Rev. Int. Contam. Ambie. 39, 429-448, 2023
https://doi.org/10.20937/RICA.54677

SISTEMA EXPERTO DIFUSO PARA LA CALIFICACIÓN PRELIMINAR DE PROYECTOS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO_2

Fuzzy expert system for preliminary qualification of carbon capture and storage projects

Silvia Raquel GARCÍA-BENÍTEZ* y José Henrique MARTÍNEZ-MENESES

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México.
*Autora para correspondencia: sgab@pumas.iingen.unam.mx

(Recibido: noviembre de 2021; aceptado: agosto de 2022)

Palabras clave: calentamiento global, almacenes geológicos, inteligencia artificial, lógica difusa.

RESUMEN

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC), como el proceso que separa el emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, lo transporta a un lugar de almacenamiento y lo aísla de la atmósfera a largo plazo, es una alternativa para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. La selección del sitio de captación-almacenamiento es una tarea compleja y multiparamétrica que requiere el manejo de un gran número de variables sobre el medio natural, la infraestructura y las repercusiones en el ambiente, entre otros parámetros, así como tomar en cuenta que el número de sitios de captura y almacenamiento a partir de los cuales es posible compilar experiencias para descartar o ratificar hipótesis, aún es reducido. Al respecto, en esta investigación se presenta un sistema experto difuso (SED) que ayuda a calificar la susceptibilidad de un contexto geográfico para el desarrollo de un proyecto de CAC con base en información preliminar del estado de la emisión, la disponibilidad de infraestructura para el transporte, el ambiente tectónico, las cualidades específicas de las formaciones geológicas involucradas y las condiciones geotérmicas y de presión, así como la hidrodinámica del sistema. El SED propuesto extrae las experiencias de expertos en el tema que han calificado entornos y jerarquizado su efectividad en la CAC y lo traduce en reglas claras que resultan en una calificación para cada sitio.

Keywords: global warming, geological storage, artificial intelligence, fuzzy logic.

ABSTRACT

Carbon dioxide capture and storage (CCS), as the process that separates CO_2 emitted by industry and energy-related sources, transports it to a storage site and isolates it from the atmosphere over the long term, is an alternative for stabilizing atmospheric concentrations of greenhouse gases. The selection of the capture-storage site is a complex and multiparametric task that requires handling a large number of variables on the natural environment, infrastructure, and repercussions on the environment, among other parameters, and considering that the number of capture and storage sites from which to collect experiences for discarding or ratifying hypotheses, is still minimal. In this research, a diffuse expert system (DES) that assists in qualifying the susceptibility

of a geographical context for the development of a CAC project, based on preliminary information on the state of the emission, the availability of infrastructure for transport, the tectonic environment, the specific qualities of the geological formations involved, the geothermal and pressure conditions, as well as the hydrodynamics of the system, is presented. The proposed DES extracts the experiences of experts on the subject who have rated environments and prioritized their effectiveness in CAC and translates them into clear rules that result in a rating for each site.

INTRODUCCIÓN

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático incluye la captación y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC)[1] en el conjunto de medidas de estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (IPCC 2005, GCCSI 2020). La CAC es flexible (sobre todo respecto de los cambios sociales, financieros y legislativos necesarios para su adopción), por lo que determinar un método de implantación, tecnológicamente asequible y sustentable, podría significar su instauración como la opción más recurrida en el mundo, siempre y cuando se atiendan los aspectos que encarecen su materialización (Idowu et al. 2003, al-Fattah et al. 2011, GCCSI 2020).

Al decidir sobre las cualidades de un sitio para un proyecto CAC, es fundamental que se tome en cuenta el proceso completo (Bachu 2000, Bui y Mac-Dowell 2019): *i*) el inicio o fase de captura (en la que el CO_2 se separa del resto de los gases de combustión, buscando la más alta pureza); *ii*) la fase de transporte (actualmente los ductos son el medio más admitido y seguro para conducir al gas, facilitan y abaratan la fase) (Dávila-Serrano 2011, Bartolomé et al. 2011, Wilcox 2012, al-Baroudi et al. 2021, GCCSI 2020, Smith et al. 2021), y *iii*) la etapa final o fase de almacenamiento. En este sentido, el número de variables involucradas en la elección del sitio del proyecto es muy grande, y además sus fuentes son diversas y sus formatos diferentes. Por ejemplo, hablando del almacén, en general los sitios con potencial de almacenamiento geológico deben mostrar capacidad, inyectividad, confinamiento y estabilidad geológica, y deben excluirse otros usos (Ruiz et al. 2008, Newell e Ilgen 2019). Por ello, la evaluación de una cuenca debe contemplar aspectos relativos a actividad tectónica, tipo de sedimentos, regímenes geotérmicos e hidrodinámicos y factores hidrogeoquímicos, entre otros; asimismo, debe considerar la existencia de infraestructura industrial o de transporte que facilite la conducción y/o inyección del gas, y cerciorarse de que no se involucren aspectos sociales restrictivos, como comunidades protegidas, reservas del medio ambiente, etcétera. Con el gran número de variables y las condiciones en paralelo en que se interrelacionan, la toma de decisiones sobre el sitio más adecuado para desarrollar un proyecto CAC es una tarea extremadamente compleja (Boot-Handford et al. 2014, GCCSI 2020, Martínez-Meneses 2021).

En esta investigación se propone un sistema experto (SE) basado en lógica difusa (LD), es decir, un sistema experto difuso (SED), para calificar de manera preliminar sitios susceptibles a convertirse en proyectos CAC por medio de simulaciones de escenarios en un lenguaje habitual para la mayoría de los expertos y administradores implicados en la toma de decisiones. Se ha comprobado que los SED son herramientas valiosas para formular diagnósticos sobre métodos y estrategias de control (Chen y Pham 2001, Ross 2010, Nojedehi y Nasirzadeh 2017), y la idea de utilizar un SED para la CAC es extraer la experiencia y el conocimiento humanos y transferirlos a una computadora que maneje la vaguedad, la incertidumbre (natural en mediciones y deducciones) y el razonamiento en gran escala para emitir una calificación (Hájek y Novák 2003, Ruvalcaba-Coyaso y Vermonden 2015, Gutiérrez y Ferreira 2020).

El SED propuesto en esta investigación califica la susceptibilidad de un sitio (contexto geográfico) para el desarrollo de un proyecto CAC con base en información preliminar del estado de la emisión, la disponibilidad de infraestructura para el transporte, el ambiente tectónico y las cualidades específicas de las formaciones geológicas involucradas, así como las condiciones geotérmicas de presión e hidrodiná-

[1]La CAC es una técnica que consiste en capturar el CO_2 producido en centrales eléctricas o plantas industriales, para luego almacenarlo en formaciones geológicas del subsuelo. No debe confundirse con el secuestro de carbono, que consiste en eliminar el carbono presente en la atmósfera mediante procesos naturales como el crecimiento de bosques.

micas. La experiencia y la inteligencia humana se almacenan en forma de conjuntos difusos y reglas Si-Entonces a partir de las cuales el SED otorga a los usuarios "consejos" específicos de salida en forma de evaluación. Para la calificación del sitio se integran principalmente las recomendaciones de Bachu (2000), CIEMAT (2007), Dávila-Serrano (2011) y el NETL (2017), centrando el objetivo del análisis en las cuencas sedimentarias por su potencial como alternativa más destacada para almacenar CO_2.

Este SED es suficientemente flexible y robusto para ser aplicado en la calificación de diversas geosituaciones y regiones del mundo. Aceptar o rechazar un lugar demanda especificar, perfeccionar y analizar varias ideas y jerarquizarlas de acuerdo con las ventajas que representan respecto de una necesidad específica, por lo que este SED está propuesto para ser escalado y, al integrar otros subsistemas, cubrir más aspectos, hacerlovde manera más profunda o considerar otro tipo de representaciones.

LÓGICA DIFUSA

Entre las herramientas fundamentales de la inteligencia artificial (IA) se encuentran los algoritmos genéticos (AG), las redes neuronales (RN) y la lógica difusa (LD). Esta última es una herramienta matemática que imita la forma en que el ser humano recibe informaciones, razona y concluye sobre éstas para actuar en consecuencia. En comparación con la lógica tradicional, la principal ventaja de la LD es que evita la determinación de pertenencia absoluta a un conjunto. En la LD se asigna a los elementos un grado de membresía a todos los conjuntos que conforman el universo de discurso. Este grado de membresía va de 0 a 1, considerando cualquier valor real en este rango

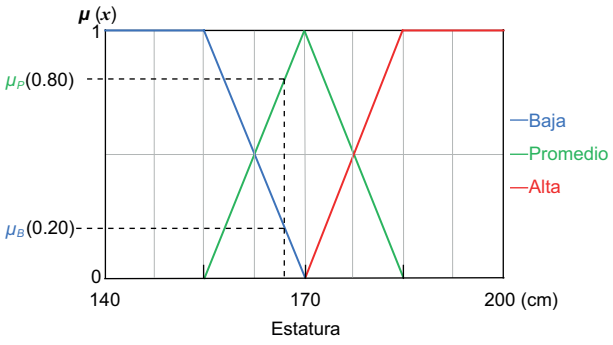


Fig. 1. Estatura de un ser humano en conjuntos difusos. El ejemplo es para un sujeto de 166 cm de altura, perteneciente en 0.8 al conjunto Promedio, en 0.2 al conjunto Baja, y en 0.0 al conjunto Alta.

