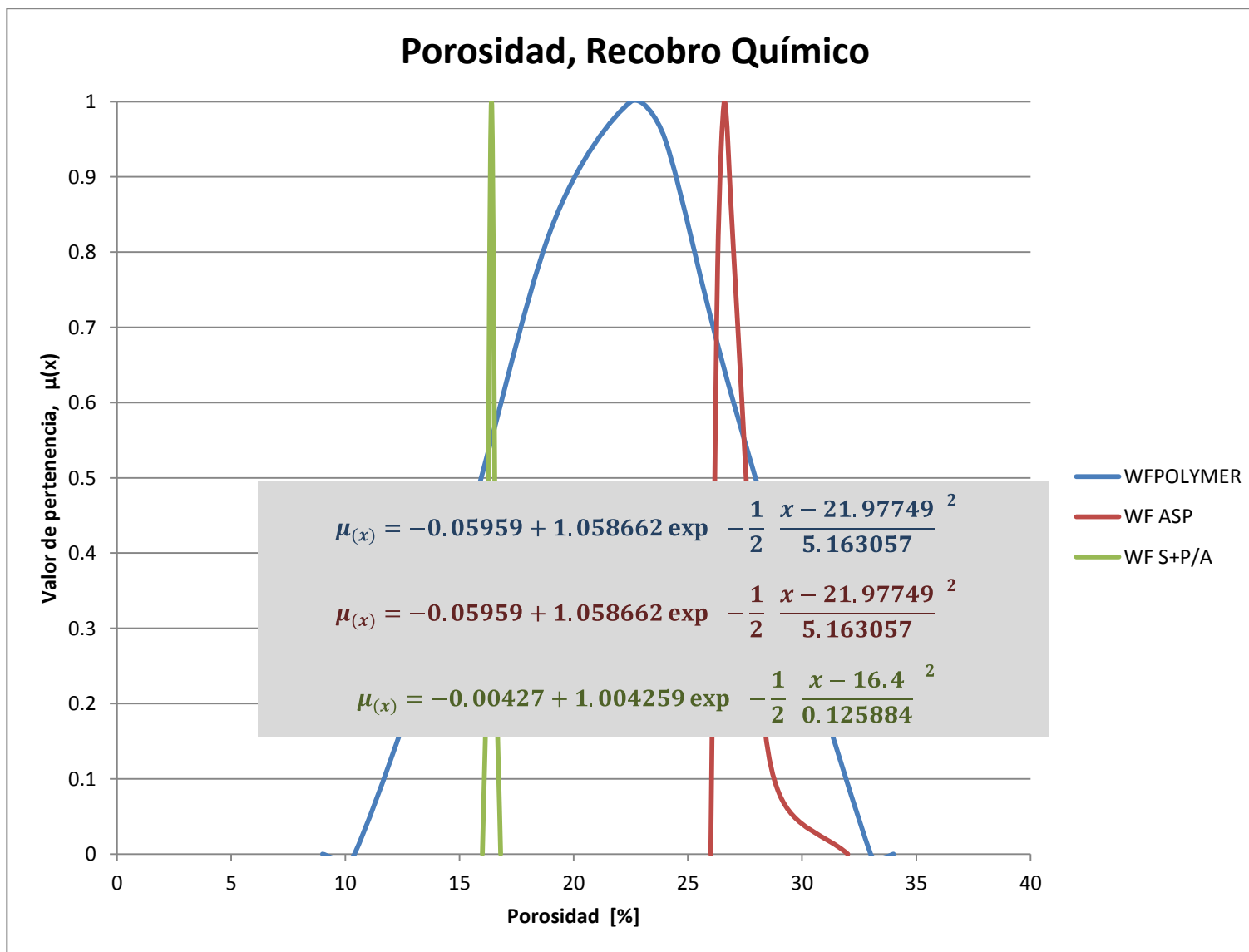


Figura 17. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Porosidad.

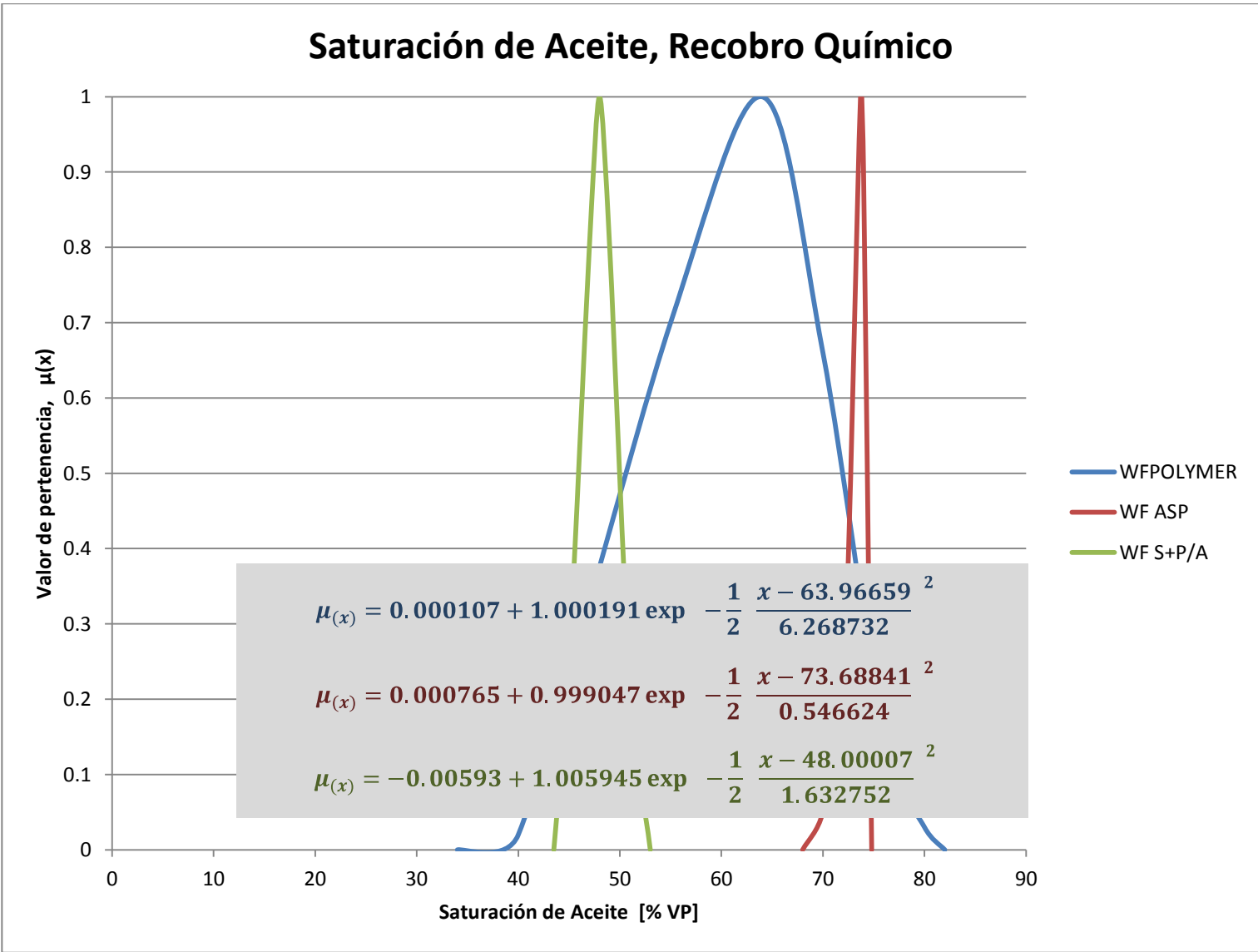


Figura 18. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Saturación de aceite.

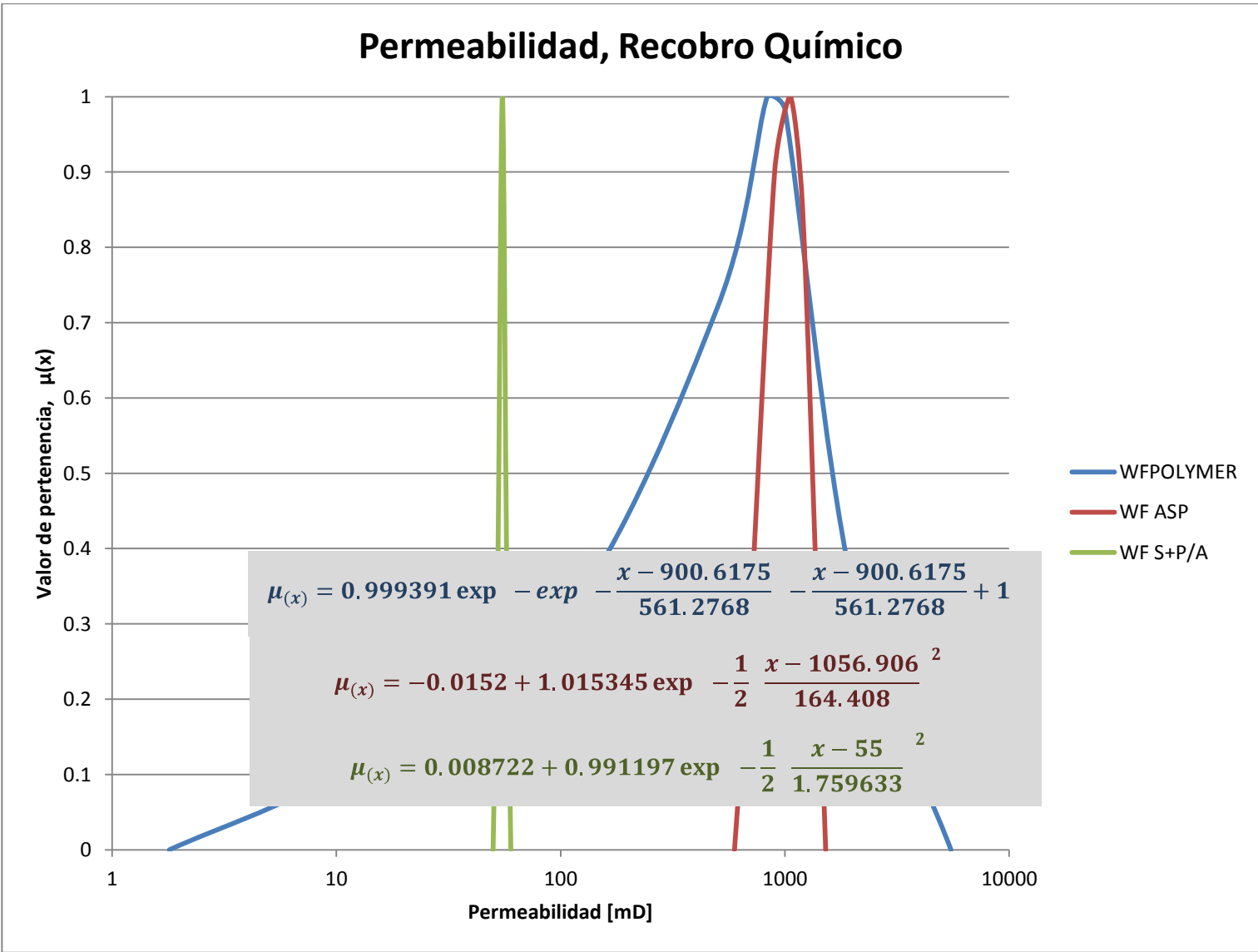


Figura 19. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Permeabilidad.

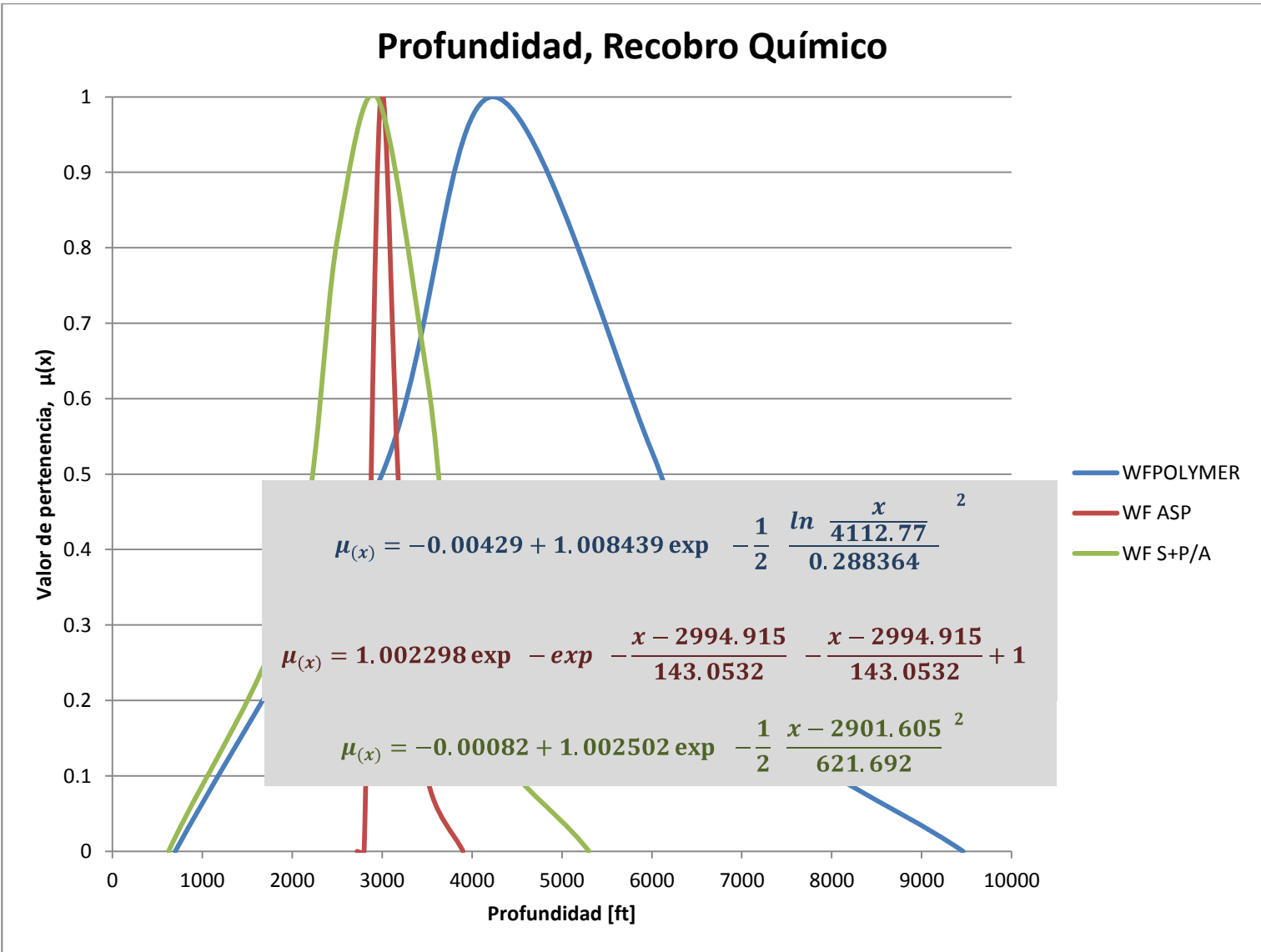


Figura 20. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Profundidad.