(Ruvalcaba-Coyaso y Vermoden 2015, Salais-Fierro et al. 2020, Dawood et al. 2021). Por ejemplo, si se considera que la altura promedio de un ser humano es 170 cm, en la lógica clásica aquella persona que mida 166 cm no tiene una altura promedio. Para la LD, una persona que mida 166 cm pertenece en grados de membresía 0.80 al conjunto altura promedio, 0.20 al conjunto baja y 0.00 al conjunto alta (**Fig. 1**).

Los conjuntos difusos, que son la materia prima de la LD, agrupan una serie de valores de un universo de discurso (del contexto del cual se está hablando) y se representan con una función de membresía que sirve para definir grados de pertenencia (μ). Las funciones de mayor aplicación son las de forma triangular y las trapezoidales, aunque se admite cualquier forma funcional que se ajuste a los requerimientos del diseñador del sistema. A cada conjunto se le coloca una etiqueta, que es la expresión lingüística que caracteriza a ese agregado de valores (Arslan y Kaya 2001). En la construcción de un sistema de LD es fundamental la elección de las variables lingüísticas (cuyos posibles valores se pueden traducir a palabras que describen el estado de un objeto o fenómeno y pueden representarse mediante conjuntos difusos). Estas variables y sus etiquetas lingüísticas deben trabajar a favor de la representación del proceso o fenómeno y es fundamental que su dominio corresponda a los intereses de la aplicación (García et al. 2014).

En la operación de un sistema de LD se transita por tres etapas: fuzzificación, inferencia y defuzzificación. En la fuzzificación, a un valor dado del universo de discurso se le asigna un grado de membresía a todos los conjuntos difusos que componen una variable lingüística (Chen y Pham 2001, Kayacan y Khanesar 2015, Thaker y Nagori 2018). En la inferencia se procesa la información de entrada a partir de la evaluación de reglas si-entonces y de la agregación. Esta etapa puede ejecutarse por diferentes métodos. En esta investigación se recurrió a la inferencia de Mamdani (Correa-Henao 2004, Calzada-Gómez 2015, Chacón et al. 2018).

El bloque de reglas se diseña con base en la combinación de todas las funciones de membresía de la(s) variable(s) de entrada con las funciones de membresía de la(s) variable(s) de salida. En la evaluación de reglas se relacionan las entradas fuzzificadas con las salidas deffuzificadas para asignar el grado de membresía de la salida, con base en los grados de membresía de las entradas. En este paso se usan los operadores de Zadeh (Macián-Sorribes 2012, Cabrera-Llanos et al. 2019) donde el operador "Y" indica que el valor de membresía del consecuente será igual al menor valor de membresía de

los antecedentes y para el operador "O" el valor de membresía del consecuente será el mayor valor de membresía de los antecedentes. Como es posible que varias reglas tengan el mismo consecuente con un grado de membresía diferente, el criterio es seleccionar los mayores grados de pertenencia. En la agregación se realiza el proceso de adición de las salidas de todas las reglas; es decir, se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes para obtener un único conjunto difuso para cada variable de salida que pueda finalmente ser sujeto a la etapa de defuzzificación (Chen y Pham 2001, Liao et al. 2005, Calzada-Gómez 2015).

La etapa final es la deffuzificación, en la que la salida difusa se transforma en un valor numérico puntual que resulta del cálculo sobre el área obtenida del proceso de agregación. En esta investigación se usó la definición del centro de gravedad del área (López-García 2002, Singh et al. 2013, Amaitik y Buckingham 2017). Gráficamente, el proceso completo se muestra en las **figuras 2**, **3** y **4**. Considérese el ejemplo del proceso de lavado de una máquina en el que se usan dos variables de entrada (cantidad de suciedad y tipo de suciedad) para determinar el tiempo de lavado ideal (salida) para cada condición de carga de ropa.

EMULACIÓN DE EXPERTOS HUMANOS CON SED

Si en la evolución de un fenómeno se presentan estados distintivos que escapan a la generalidad, el desarrollo de modelos funcionales que consideren salvedades es una tarea complicada. Las estructuras rígidas del cómputo tradicional colapsan ante la presencia de dichos estados atípicos. Un número de estados posibles que se encuentra en un rango muy amplio conduce a la intratabilidad algorítmica porque el número de condiciones está asociado en una relación uno a uno; es decir, a cada dato del problema (Kunhimangalam et al. 2013, Nojedehi y Nasirzadeh 2017, Gutiérrez y Ferreira 2020).

Los sistemas expertos (SE) son soluciones computacionales que se prefieren cuando la tarea o el problema por resolver presentan tal grado de dificultad que resulta imposible o extremadamente complejo desarrollar un modelo cuantitativo o algorítmico sobre los mismos (Thaker y Nagori 2018). Cuando el número de estados, condiciones, posibilidades y excepciones están dentro de rangos muy amplios, cuando hay inexactitud en los entornos del problema o el conocimiento está colmado de heurísticas y experiencias cotidianas, el SE representa una alternativa de modelado muy ventajosa.

La idea subyacente a un SE es que un experto humano puede dar respuestas a eventos distintivos justificándolas sin coherencia secuencial exacta, pero con criterios válidos y de manera inmediata una vez que ha analizado las condiciones que se presentan. Por ejemplo, al pasar una calle en fracciones de segundos decidimos, ante la llegada de un vehículo, si es posible o no cruzar. Esto es conocimiento heurístico, inmediato y válido, no algorítmico. Por otro lado, el SE ofrece ventajosas cualidades cuando no se conocen todos los estados, condiciones, posibili-

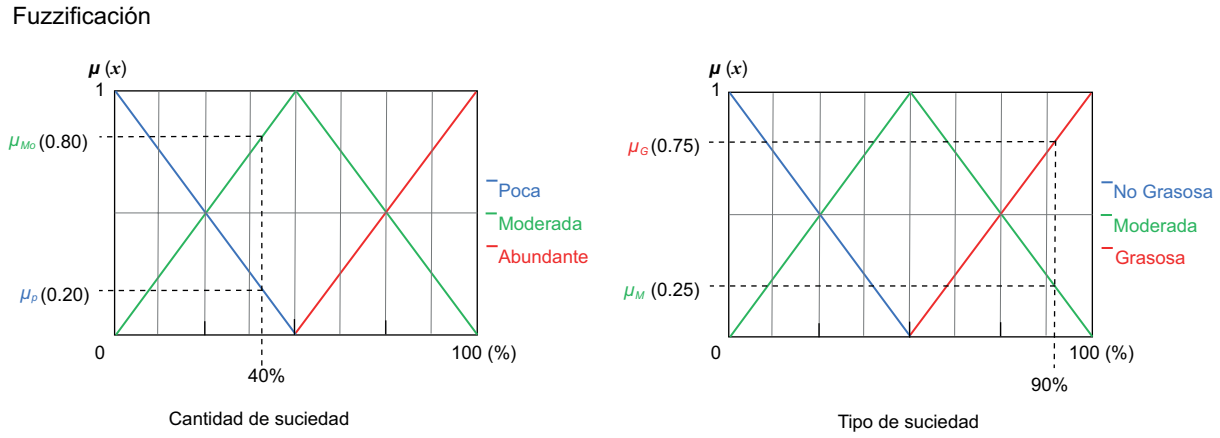
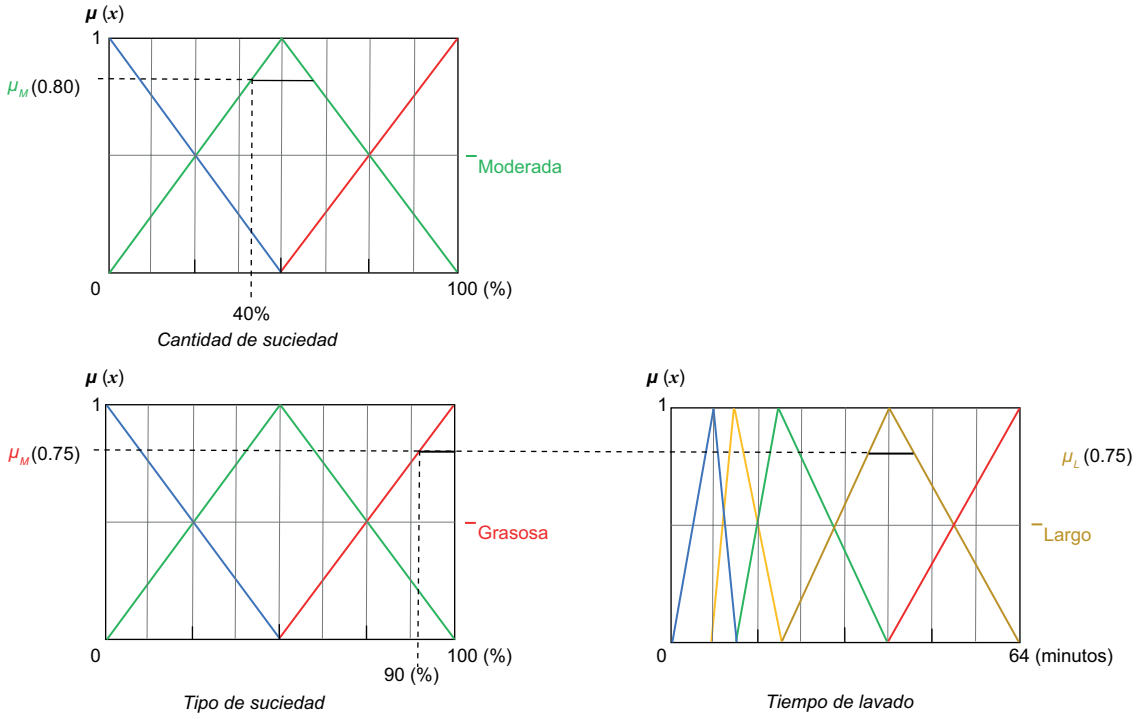


Fig. 2. Etapa de fuzzificación. Se presenta la membresía para una carga de ropa con (a) 40% de cantidad de suciedad y (b) 90 % de tipo de suciedad. Por cantidad de suciedad la carga de ropa $\mu_{Mo} = 0.8$ y $\mu_P = 0.2$ pertenece a los conjuntos Moderada y Poca, respectivamente, mientras que por tipo de suciedad la carga $\mu_G = 0.75$ y $\mu_M = 0.25$ pertenece a los conjuntos Grasosa y Moderada (modificado de Agarwal et al. 2016).

Inferencia: Evaluación de Reglas

Regla **A :SI** *Cantidad de suciedad* es Moderada **Y** *Tipo de suciedad* es Grasosa **ENTONCES** *Tiempo de lavado* es Largo



Inferencia: Agregación

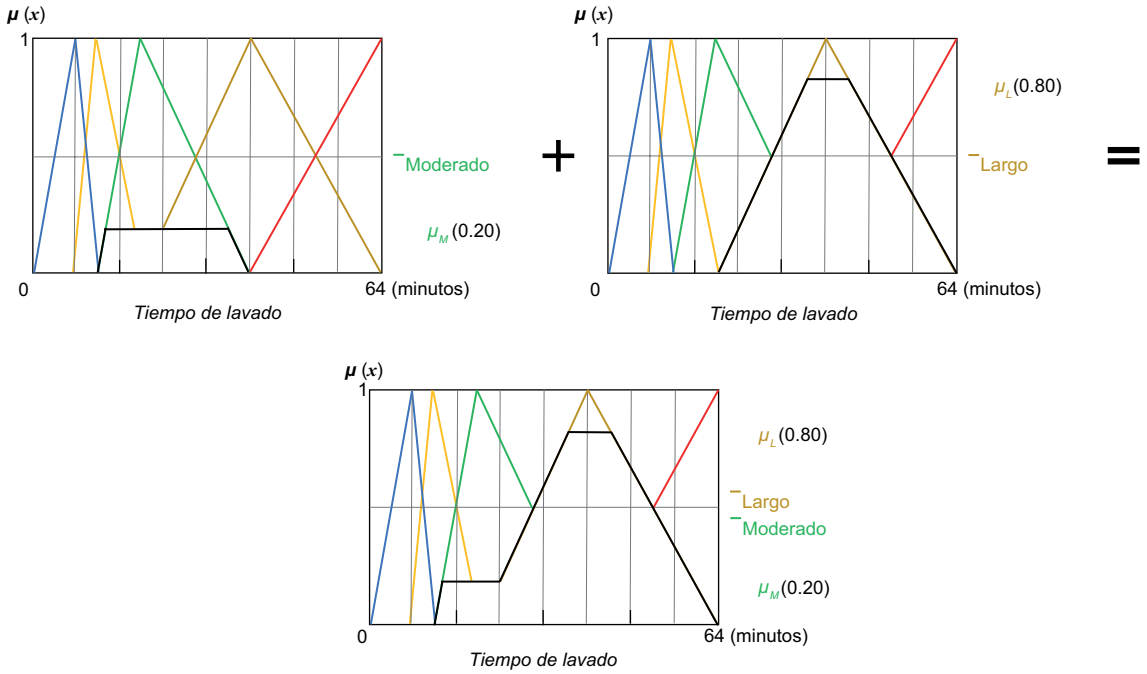


Fig. 3. Etapa de inferencia y agregación. Se muestra la evaluación de una de las reglas del Bloque de reglas utilizando el operador "Y" (modificado de Agarwal et al. 2016).

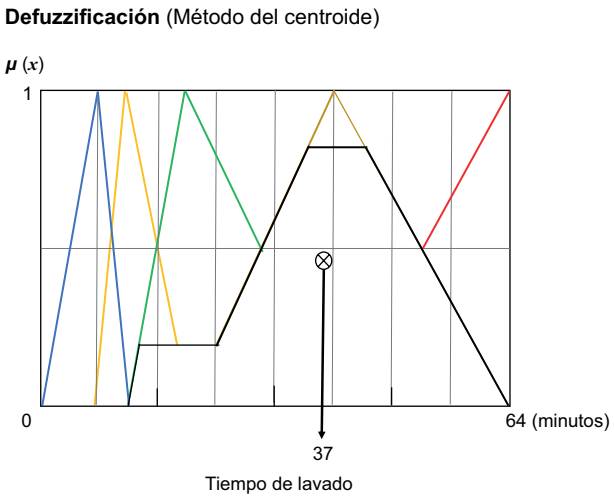


Fig. 4. Etapa de defuzzificación. Una vez obtenida la figura compuesta en la etapa de agregación, se obtiene el centroide para defuzzificar la salida, es decir, convertir la conclusión en un número del eje de la variable, en este caso tiempo de lavado (modificado de Agarwal et al. 2016).

dades o excepciones a los puede llegar un fenómeno, es decir, cuando el dominio no está completamente delimitado.

El objetivo de un SED es razonar como lo hace un experto humano, reemplazándolo en la toma de decisiones o en tareas que exigen, antes de cualquier acción, el razonamiento inteligente sobre un cúmulo de conocimientos históricos considerados como aprendidos. Estos conocimientos se consideran válidos y se formalizan a través de modelos lógicos difusos que al final de su recorrido permiten inferencias hacia conclusiones nuevas frente a otras ya existentes (Ross 2010). Un SED bien entrenado razona como lo hace un especialista. Los expertos tienen registradas experiencias pasadas, normas, códigos, signos, pruebas e información, que en el momento del requerimiento son consultados para inferir la conclusión. Lo sorprendente del pensamiento humano es que esas búsquedas se hacen para respuestas inmediatas con alto grado de certidumbre. Cuando no hay información disponible o ésta no es descifrable para someterla al rigor de los formulismos de sus conocimientos, el experto advierte que no puede dar respuesta alguna, mientras que un SED puede concluir con suficiencia en ese mismo ambiente vago o incompleto.

Básicamente, un sistema experto tiene en su arquitectura una base de conocimientos y un motor de inferencia. El primero tiene la información en forma estructurada, el segundo está representado

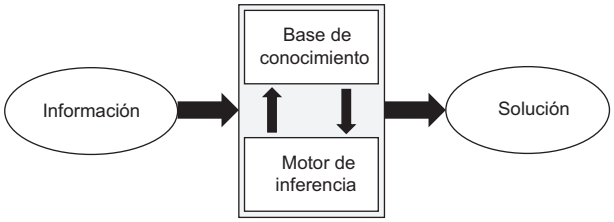


Fig. 5. Estructura de un sistema experto (modificado de Badaro et al. 2013).

por la lógica para relacionar esa información. Con los datos de entrada empieza a consultar la base de conocimientos para hilar conclusiones intermedias hasta llegar a un resultado final (**Fig. 5**).

La base de conocimiento es la parte del sistema que contiene, codificado, el conocimiento sobre el dominio. En el SED de esta investigación, esta representación se da con reglas difusas como las estructuras condicionales que relacionan lógicamente la información contenida en la parte del antecedente con otra información contenida en la parte del consecuente. En el motor de inferencia se modela el proceso de razonamiento, lo que le otorga la habilidad de explicar la relación entre la pregunta realizada y cómo se ha llegado a una conclusión. La interfaz para el usuario tiene un diseño altamente interactivo y sigue el patrón de la conversación entre seres humanos expertos (**Fig. 6**).

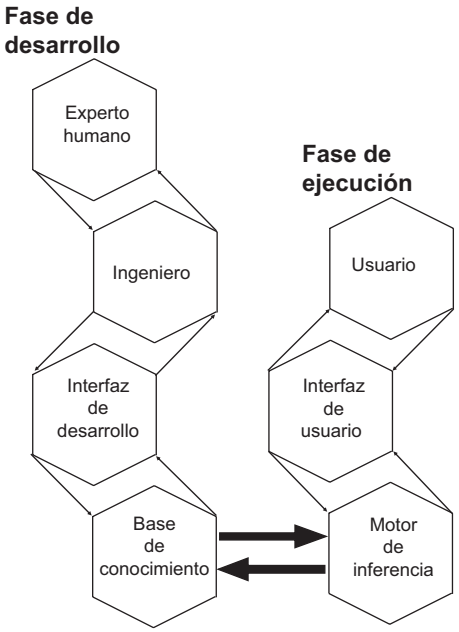


Fig. 6. Fases del desarrollo y ejecución (modificado de Badaro et al. 2013).