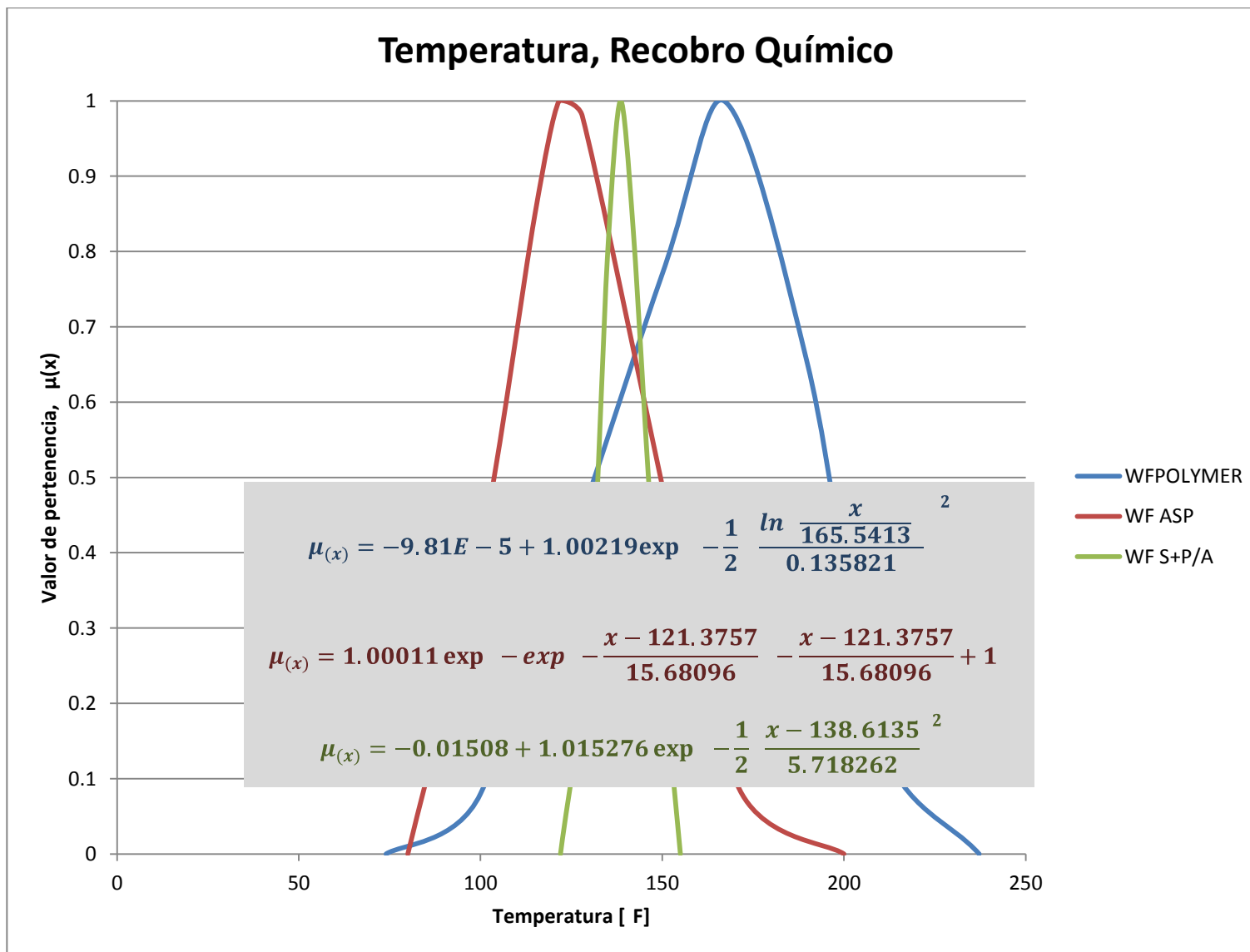


Figura 21. Funciones de pertenencia para métodos de recobro químico. Propiedad: Temperatura.

A3. FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA METODOS DE RECOBRO TERMICO

Tabla 13 – Constantes de las funciones de pertenencia para combustión in situ.

	a	b	c	d	Código de la función
API	-4.55E-06	1.003081	23.05406	3.06214	1
Viscosidad	0	1	552.4	0.634953	4
Porosidad	-0.01628	1.01646	23.35164	3.88191	1
Saturación de aceite	0.003272	0.993658	66.89547	4.819168	1
permeabilidad	0.00484	0.99337	2237.661	0.682557	4
Profundidad	-0.00165	1.00202	5604.405	1588.457	1
Temperatura	0.004751	0.994266	175.8962	0.09351	4

Tabla 14 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección de vapor.

	a	b	c	d	Código de la función
API	1.00E+00	14.40865	2.30387		3
Viscosidad	-0.03678	1.03668	12842.94	3886.061	2
Porosidad	-3.36E-05	0.997463	25.85338	1.339455	2
Saturación de aceite	-0.01933	1.018767	65.12561	8.984139	1
permeabilidad	0.001295	0.998181	2443.867	0.575254	4
Profundidad	-0.00277	1.002525	1660.324	0.503552	4
Temperatura	1.000205	106.8614	52.56767		3

Tabla 15 – Constantes de las funciones de pertenencia para inyección de agua caliente.

	a	b	c	d	Código de la función
API	4.50E-04	1.001653	18.69264	1.428831	1
Viscosidad	1.001318	2066.697	1230.967		3
Porosidad	-0.02557	1.02733	31.06973	2.226393	1
Saturación de aceite	-0.01944	1.019852	58.19199	0.185006	4
permeabilidad	-0.00732	1.007411	3357.203	822.5765	1
Profundidad	-0.00054	1.000825	1933.934	315.6936	1
Temperatura	-0.00769	1.008058	98.75612	0.096736	4

El método de minería a cielo abierto tiene únicamente una función de pertenencia para la densidad del fluido, la litología “arena bituminosa” (tar sand) le hace excluyente.

Tabla 16 – constantes de las funciones de pertenencia para minería a cielo abierto.

	a	b	c	d	Código de la función
API	5.99E-02	1.060377	8.773196	-0.75279	2

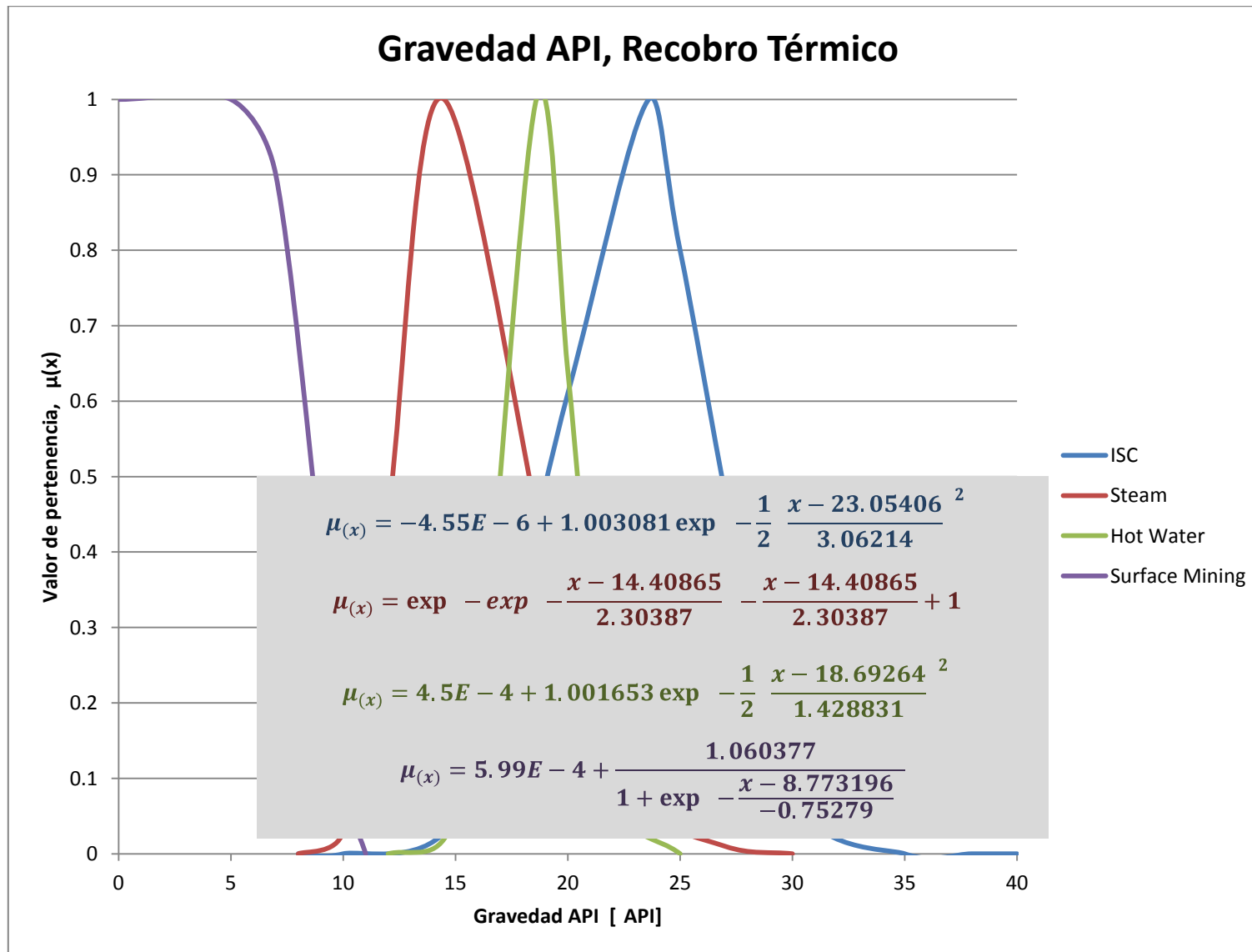


Figura 22. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Gravedad API.