DISEÑO DEL SED PARA CALIFICAR SITIOS CAC

El SED que a continuación se detalla está trazado de acuerdo con las recomendaciones de razonamiento de Bachu (2000), CIEMAT (2007) y Dávila-Serrano (2011). La aplicación está dirigida a desarrollos en cuencas sedimentarias; sin embargo, el método es aplicable a otras geocondiciones. Las variables de entrada que se consideran en esta propuesta son: (1) el nivel de emisión antrópica de CO_2, (2) la disponibilidad de infraestructura para el transporte del CO_2 del sitio de captura al sitio de almacenamiento, (3) el ambiente tectónico, (4) las cualidades de las formaciones almacén y sello, (5) las cualidades geotérmicas y de presión de la cuenca sedimentaria y (6) el régimen hidrodinámico gobernante en sitio. La salida es una calificación sobre la susceptibilidad del sitio para desarrollar proyectos CAC (**Fig. 7**). En esta calificación (de carácter preliminar y que requiere insumos mínimos para emitirse) no se consideran los factores hidrogeoquímicos, sociales, económicos ni legales, ya que éstos pertenecen a un proceso de argumentación más complejo que demanda entradas definidas en campañas de exploración agudas, así como reglas estructuradas con base en proyectos exitosos (documentados en su totalidad), informaciones que normalmente se obtienen cuando los sitios con mayores cualidades para desarrollar un proyecto han sido seleccionados.

Para caracterizar al nivel de la emisión antrópica de CO_2 se buscó la forma más simple para identificar el impacto de la industria fija en el punto definido como sitio de captura: por categoría respecto al volumen de emisiones a la atmósfera. De acuerdo con la clasificación de parques industriales propuesta por Nava-Jiménez (2014) se configuró la variable como un subsistema (**Fig. 8**) que se alimenta de (*i*) el tamaño del complejo industrial, (*ii*) la fuerza laboral en el complejo y (*iii*) el giro preponderante.

El razonamiento humano se completa con la asignación de las etiquetas lingüísticas de la salida (nivel de la emisión Irrelevante, Notable y Extremo) y la construcción del bloque de reglas. Después de analizar la congruencia de las combinaciones, resultaron 37 de éstas posibles. En el **cuadro I** se muestran algunos ejemplos de las combinaciones consideradas y descartadas.

Entre las variables de mayor importancia están las que califican las propiedades de las formaciones de acuerdo con su papel como almacén o sello. En este caso se propone un subsistema con tres entradas: *i*) la calificación de la calidad de la formación almacén, *ii*) la calificación de la calidad de la formación sello y *iii*) la calificación de la configuración geométrica de las formaciones. Las formaciones, categorizadas con la porosidad y permeabilidad representativa y la homogeneidad, son etiquetadas de acuerdo con los valores de propiedades entre los rangos considerados

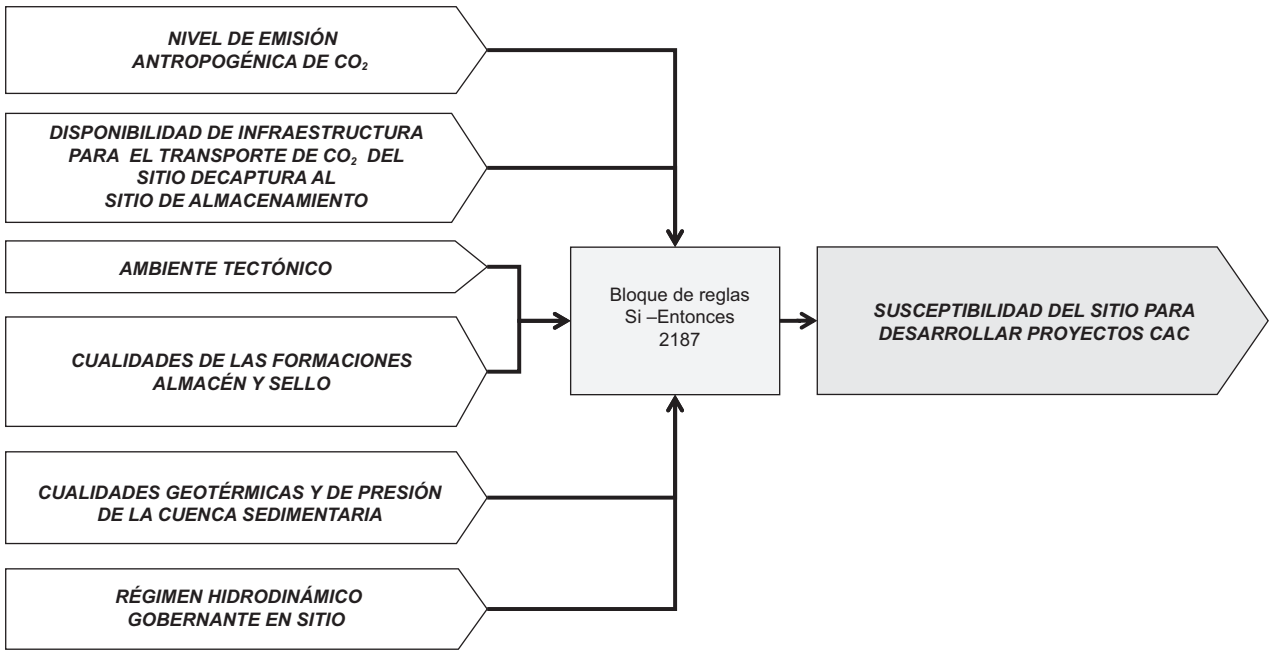


Fig. 7. Estructura del sistema experto difuso para calificar sitios de captura y almacén de CO_2 (CAC).

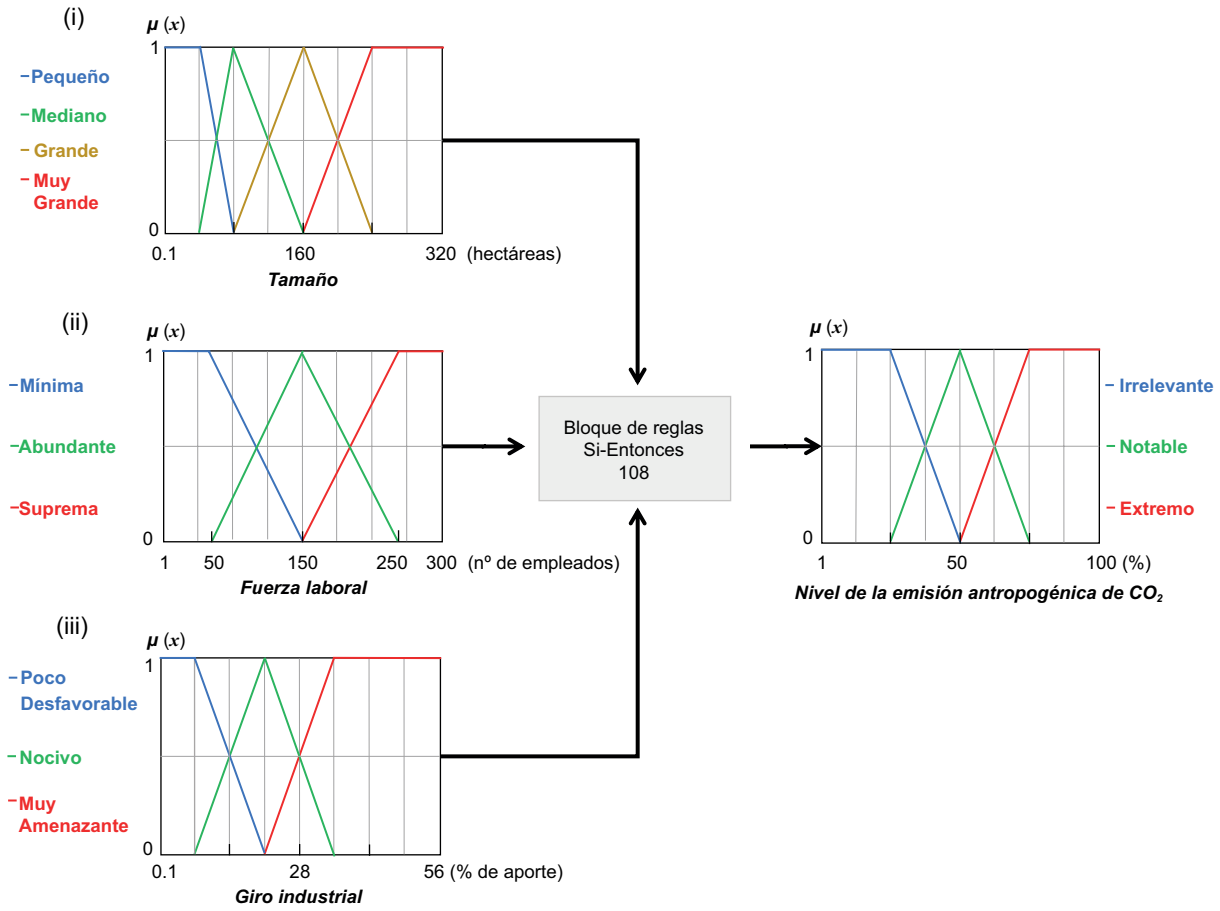


Fig. 8. Estructura del subsistema difuso para calificar, de forma indirecta, el nivel de la emisión.

CUADRO I. EJEMPLOS DE REGLAS EN EL BLOQUE DE REGLAS DEL SUBSISTEMA QUE CALIFICA EL NIVEL DE LA EMISIÓN, DONDE DoS ES EL GRADO DE SOPORTE DE LA REGLA. CUANDO DoS = 1 ESTÁ TOTALMENTE CONFIRMADA, DoS = 0 ESTÁ TOTALMENTE DESCARTADA.