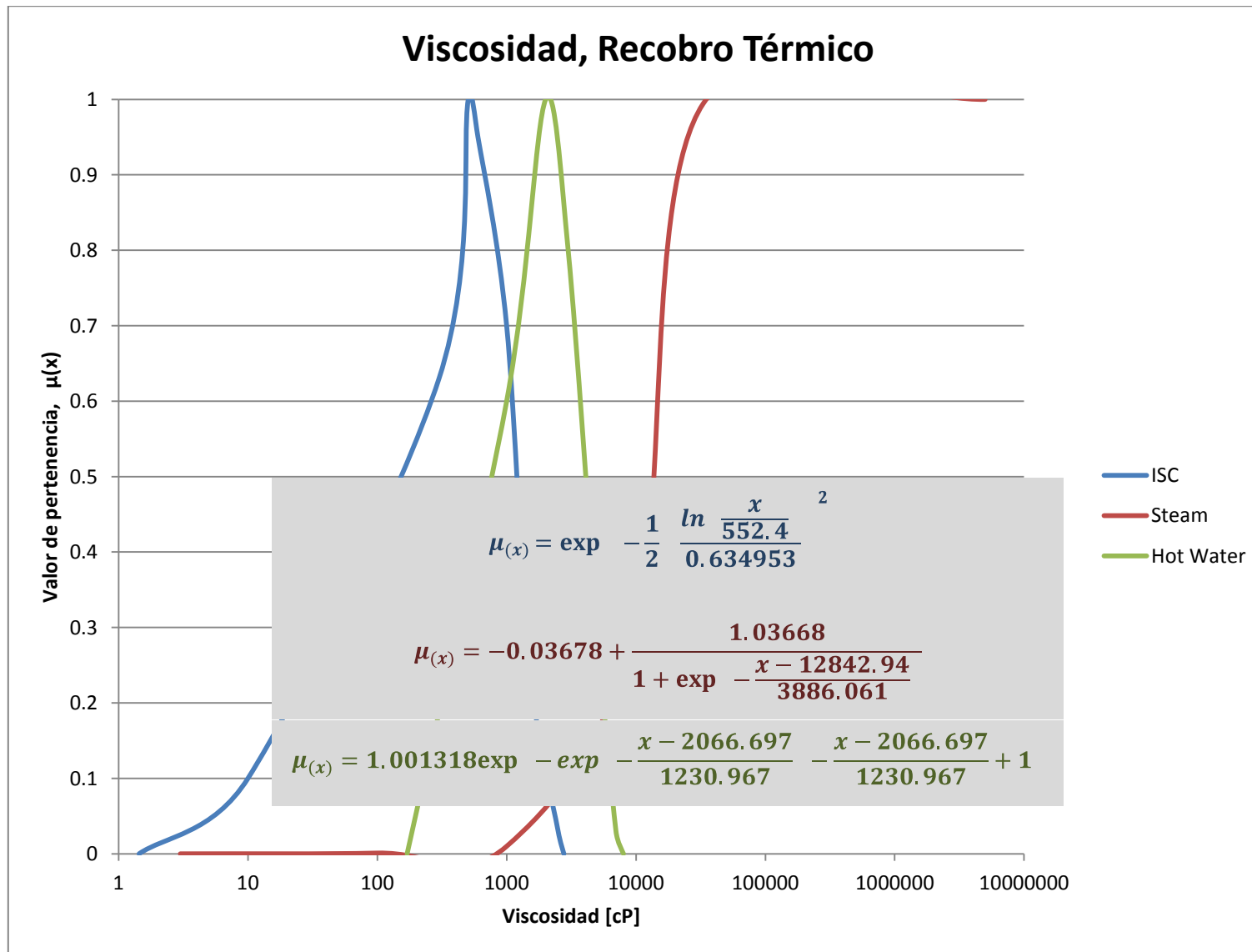


Figura 23. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Viscosidad.

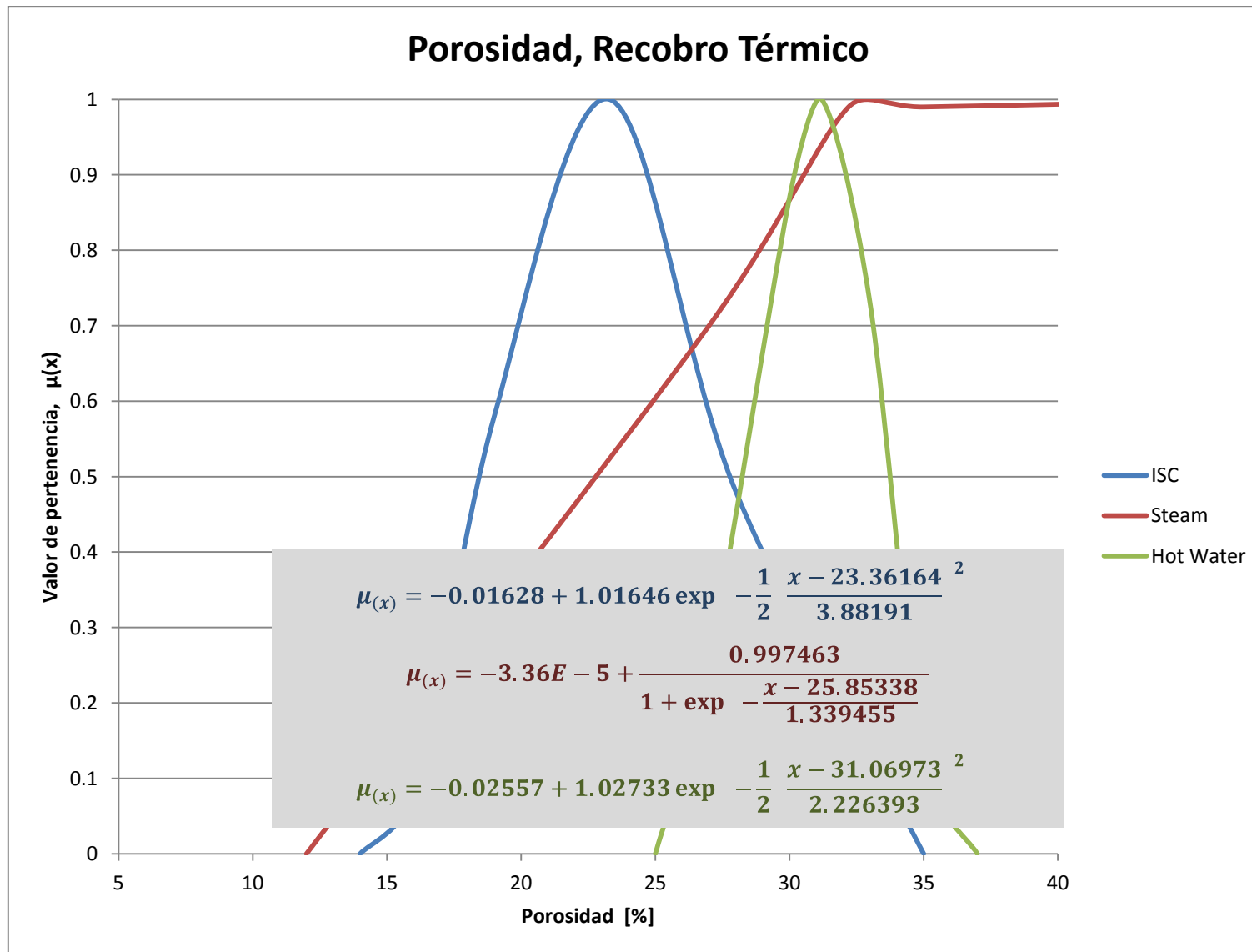


Figura 24. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Porosidad.

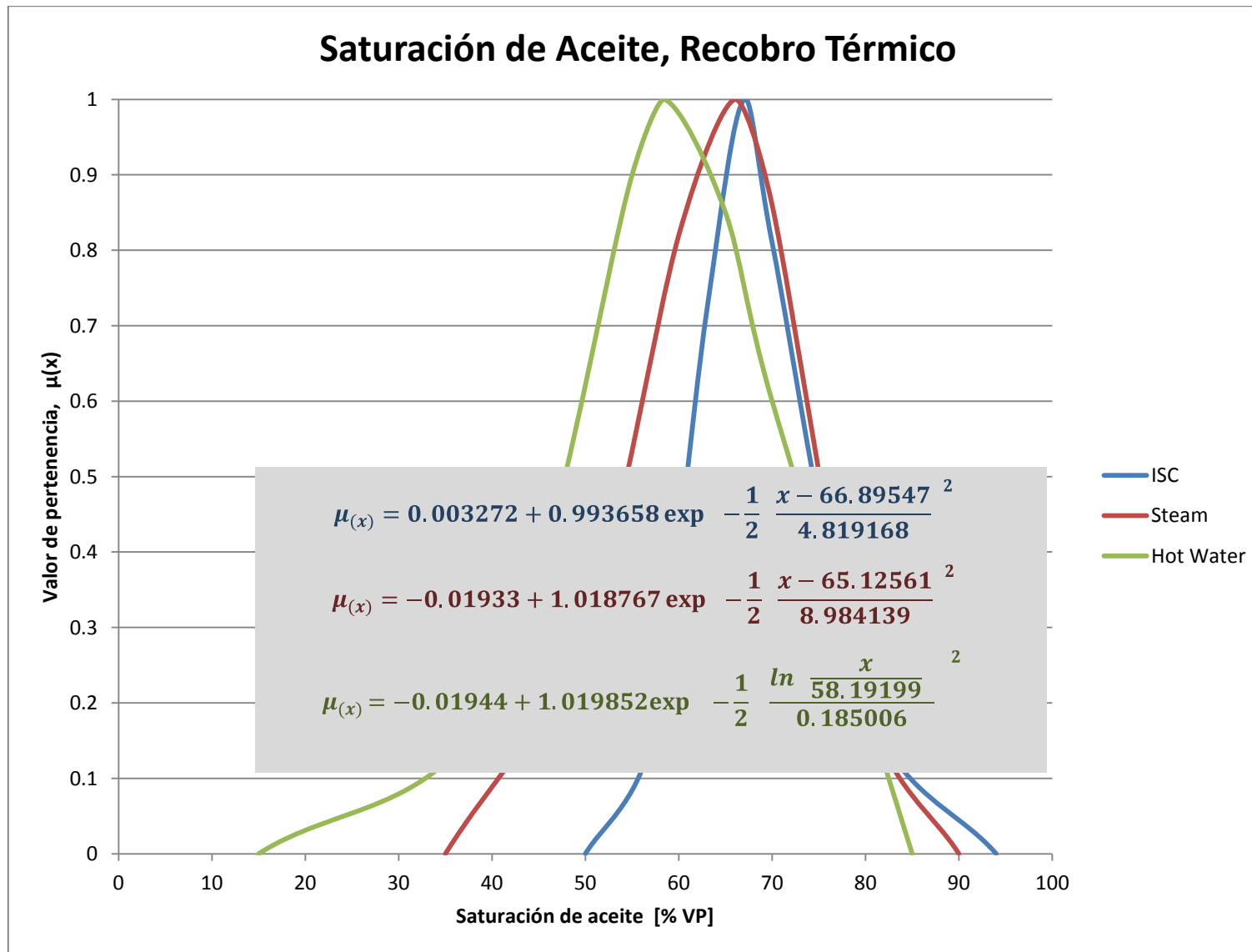


Figura 25. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Saturación de aceite.

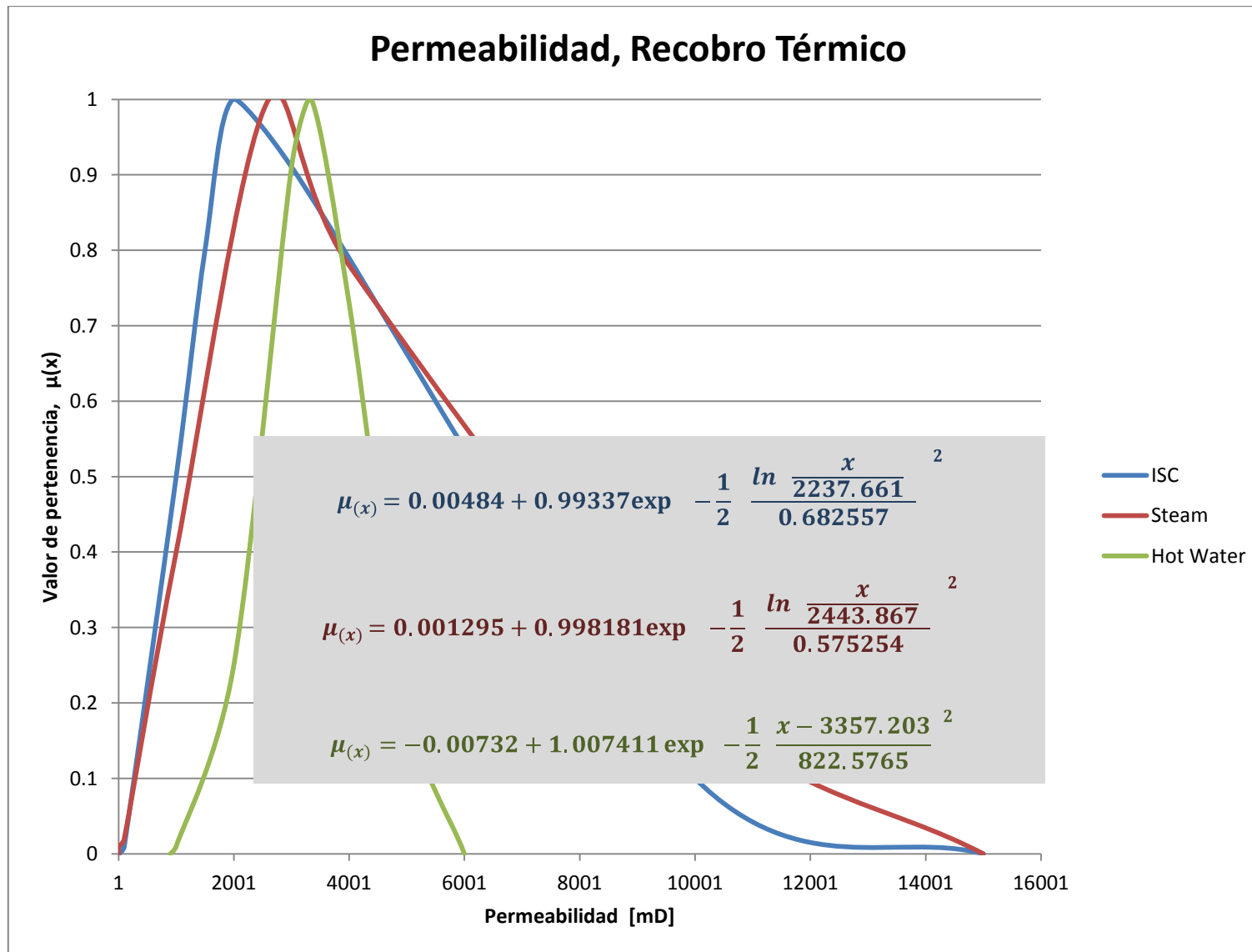


Figura 26. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Permeabilidad.