Regla		Tamaño		Fuerza laboral		Giro industrial		Nivel de la emisión	DoS
1	Si	Pequeño	Y	Mínima	Y	Poco desfavorable	Entonces	Irrelevante	1.00
3	Si	Pequeño	Y	Mínima	Y	Poco desfavorable	Entonces	Extremo	0.00
108	Si	Muy grande	Y	Suprema	Y	Muy amenazante	Entonces	Extremo	1.00

óptimos para una adecuada inyección y almacenamiento, sin riesgo de inducir fracturamiento y con capacidades a gran escala (CIEMAT 2007, Ruiz et al. 2008, NETL 2017).

La definición de los conjuntos difusos de las variables Porosidad y Permeabilidad representativas (**Figs. 9** y **10**) se basa en la clasificación de Levorsen para rocas productoras de hidrocarburos (Lorenzo y Morato 2018) y se empatan con las recomendaciones de Bachu (2000), CIEMAT (2007), Dávila-Serrano (2011) y NETL (2017). Para integrar la homogeneidad en términos de continuidad de materiales, se propone la evaluación de los espesores de los estratos de areniscas o calizas y lutitas (preferidos para las formaciones almacén y sello, respectivamente), de acuerdo con:

$$H = \frac{h_t - \sum h_i}{h_t} \times 100\% \quad (1)$$

donde H es la homogeneidad de la formación almacén/sello (se espera que el valor sea lo más cercano

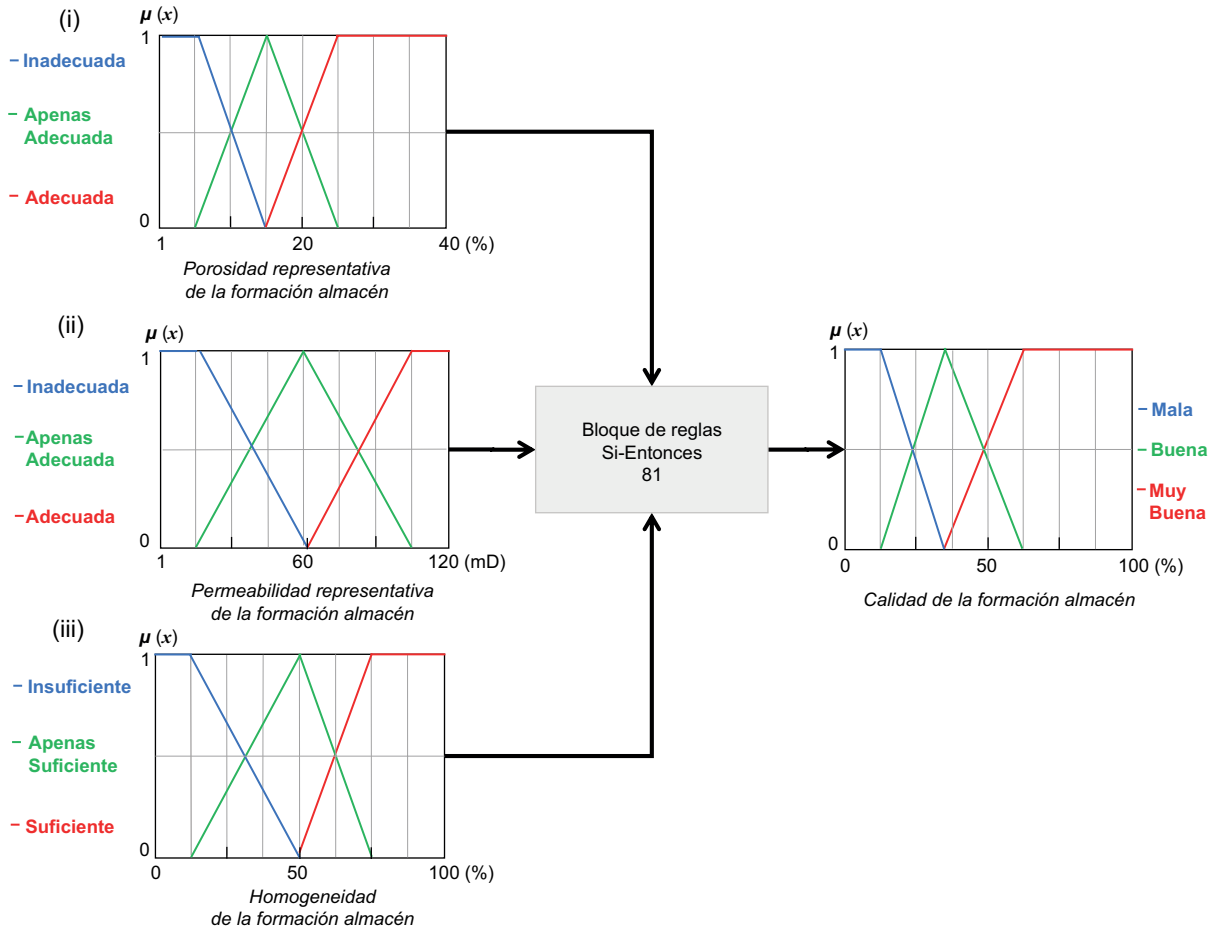


Fig. 9. Estructura del subsistema difuso que permite calificar la calidad de la formación almacén.

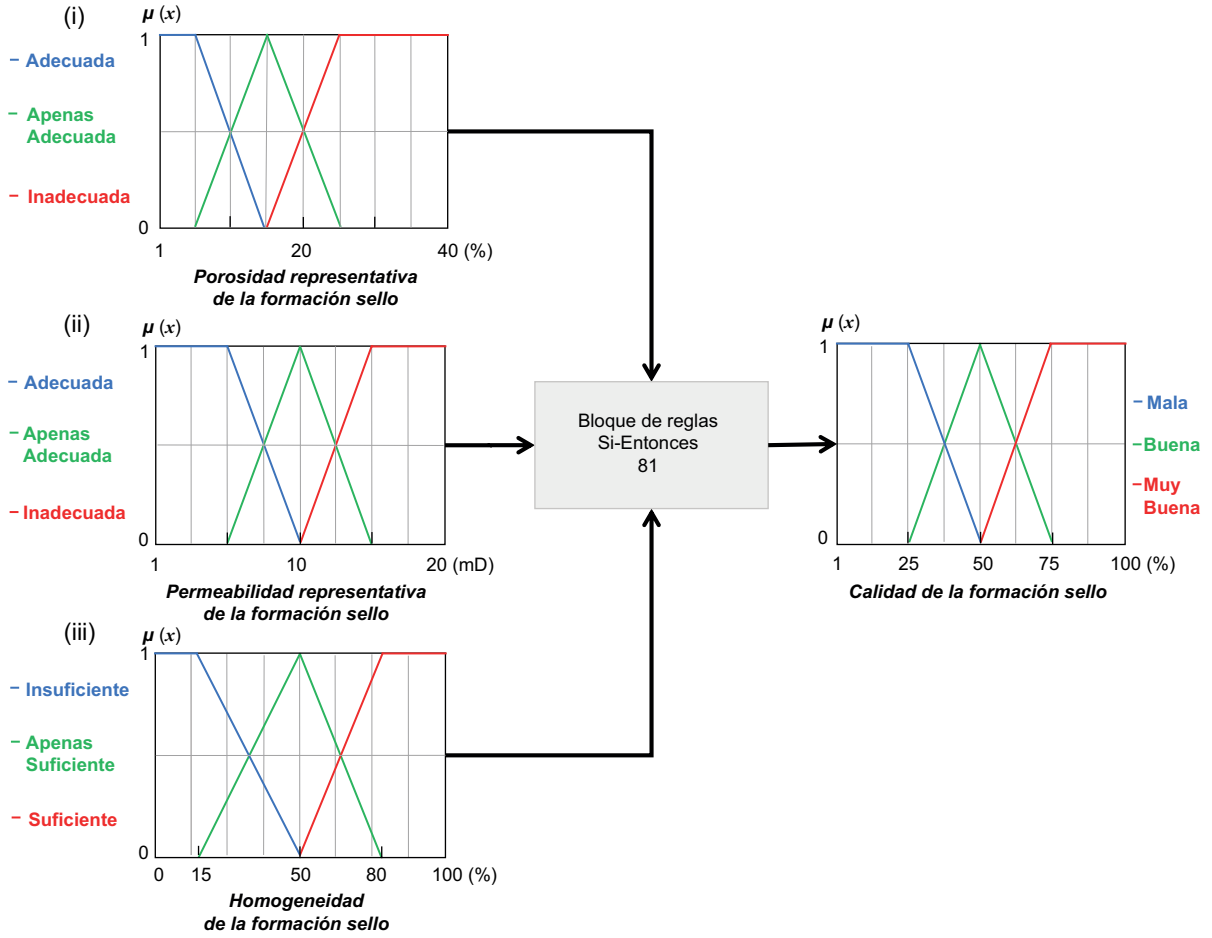


Fig. 10. Estructura del subsistema difuso que permite calificar la calidad de la formación sello.

a 100%); h_t es el espesor del estrato analizado, y h_i es el espesor de la(s) intercalación(es) de rocas sin características almacén/sello (la suma de los espesores).

Si el reconocimiento de las intercalaciones contiene demasiadas incertidumbres, se recomienda sacrificar al máximo este valor. La estructura de este subsistema se completa con el bloque de reglas que contiene 81 expresiones lógicas de acuerdo con las experiencias de CIEMAT (2007), Sánchez et al. (2008), Lorenzo y Morato (2018) y GCCSI (2020).