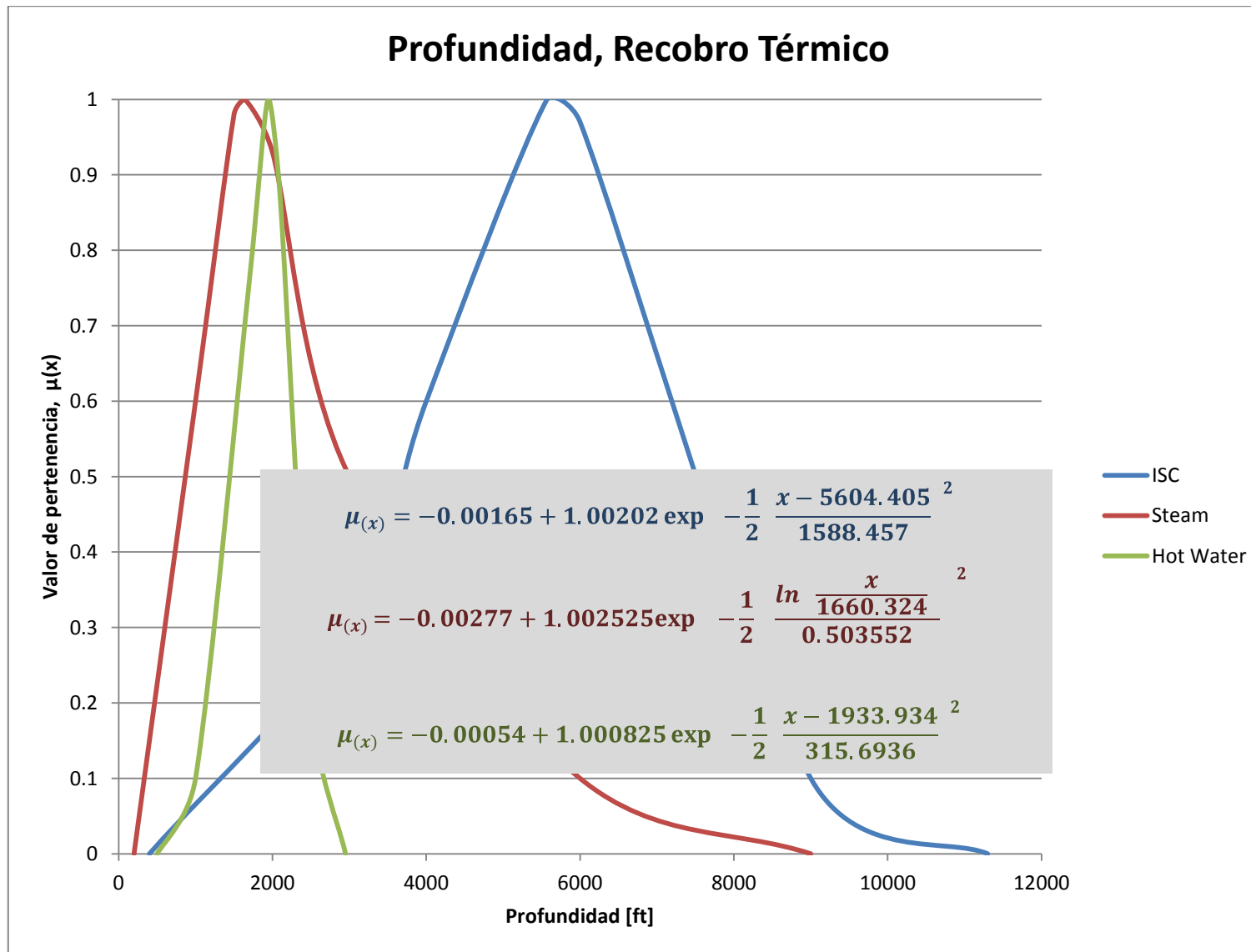


Figura 27. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Profundidad.

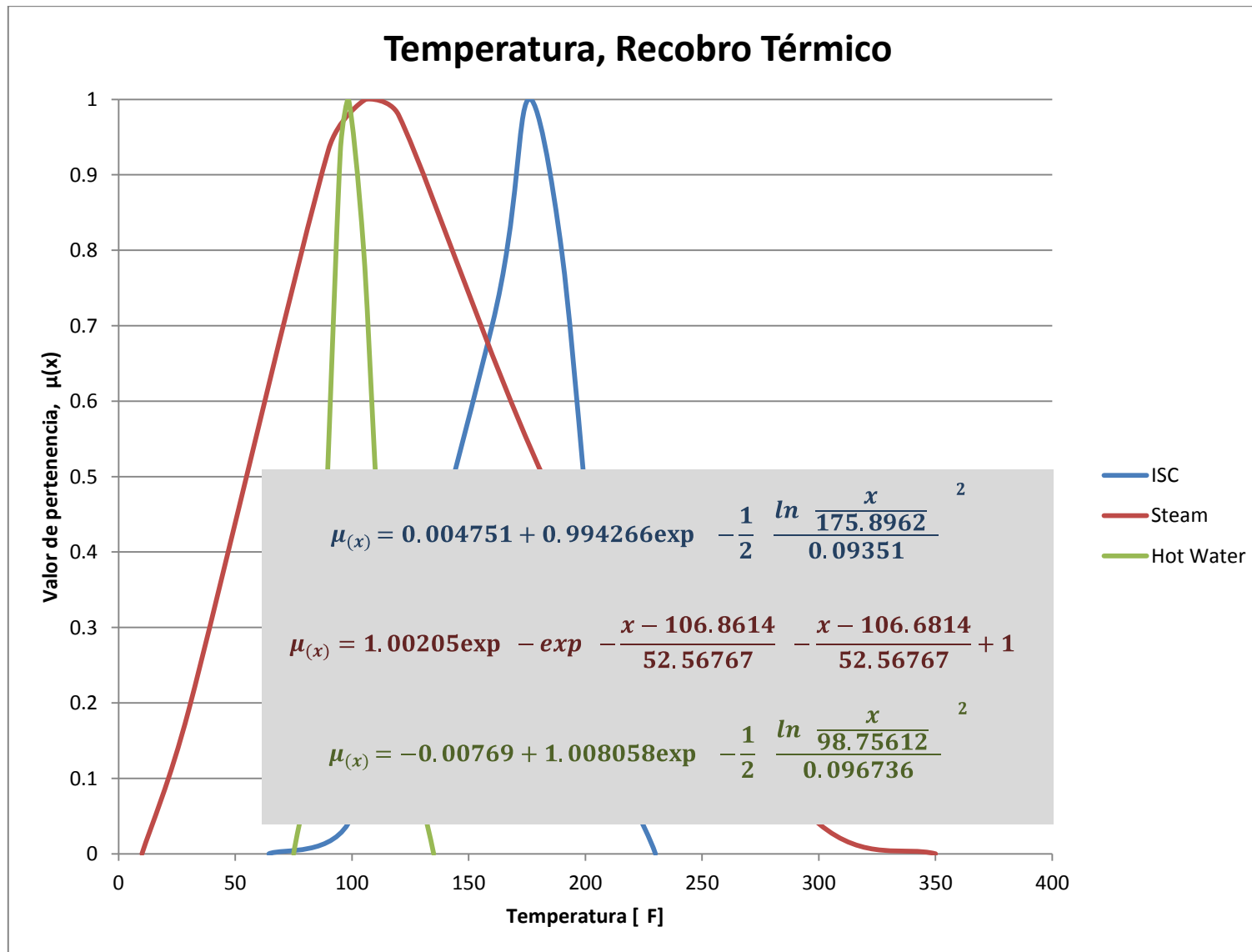


Figura 28. Funciones de pertenencia para métodos de recobro térmico. Propiedad: Temperatura.

A4. FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA MEOR

Tabla 17 – Constantes de las funciones de pertenencia para recobro microbial.

	a	b	c	d	Código de la función
API	3.98E-03	0.995979	26.61998	2.187139	1
Viscosidad	1.000641	2933.391	1256.218		3
Porosidad	-0.01582	1.015835	19.01323	2.434722	1
Saturación de aceite	-0.00965	1.010039	59.95048	1.774077	1
permeabilidad	0.008722	0.991197	190	3.519266	1
Profundidad	-0.00705	1.0087	2426.769	325.5008	1
Temperatura	-0.02401	1.024209	87.98542	0.008319	4

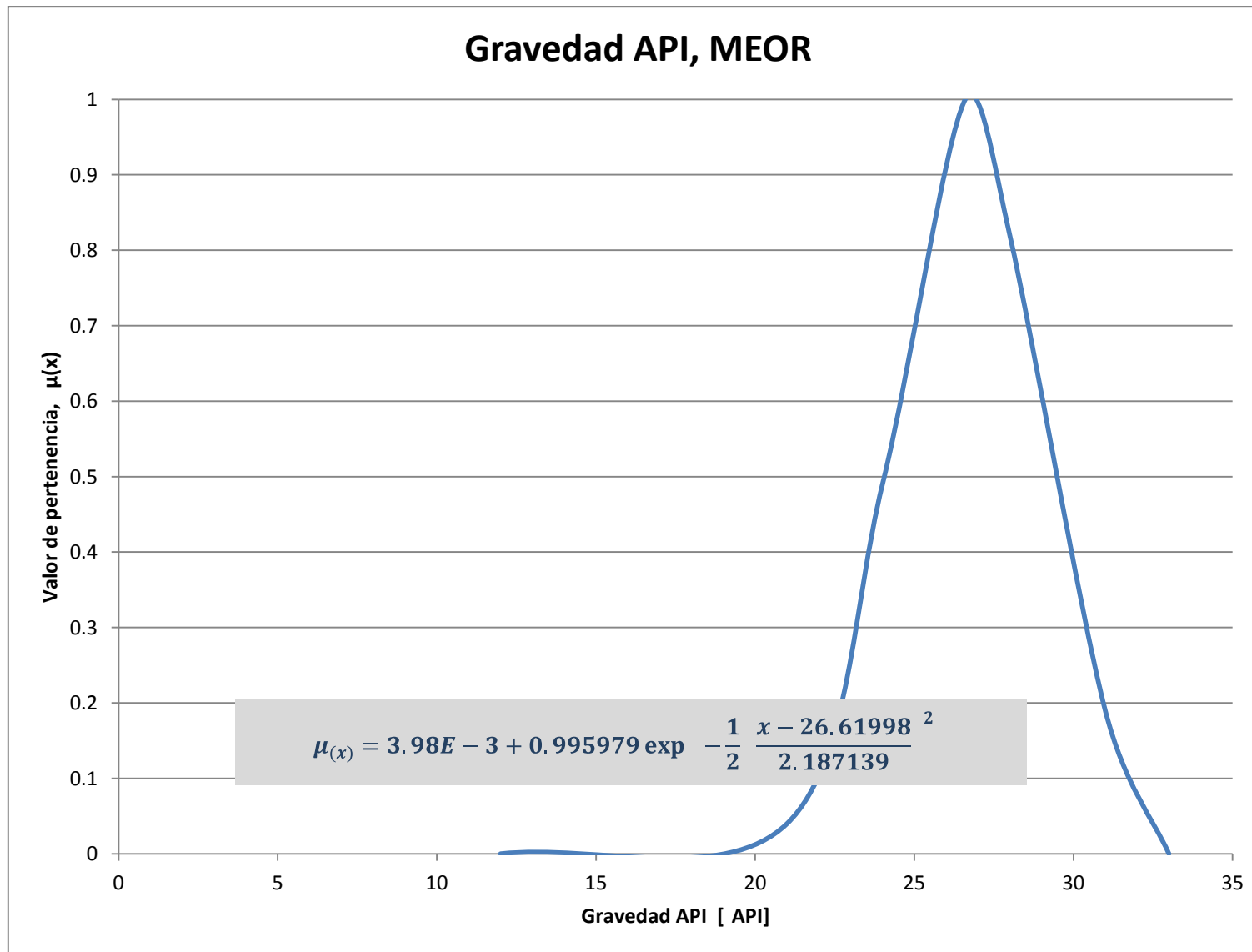


Figura 29. Función de pertenencia para recobro microbial.

Propiedad: Gravedad API.