Entre las condiciones que con mayor significación en la calificación final del sitio para CAC está la configuración geométrica de las formaciones (**Fig. 11**). Con este subsistema se califica el grado en que la formación sello cubre (a techo y a muro) la formación almacén (IPCC 2005, Ruiz et al. 2008, NETL 2017) usando una métrica espacial que se sostiene en experiencia y técnica (correlaciones estratigráficas, registros geofísicos, núcleos de pozo, así como secciones sísmicas) para definir la distribución y obtener vistas comparables entre las formaciones (del-Moral 2013, Caja-Rojas 2017).

El objetivo de esta calificación es relacionar el tamaño de las dos formaciones usando una unidad básica simple (cubo), de forma que se pueda medir el ajuste a los tamaños requeridos para muros y techo de formación (**Fig. 12**). Primero se deben reconocer las áreas y espesores de ambas formaciones y posteriormente

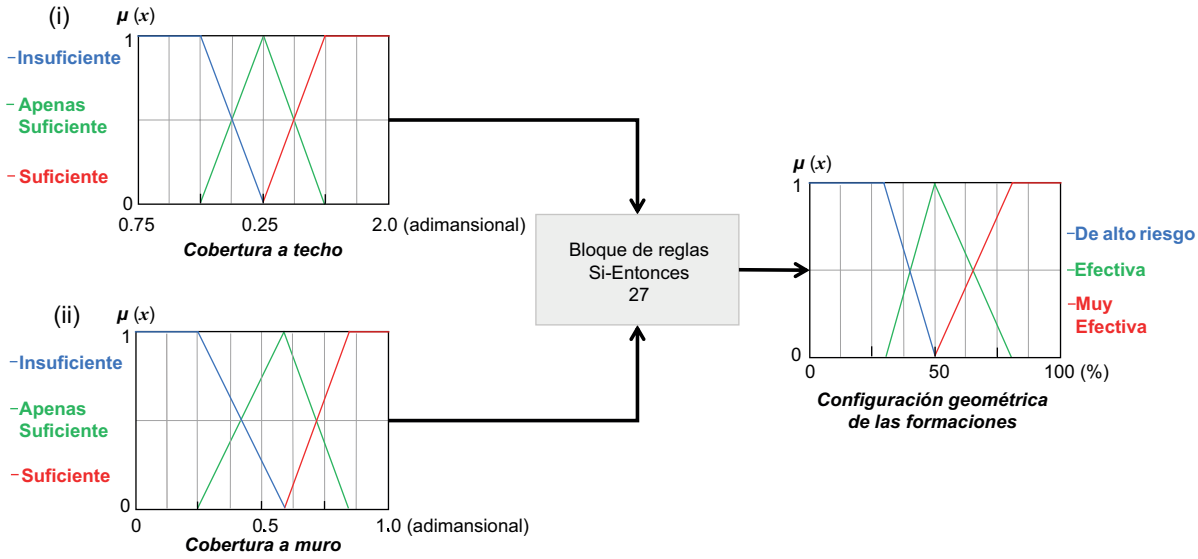


Fig. 11. Estructura del subsistema difuso que permite calificar la configuración geométrica de las formaciones.

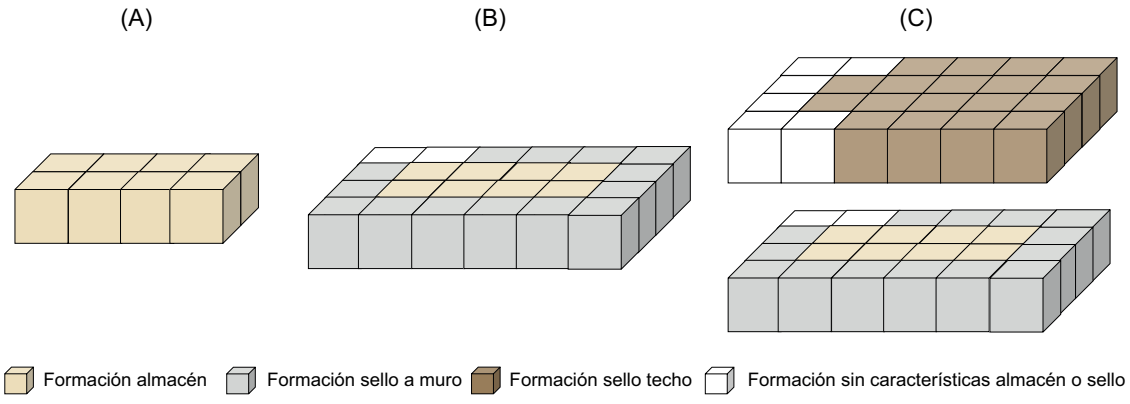


Fig. 12. Discretización de formaciones. (a) Unidades cubo de la formación almacén, (b) unidades cubo de la formación almacén más unidades cubo de la formación sello a muro, (c) unidades cubo de la formación almacén, unidades cubo de la formación sello a muro y unidades cubo de la formación sello a techo (se presentan los casos de unidades de formación sin las características de sello o almacén).

hay que discretizarlas en unidades cúbicas mínimas (García-Benítez y Martínez-Meneses 2021), de manera que se contabilicen los contactos de los cubos entre el almacén y el sello, siendo las restricciones: 1) que todas las unidades en el techo de la formación almacén estén en contacto con las bases de las unidades de la formación sello (se prefiere que el número de unidades del sello sobrepase el de las de almacén) y 2) que todas las unidades de los muros de la formación almacén estén en contacto con las unidades de la formación sello. El relativo se obtiene con el total de unidades (cubos) en la formación almacén (techo y muros) y el número de contactos:

$$C_t = \frac{U_{fs}}{U_{fa}} \tag{2}$$

donde C_t es la cobertura a techo (el valor que asegura la cobertura es igual a 1), U_{fs} es el número de unidades cubo de la formación sello que están en contacto con el techo de las unidades de la formación almacén y U_{fa} es el número de unidades cubo en la planta efectiva de la formación almacén.

$$C_m = \frac{CU_r}{CU_t} \tag{3}$$

donde C_m es la cobertura a muro (el valor que asegura cobertura es igual a 1), CU_t es el número de unidades cubo de la formación sello en contacto lateral (muro) con unidades de la formación almacén y CU_r es el número de unidades cubo en el espesor efectivo de la formación almacén.

Para este subsistema el motor de inferencia se compone de 27 reglas, siguiendo las recomendaciones de CIEMAT (2007), Sánchez et al. (2008) y Ruiz et al. (2008).

Cuando se integran las variables Calidad de la formación almacén, Calidad de la formación sello y Configuración geométrica de las formaciones se convierten en la variable que califica las cualidades de las formaciones almacén y sello (**Fig. 13**). La composición de las restantes variables de alimentación del SED se muestran en la **figura 14**.

Las siguientes seis variables de entrada permiten calificar la susceptibilidad de un sitio a desarrollar un

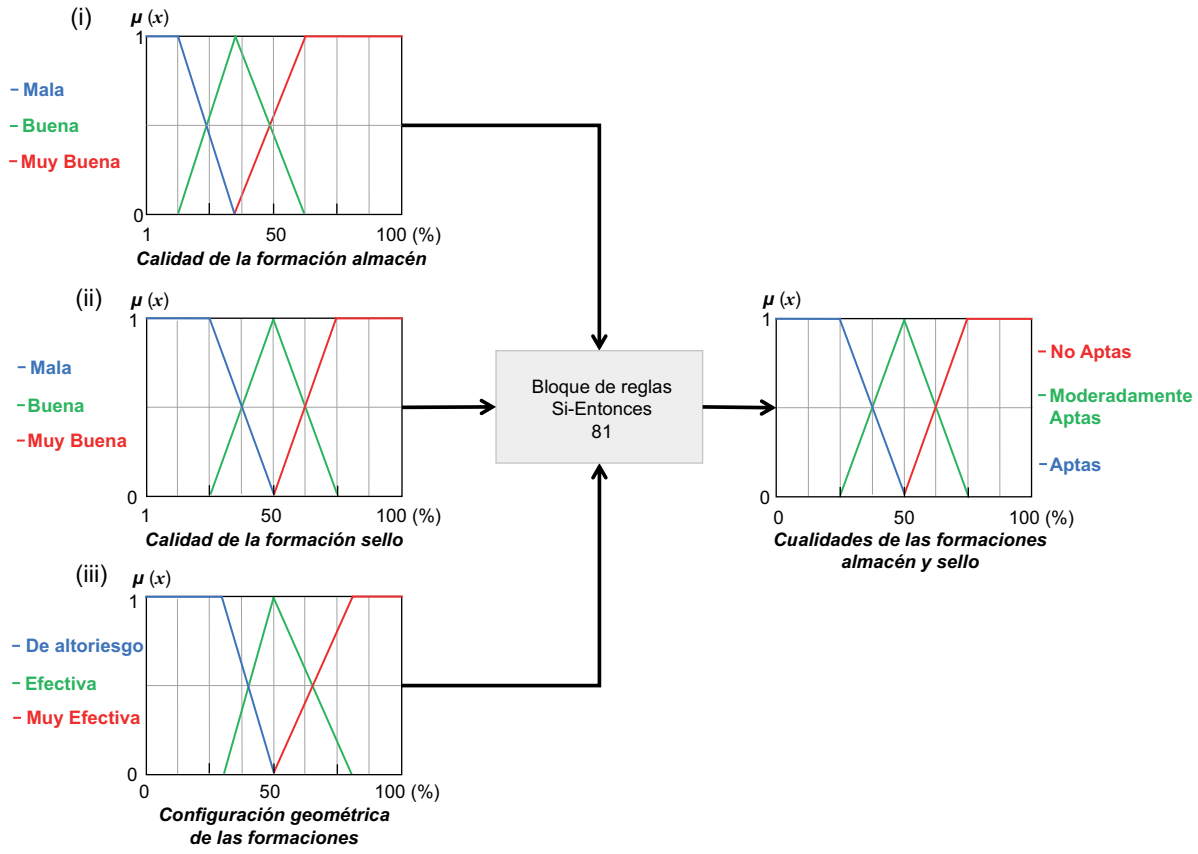


Fig. 13. Estructura del subsistema difuso que permite calificar las cualidades de las formaciones.