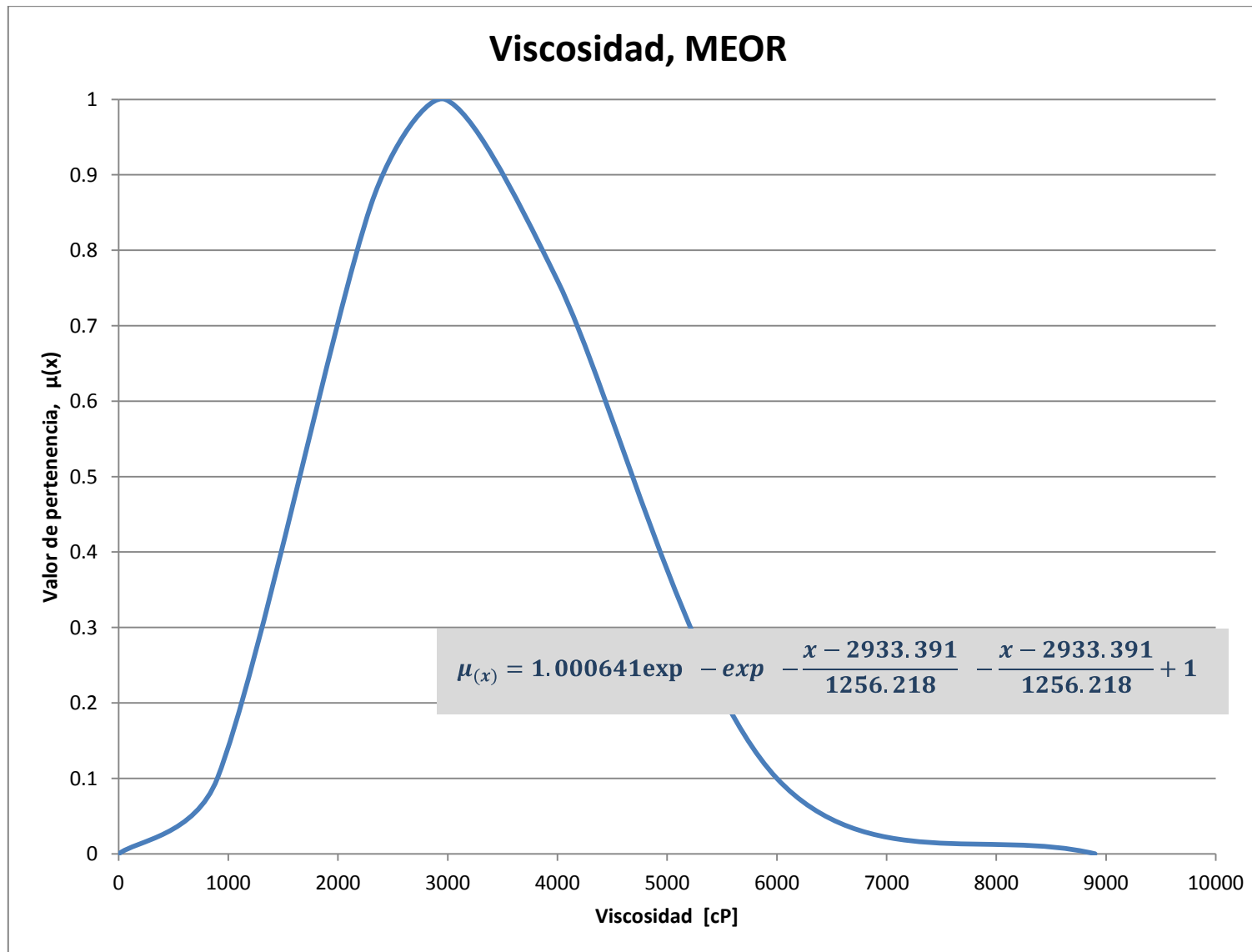


Figura 30. Función de pertenencia para recobro microbial.

Propiedad: Viscosidad.

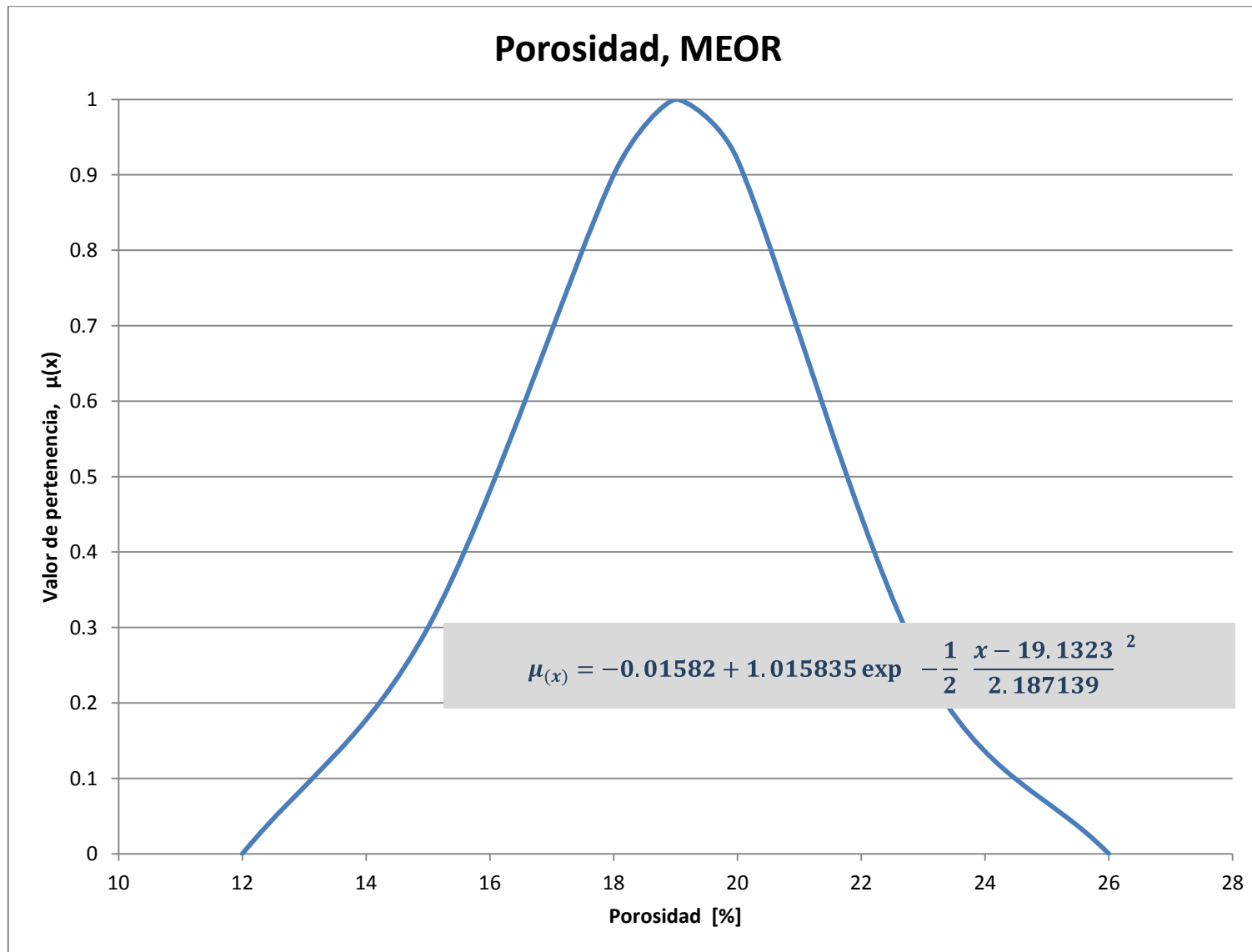


Figura 31. Función de pertenencia para recobro microbial.

Propiedad: Porosidad.

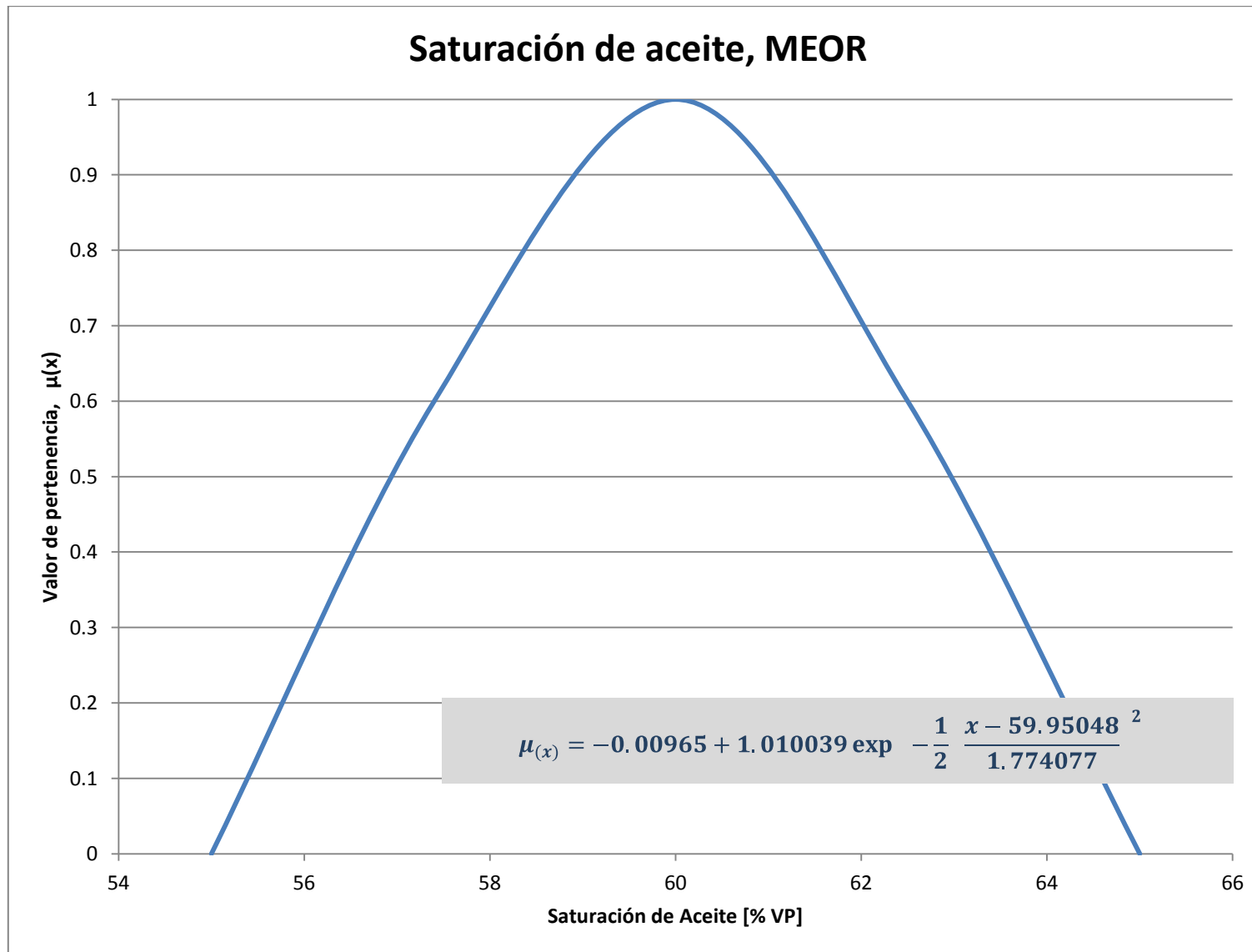


Figura 32. Función de pertenencia para recobro microbial.

Propiedad: Saturación de aceite.

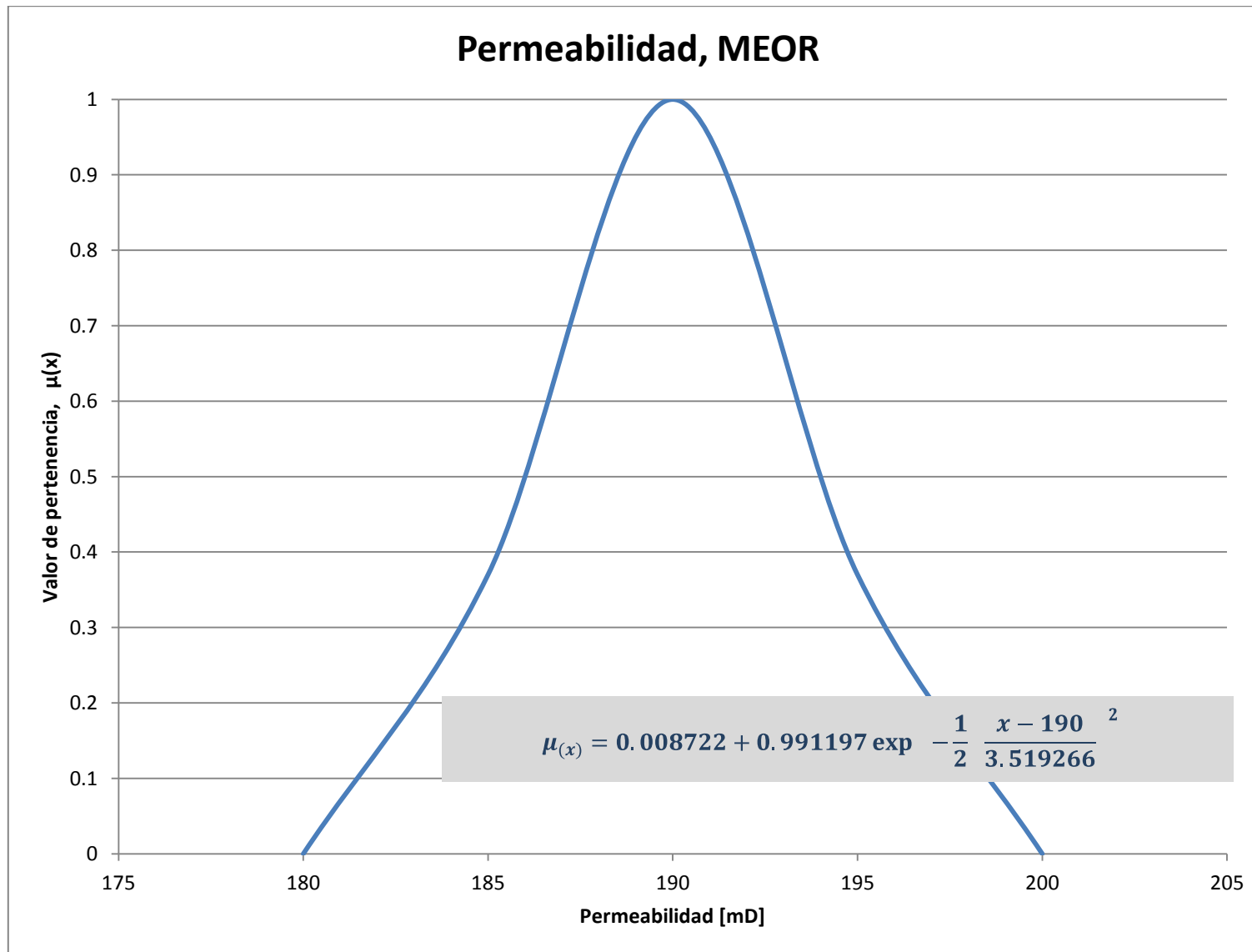


Figura 33. Función de pertenencia para recobro microbioal.