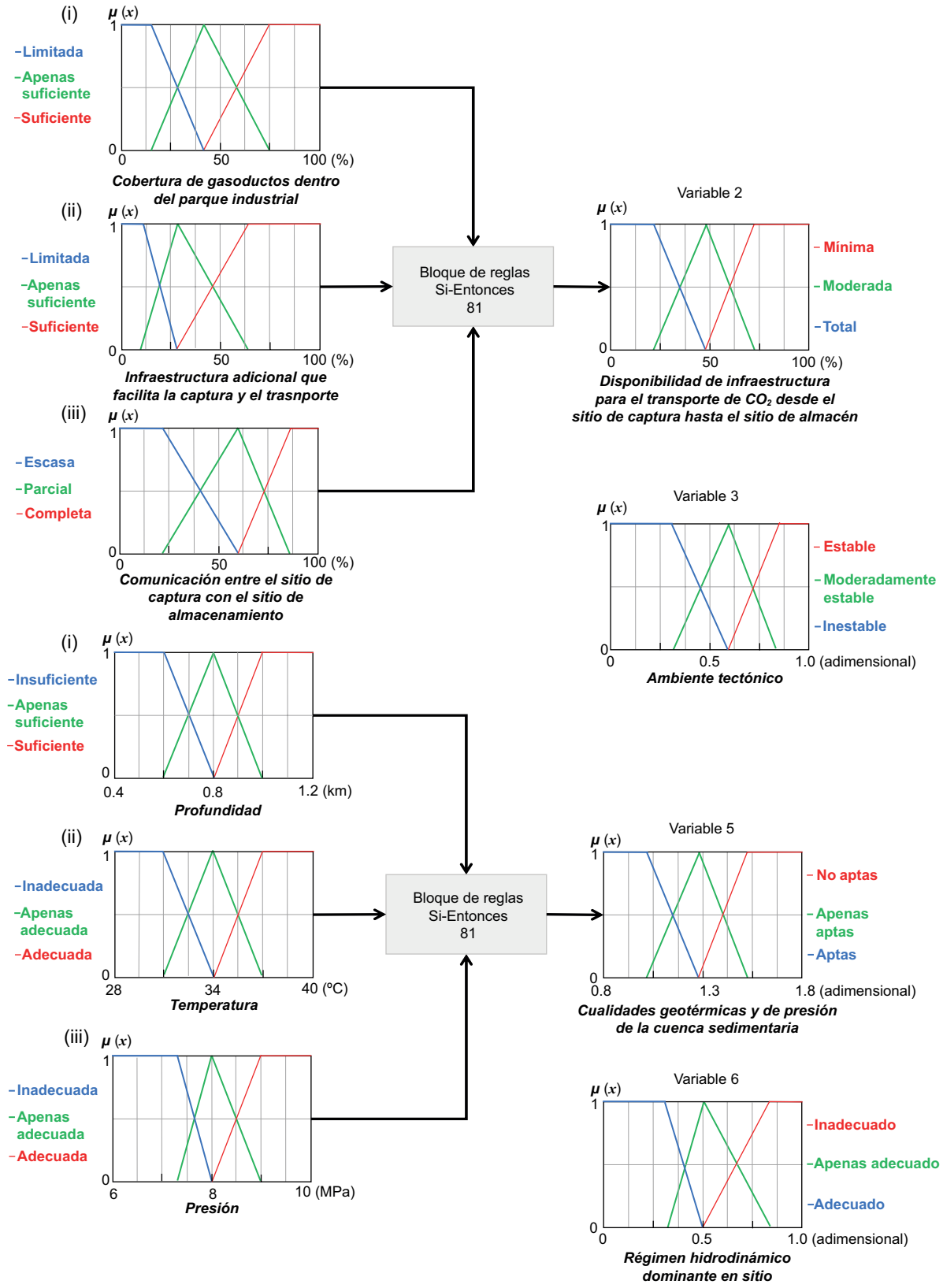


Fig. 14. Estructuras de los subsistemas difusos: disponibilidad de la infraestructura para el transporte de desde el sitio de captura hasta el sitio de almacén (variable 2), ambiente tectónico (variable 3), cualidades geotérmicas y de presión de la cuenca sedimentaria (variable 5) y régimen hidrodinámico dominante en el sitio (variable 6).

proyecto CAC: *i*) nivel de emisión antropogénica de CO_2, *ii*) disponibilidad de la infraestructura para el transporte de CO_2 desde el sitio de captura hasta el sitio de almacén, *iii*) ambiente tectónico, *iv*) cualidades de las formaciones almacén y sello, *v*) cualidades geotérmicas y de presión de la cuenca sedimentaria y *vi*) régimen hidrodinámico dominante en el sitio.

Los conjuntos difusos que configuran a la variable de salida del SED, Susceptibilidad a desarrollar un Proyecto CAC, se etiquetaron como Nula, Moderada y Alta y el motor de inferencia final está compuesto por 2187 reglas Si-Entonces. El universo de discurso de esta variable va de 0.01 a 1.00, donde el valor 1.00 indica que el sitio: *a*) cuenta con las mejores características para desarrollar proyectos CAC y la totalidad de la infraestructura para el transporte de CO_2 desde su captura hasta su almacenamiento sin requerir mayores adecuaciones, y *b*) está ubicado en una zona asísmica y cuenta con un medio geológico cuyas características permiten un gran almacén y fácil inyección, y garantizan la estanqueidad del fluido. Aunado a lo anterior, las condiciones geotérmicas y de presión deben asegurar que el CO_2 se presente en su fase supercrítica y que el régimen hidrodinámico beneficie al entrampamiento del fluido (**Fig. 15**).

De manera hipotética y con el fin de ilustrar el funcionamiento de este sistema difuso, se plantea que en alguna región del sureste mexicano se pretende realizar un proyecto de almacenamiento geológico de CO_2 y por tanto se desea explorar su susceptibilidad.

EJEMPLOS DE USO DEL SED PARA CAC

Para usar el sistema experto difuso se debe, primeramente, definir la situación geográfica sobre la que se hará el análisis, de forma que se compilen todas las informaciones necesarias referidas al sitio para alimentar el sistema. En el **cuadro II** se muestran los datos considerados para este ejemplo hipotético, el cual plantea que en una región del sureste mexicano se pretende realizar un proyecto de CAC y por tanto es necesario determinar su susceptibilidad. Cada valor de propiedad, como entrada al SED, es fuzzificado en la forma que se muestra en la **figura 16**.

Posteriormente se evalúan las reglas que se activan para las funciones de membresía resultantes del proceso de fuzzificación. Como ejemplo se muestra el análisis de la regla 519 (**Fig. 17**):

Si Nivel de la emisión antropogénica de CO_2 es Extremo.
Y Disponibilidad de infraestructura para el transporte de CO_2 es Mínima.
Y Ambiente tectónico es Estable.
Y Cualidades de las formaciones almacén y sello son Moderadamente Aptas.
Y Cualidades geotérmicas y de presión de la cuenca sedimentaria son Aptas.
Y Régimen hidrodinámico dominante en sitio es Adecuado.
Entonces Susceptibilidad del sitio a desarrollar proyectos CAC es Moderada.

La agregación (**Fig. 18**) y la defuzzificación (**Fig. 19**) permite generar la salida numérica relativa a la susceptibilidad del sitio a desarrollar un proyecto CAC.

Los valores de las seis variables generan una calificación de Susceptibilidad de 0.78 (la máxima calificación es 1.0 y la mínima es 0.01) para el sitio ejemplo; es decir, las condiciones del sitio son adecuadas para el desarrollo de un proyecto de almacenamiento geológico de CO_2. Se observa que el mayor peso sobre la salida recae en lo relacionado con infraestructura y cualidades de la formación almacén (geometría-cobertura). Estas indicaciones dirigen las siguientes simulaciones; por ejemplo, al aumentar los objetos que permiten el transporte de gas o redefinir los valores de cualidad sobre porosidad, permeabilidad y geometría.

CONCLUSIONES

Los desafíos de la industria del petróleo en el descubrimiento, perforación, producción y refinación de petróleo son cada vez mayores, por lo que exigen el desarrollo de nuevas tecnologías. Los problemas se hacen (o reconocen) complejos y las soluciones escapan a las capacidades de las técnicas convencionales. El uso de la computación inteligente (particularmente la lógica difusa) para los procesos de toma de decisiones contribuye de manera significativa a salvar obstáculos y sesgos en la comprensión de problemas cuando deben ser atendidos por grupos de diversos profesionales/administradores. La intención básica del sistema presentado es contar con un método simple y transparente que contribuya a encontrar los mejores resultados para la tarea asignada, en el menor tiempo y costo posibles.