Propiedad: Permeabilidad.

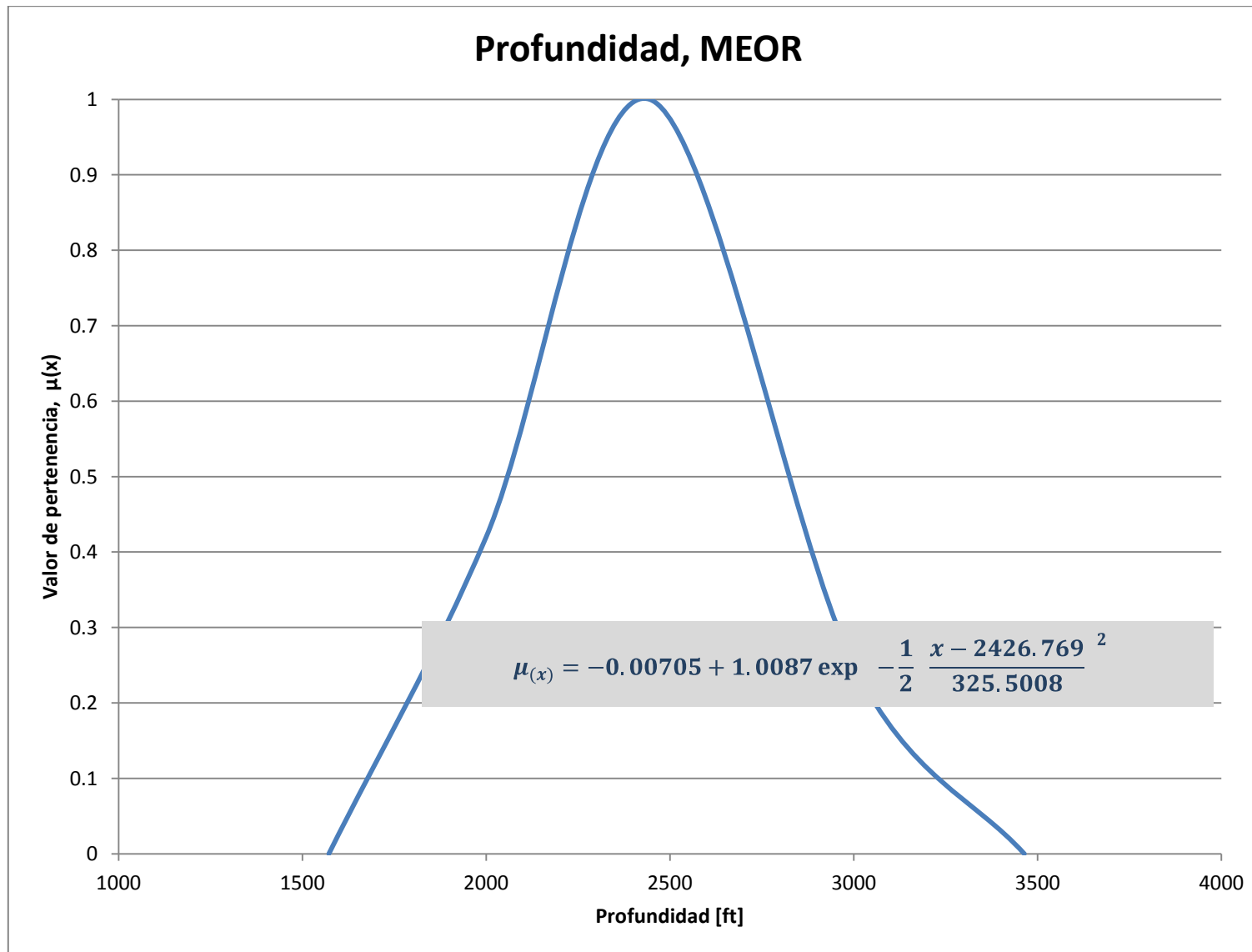


Figura 34. Función de pertenencia para recobro microbial.

Propiedad: Profundidad.

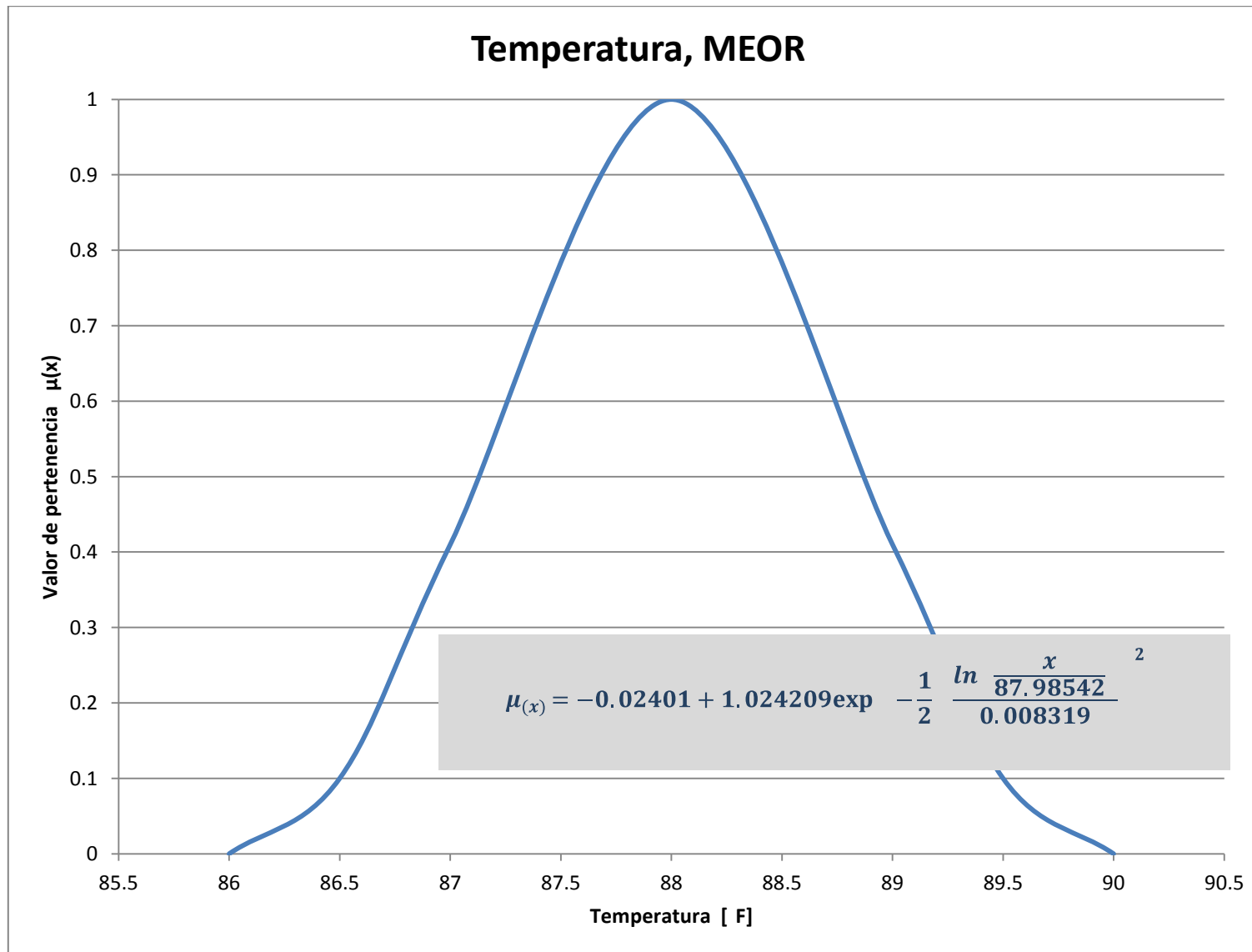


Figura 35. Función de pertenencia para recobro microbial.

Propiedad: Temperatura.

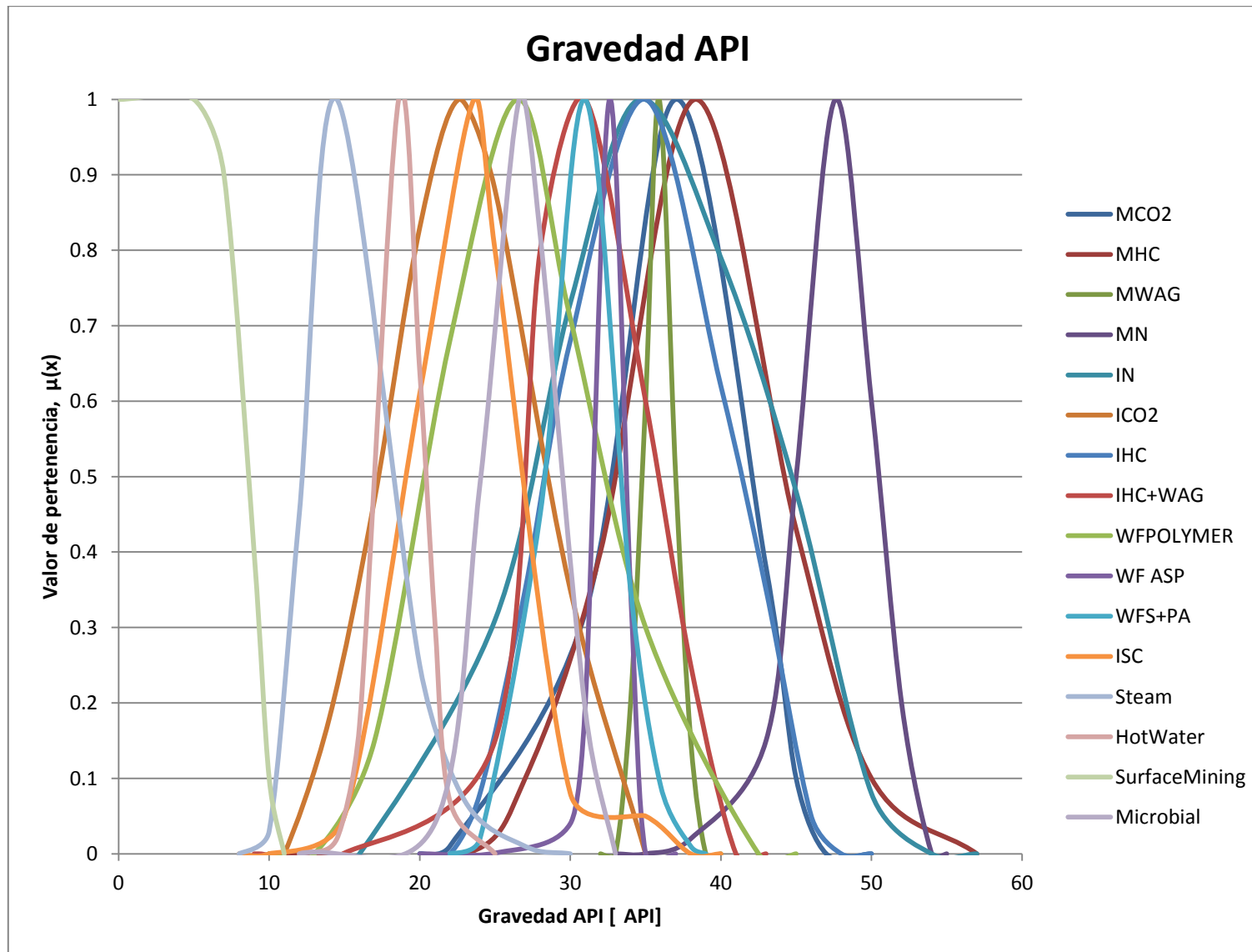


Figura 36. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Gravedad API

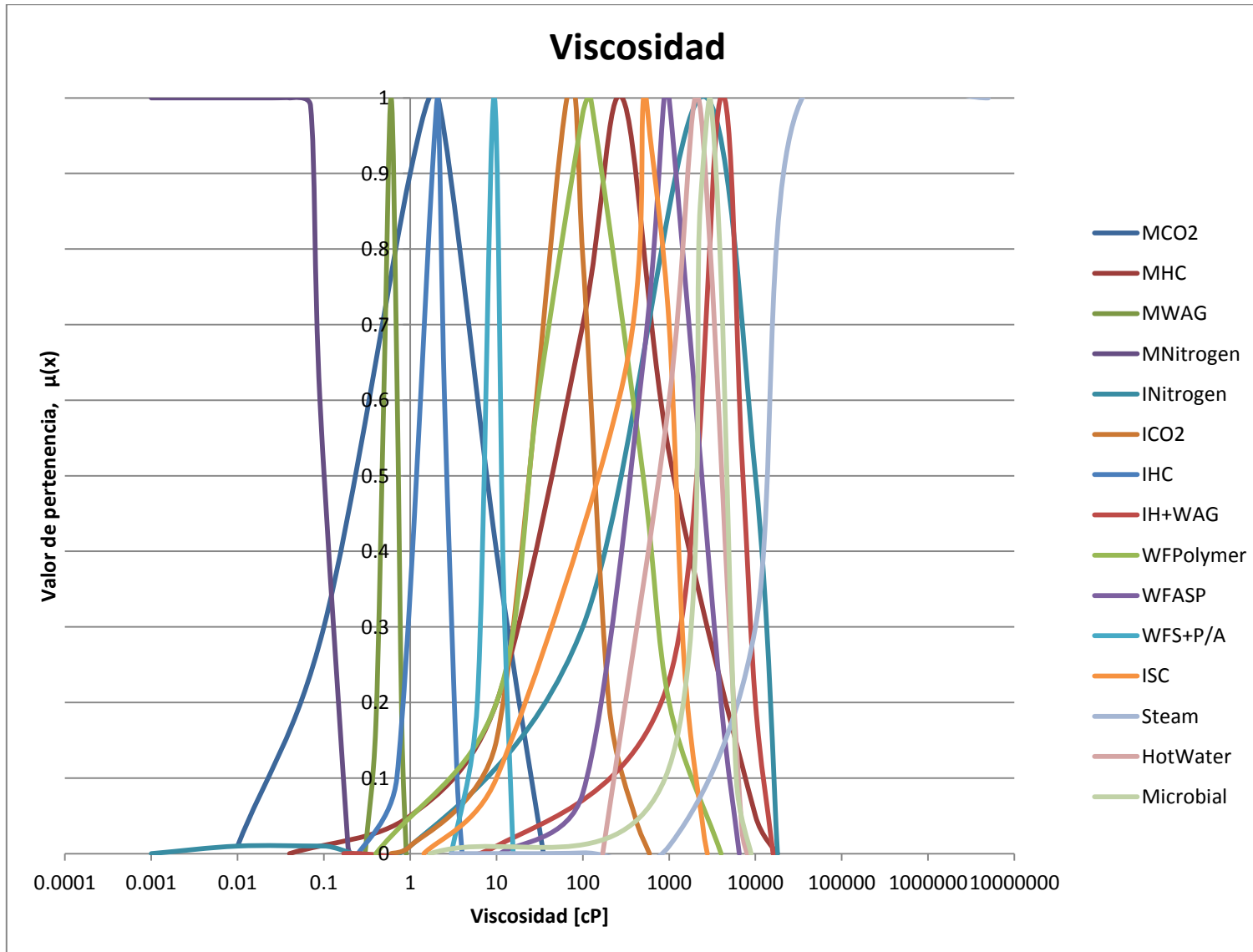


Figura 37. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Viscosidad.

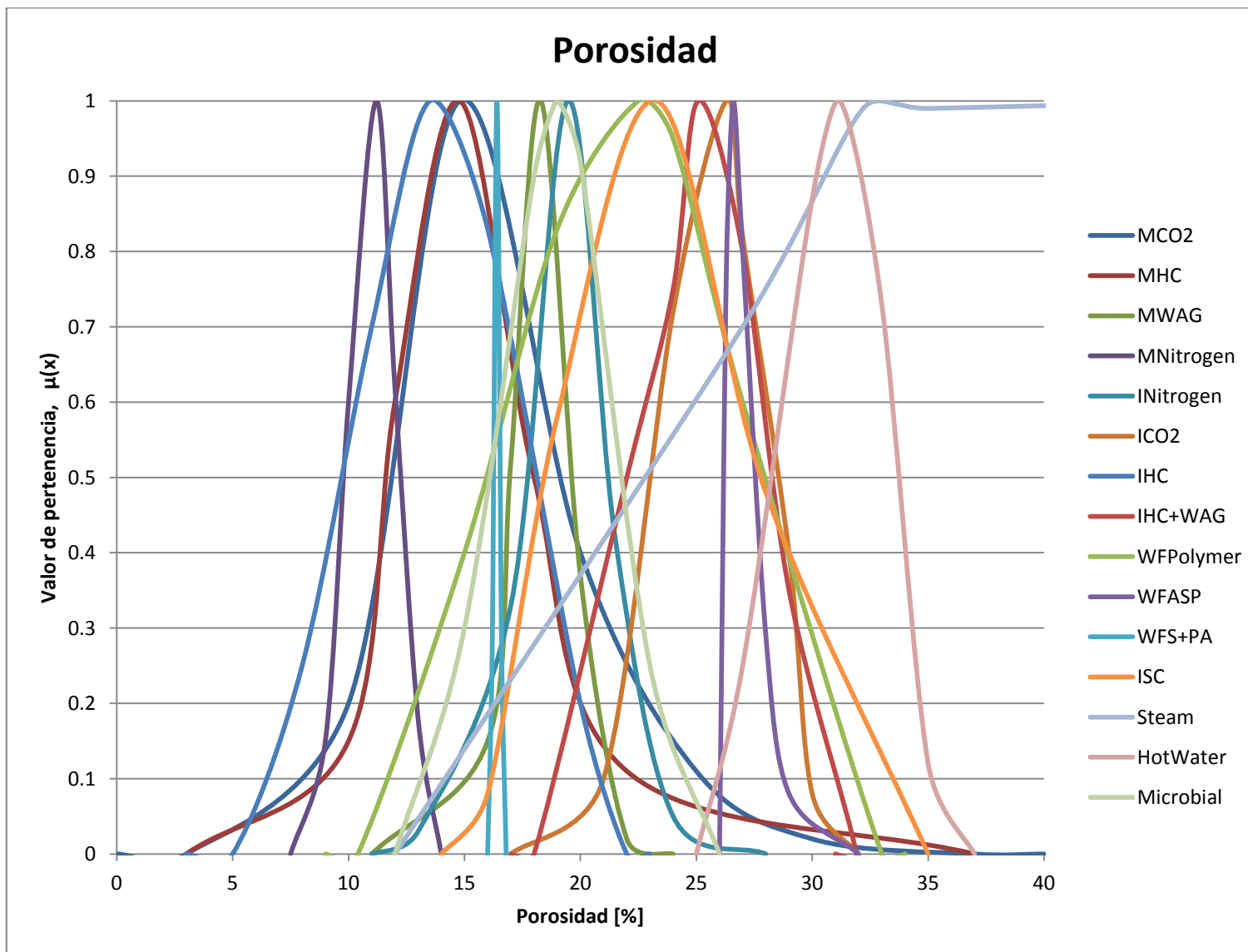


Figura 38. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Porosidad.

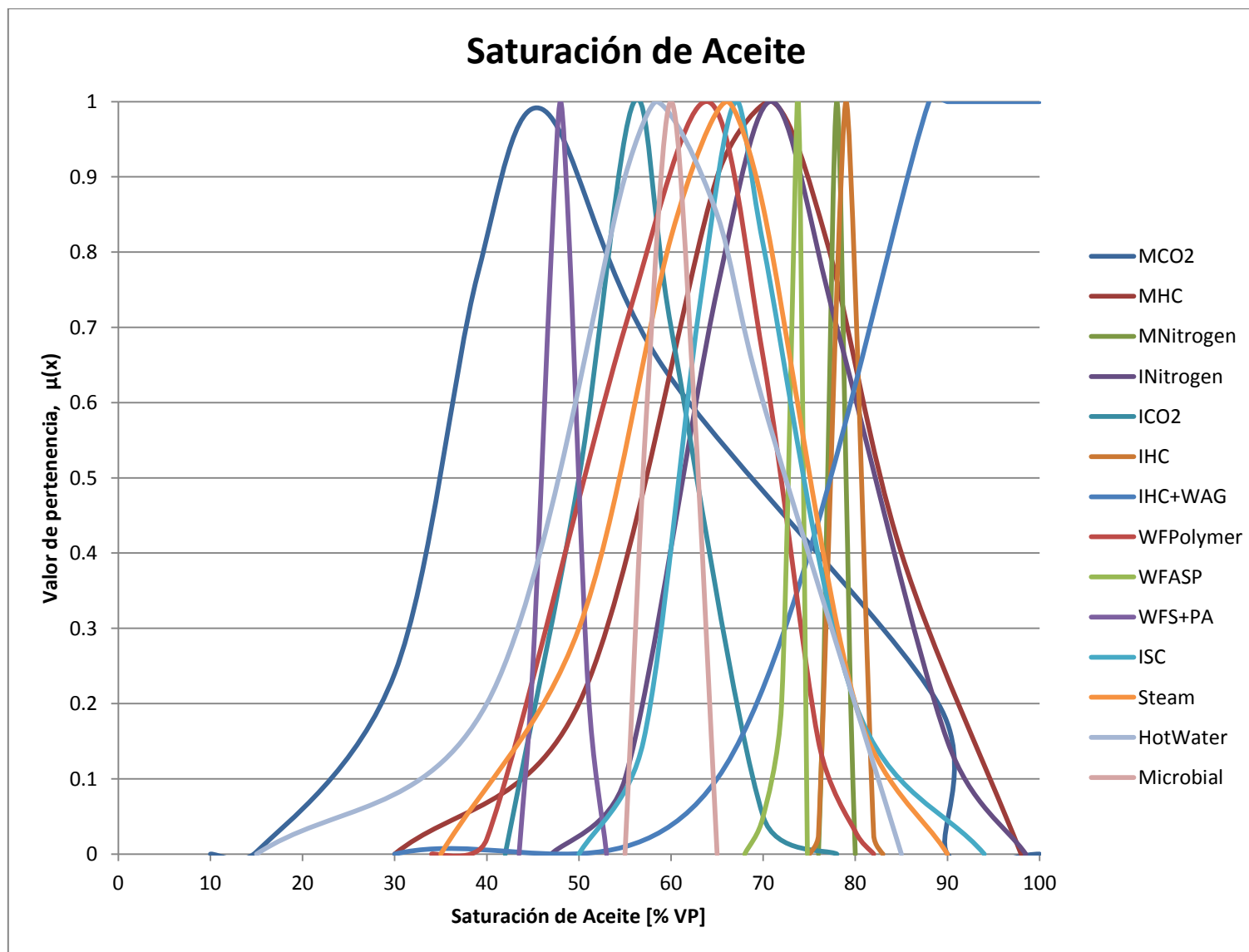


Figura 39. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Saturación de aceite.

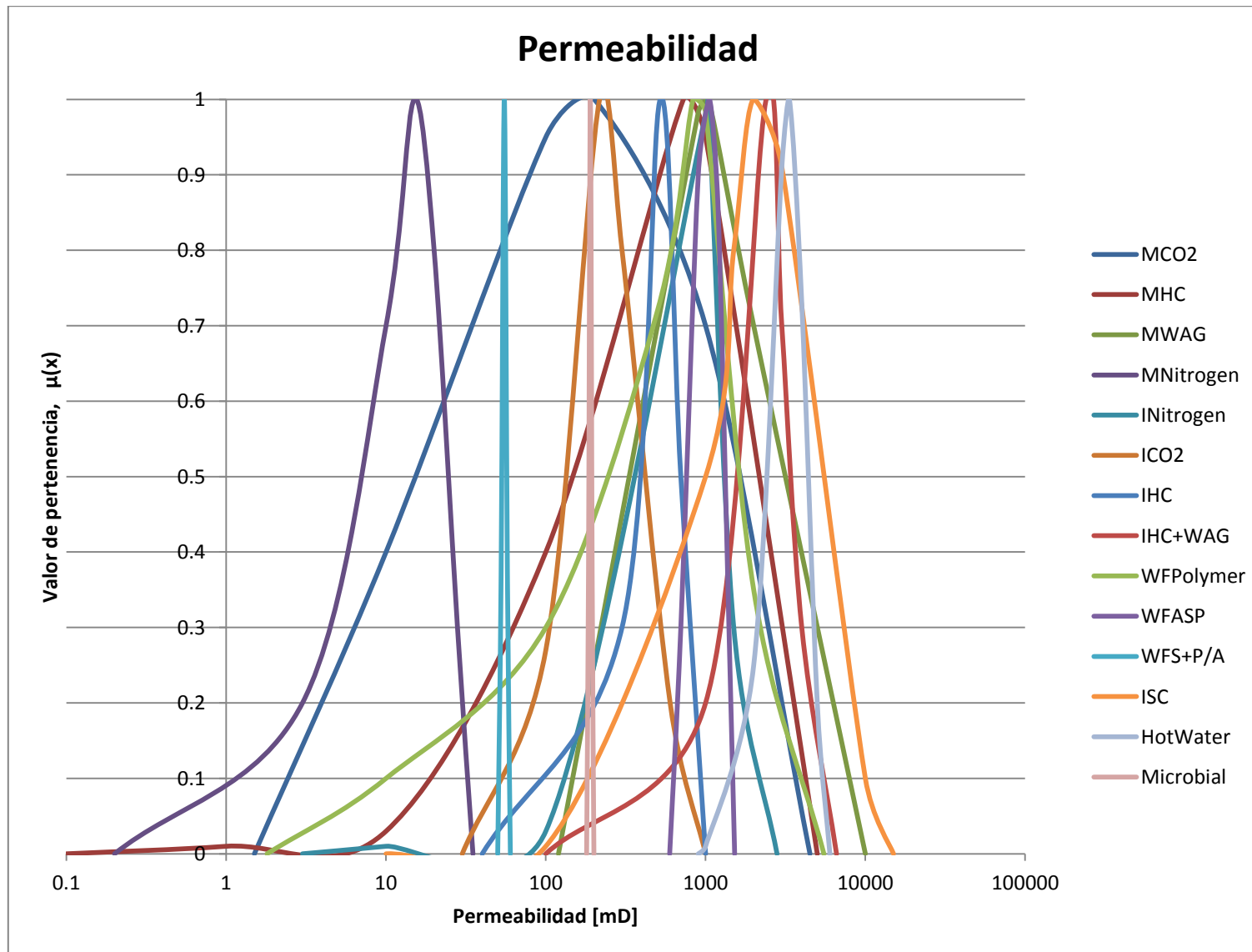


Figura 40. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Permeabilidad.

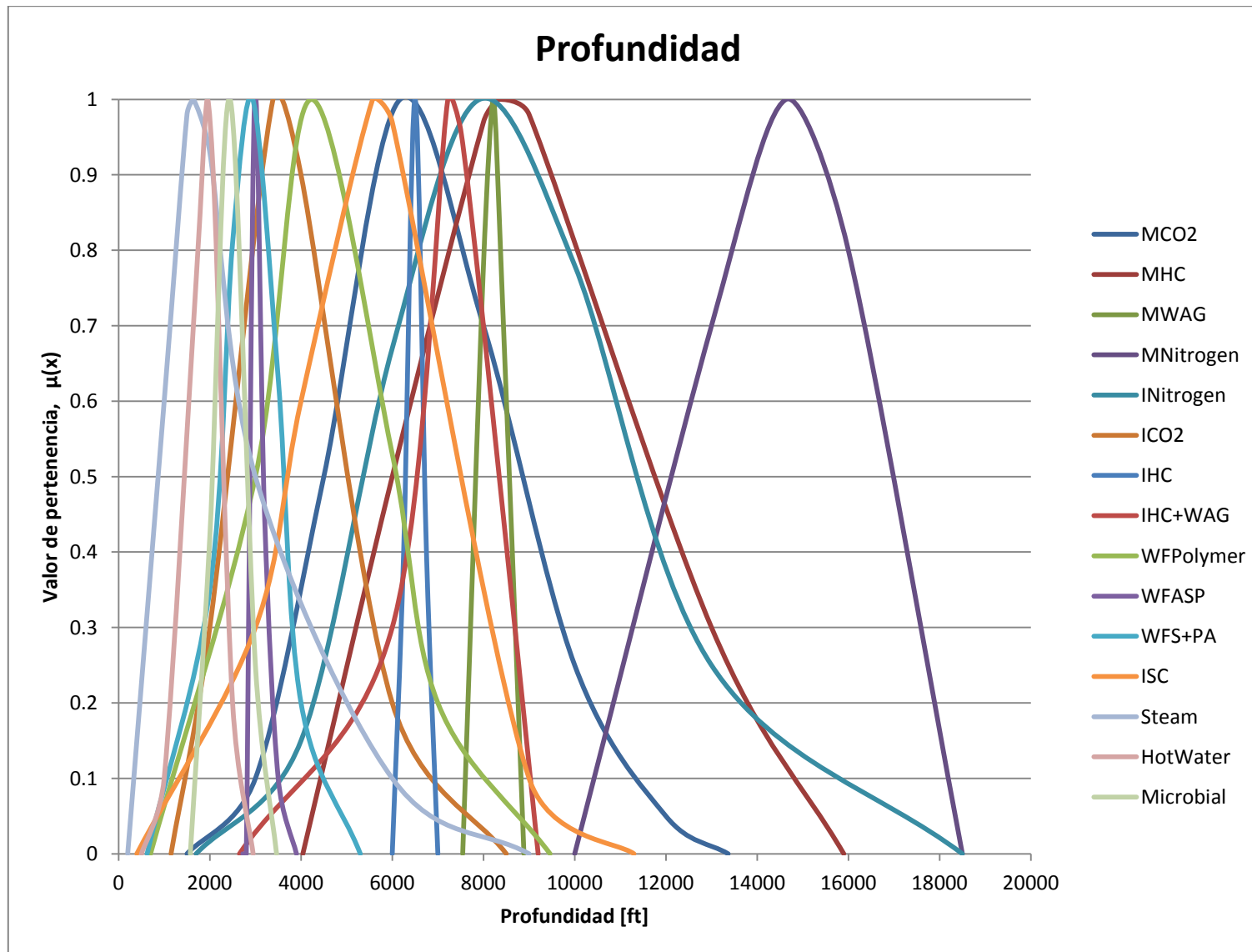


Figura 41. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Profundidad.

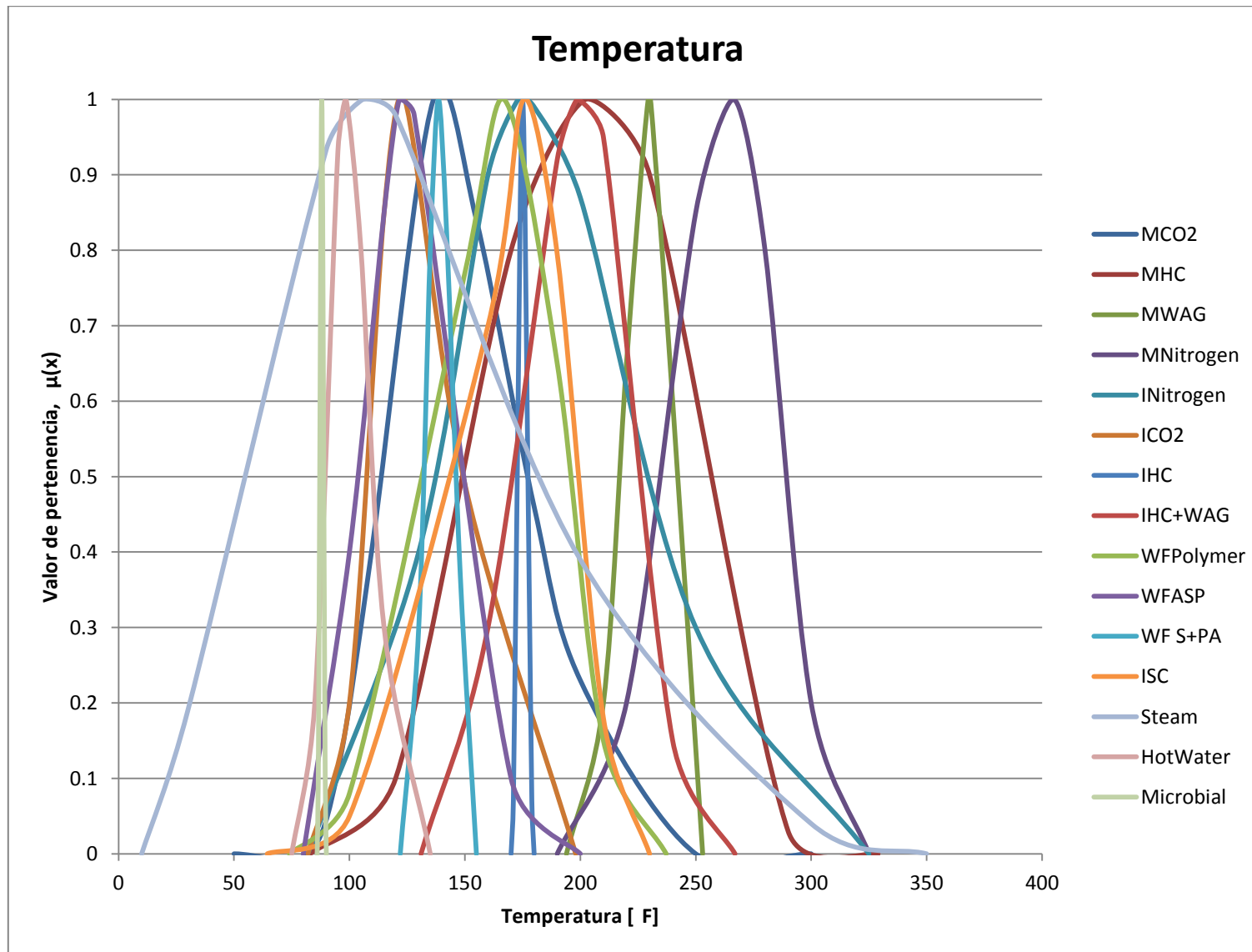


Figura 42. Funciones de pertenencia usadas por el Fuzzy Logic EOR Screening Expert. Propiedad: Temperatura.

ANEXO B. MANUAL DEL USUARIO

A continuación se presenta un pequeño manual de usuario que describe como instalar y usar el sistema experto Fuzzy Logic EOR Screening Expert.

Fuzzy Logic EOR Screening Expert

V 1,0

- ✓ Selección de métodos de recobro mejorado
- ✓ 16 Métodos diferentes disponibles
- ✓ Novedosa metodología de selección
- ✓ Interfaz práctica y explícita
- ✓ Gráficos diseñados para facilitar el análisis



Manual del Usuario



Fuzzy Logic EOR Screening Expert

V 1,0

Fuzzy Logic EOR Screening Expert



© 2011 Digitoil Ltda. - Universidad Industrial de Santander.

Fuzzy Logic EOR Screening Expert

NOTAS:

Propiedades críticas

Tanto para el Quick Report de la pestaña MAIN como para los métodos seleccionados en la pestaña ALTERNATIVES se presentan las propiedades que influyeron negativamente en el puntaje final de las técnicas seleccionadas.

Las propiedades listadas son aquellas que obtuvieron un puntaje inferior a 0,5.

Gráficos

Con el fin de facilitar el análisis, es posible visualizar cada gráfico de la pestaña ALTERNATIVES en una ventana emergente; para esto, simplemente hacer click en la vista previa de cada gráfico.

Requerimientos del sistema:


- Windows XP o superior
- 512 MB RAM (1 GB recomendado)
- 60 MB espacio libre en disco duro
- Unidad de DVD
- Procesador 1.5 GHz o superior (64 ó 32 Bits)
- Impresora (opcional)
- Librería .NET 4 FrameWork (incluida)

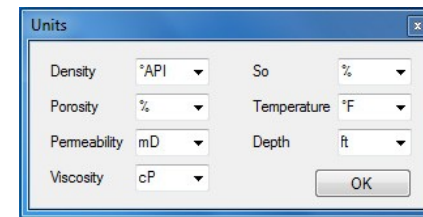
Instalación de librerías .NET 4 Framework®

Para el funcionamiento adecuado del sistema experto, es necesario contar con la versión más actualizada de las librerías .NET Framework®. Estas librerías están disponibles de manera gratuita en el sitio web de descargas de Microsoft®

Para instalar la librería:

1. Ejecutar como administrador el instalador de la librería.
Unidad de DVD/Soporte/dotNetFx40_Full_x86_x64.exe
2. Aceptar términos de la licencia y dar click en instalar.
3. Finalizar instalación.
4. Reiniciar

La ventana de conversión de unidades es visualizada por medio de dar click en el botón 



Luego de seleccionar el tipo de unidad deseado, dar click en el botón OK.

A continuación, introducir la información en la casilla correspondiente. Al concluir esto, se activará el botón “Analyze”; dar click en este y esperar un par de segundos mientras el sistema concluye el análisis.

OVERVIEW: Se da una descripción detallada de los resultados del análisis, se presenta el puntaje total de cada método de recobro mejorado y se destacan las técnicas mas viables.

ALTERNATIVES: Se visualiza una descripción de la selección de los métodos con los tres puntajes mas altos, por medio de gráficos, se analizan las diferentes propiedades una a una y su evaluación.

¿Como llevar a cabo la selección?

Para lograr una evaluación completa, es necesario contar con la información necesaria para llenar las 7 propiedades; además de la información general del campo, de lo contrario el botón “Analyze” permanecerá inactivo.

Previamente a introducir los datos, se recomienda seleccionar el tipo de unidad para cada propiedad.








Instalación del Fuzzy Logic EOR Screening Expert®

El programa es un ejecutable directo (.exe) el cual no necesita un proceso de instalación complejo.

Para instalar el sistema experto:


1. Copiar la carpeta que contiene el ejecutable del programa.
Unidad de DVD/ Software
2. Pegar dicha carpeta en la ubicación deseada.
3. Abrir el ejecutable del programa
4. Introducir el código de licencia


Botones y funciones

-  **Nuevo:** Borra la información de todas las casillas y gráficos con el fin de iniciar un análisis con nueva información.
-  **Abrir:** Abre un proyecto existente y carga los vectores existentes en los gráficos.
-  **Guardar:** Guarda la información introducida y el análisis generado por el sistema experto.
-  **Conversión de unidades:** Implementa la conversión de unidades de campo, sistema internacional e ingles.
-  **Ayuda:** Proporciona ayuda sobre los diferentes métodos de recobro mejorado y la novedosa metodología de selección usada por el Fuzzy Logic EOR Expert.

 **Copiar grafico:** Copia el grafico actual al portapapeles.

 **Imprimir:** Imprime el grafico visualizado.

 **Analizar:** a partir de la información y los datos ingresados al programa, ejecuta una serie de procesos por medio de los cuales se selecciona el método de recobro mejorado mas factible para aplicar.

 **Limpiar:** Borra la información de todas las casillas y gráficos.

Secciones

MAIN: En esta sección se recopilan los datos de la compañía, fluido y yacimiento. Se da un reporte general de la(s) técnicas seleccionadas y algunas recomendaciones para continuar con la selección técnica de métodos de recobro mejorado.