El SED permite calificar de forma preliminar la susceptibilidad de un sitio para el desarrollo de proyectos CAC. La evaluación, basada en categorización e inferencias del razonamiento y conocimiento ingenieril, puede usarse en la delimitación efectiva

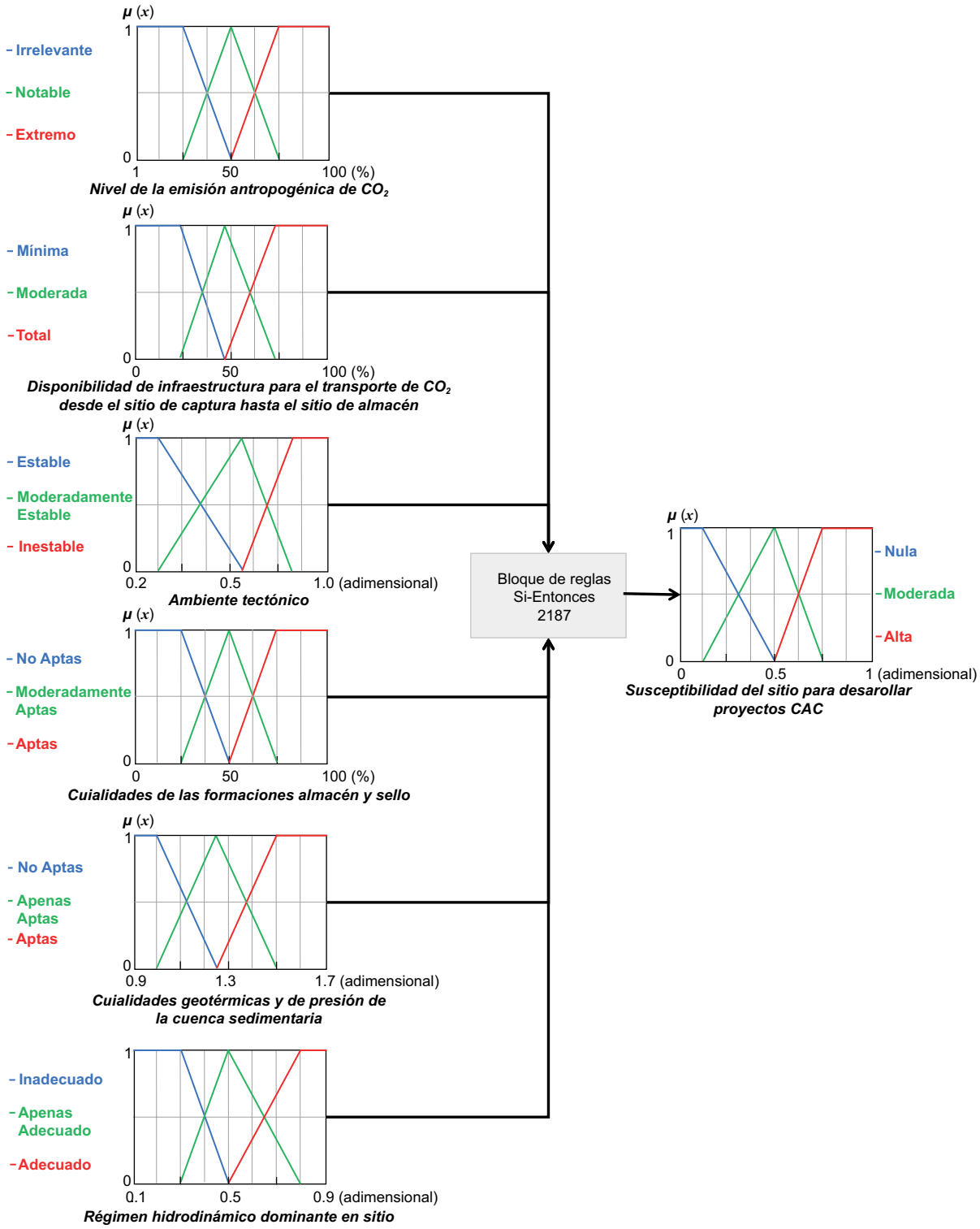


Fig. 15. Estructura del sistema que califica la susceptibilidad del sitio para desarrollar proyectos de captura y almacén de CO_2 (CAC).

CUADRO II. DATOS DEL EJERCICIO DE APLICACIÓN.

Variable 1. Nivel de la emisión antrópica de CO_2	
Parámetro	Valor (unidad)
Tamaño	64 (hectáreas)
Fuerza laboral	3700 (empleados)
Giro	32: (% de aporte)
Variable 2. Disponibilidad de infraestructura para el transporte de CO_2 desde el sitio de captura hasta el sitio de almacén	
Parámetro	Valor (unidad)
Cobertura de gasoductos:	30 (%)
Infraestructura CCA:	10 (%)
Comunicación:	60 (%)
Variable 3. Ambiente tectónico	
Parámetro	Valor (unidad)
Ambiente tectónico	0.05 (adimensional)
Variable 4. Cualidades de las formaciones almacén y sello	
Parámetro	Valor (unidad)
Porosidad representativa del almacén	21 (%)
Permeabilidad representativa de la formación almacén	100 (mD)
Homogeneidad de la formación almacén	75 (%)
Porosidad representativa de la formación sello	5 (%)
Permeabilidad representativa de la formación sello	0.1 (mD)
Homogeneidad de la formación sello	80 (%)
Cobertura a techo	1.25 (adimensional)
Cobertura a muro	0.70 (adimensional)
Variable 5. Cualidades geotérmicas y de presión	
Parámetro	Valor (unidad)
Profundidad	1 (km)
Temperatura	115 (°C)
Presión	26.477 (MPa)
Variable 6. Régimen hidrodinámico	
Parámetro	Valor (unidad)
Régimen hidrodinámico	0.9 (adimensional)

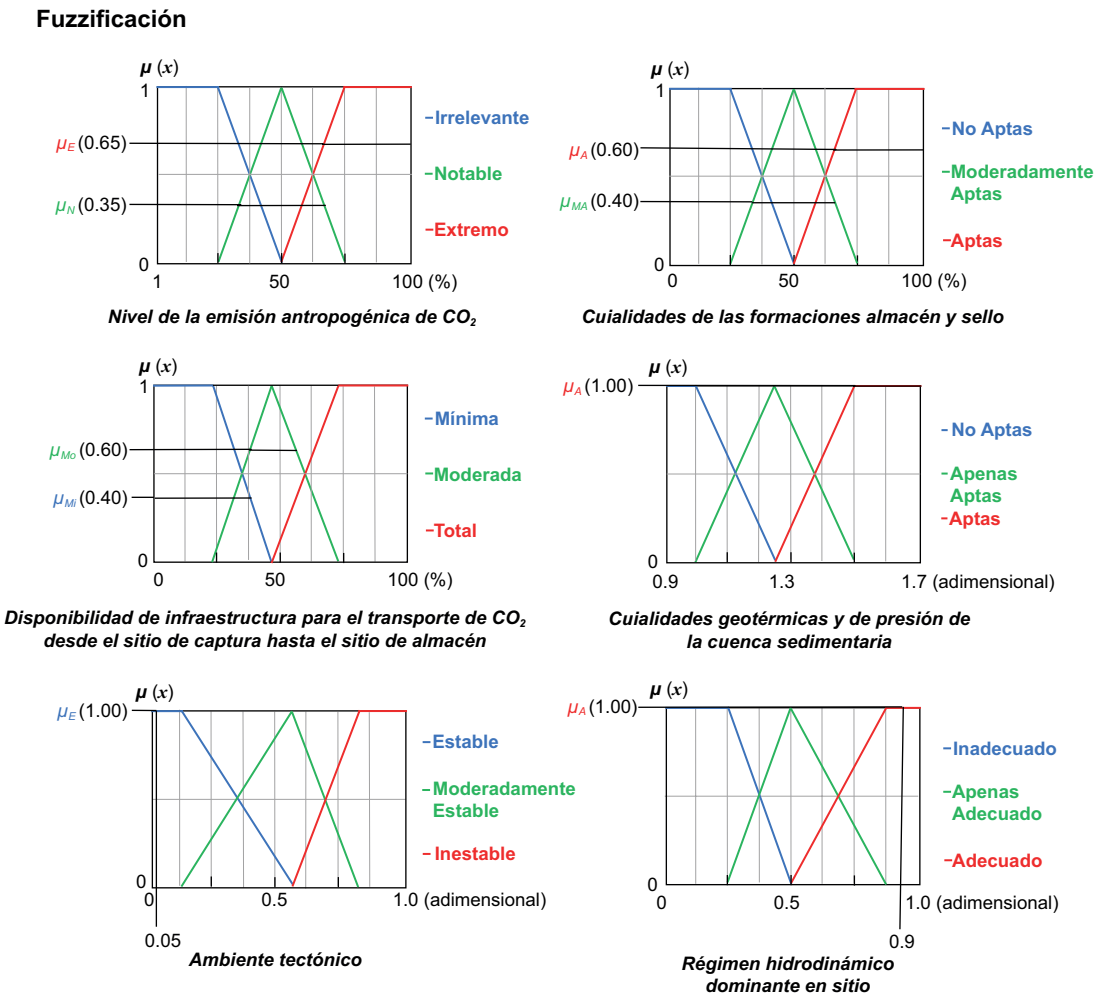


Fig. 16. Fuzzificación de las seis variables de entrada del sistema experto difuso. El ambiente tectónico y el régimen hidrodinámico usan valores directos mientras que las cuatro entradas restantes son producto del resultado de los subsistemas difusos que las configuran.

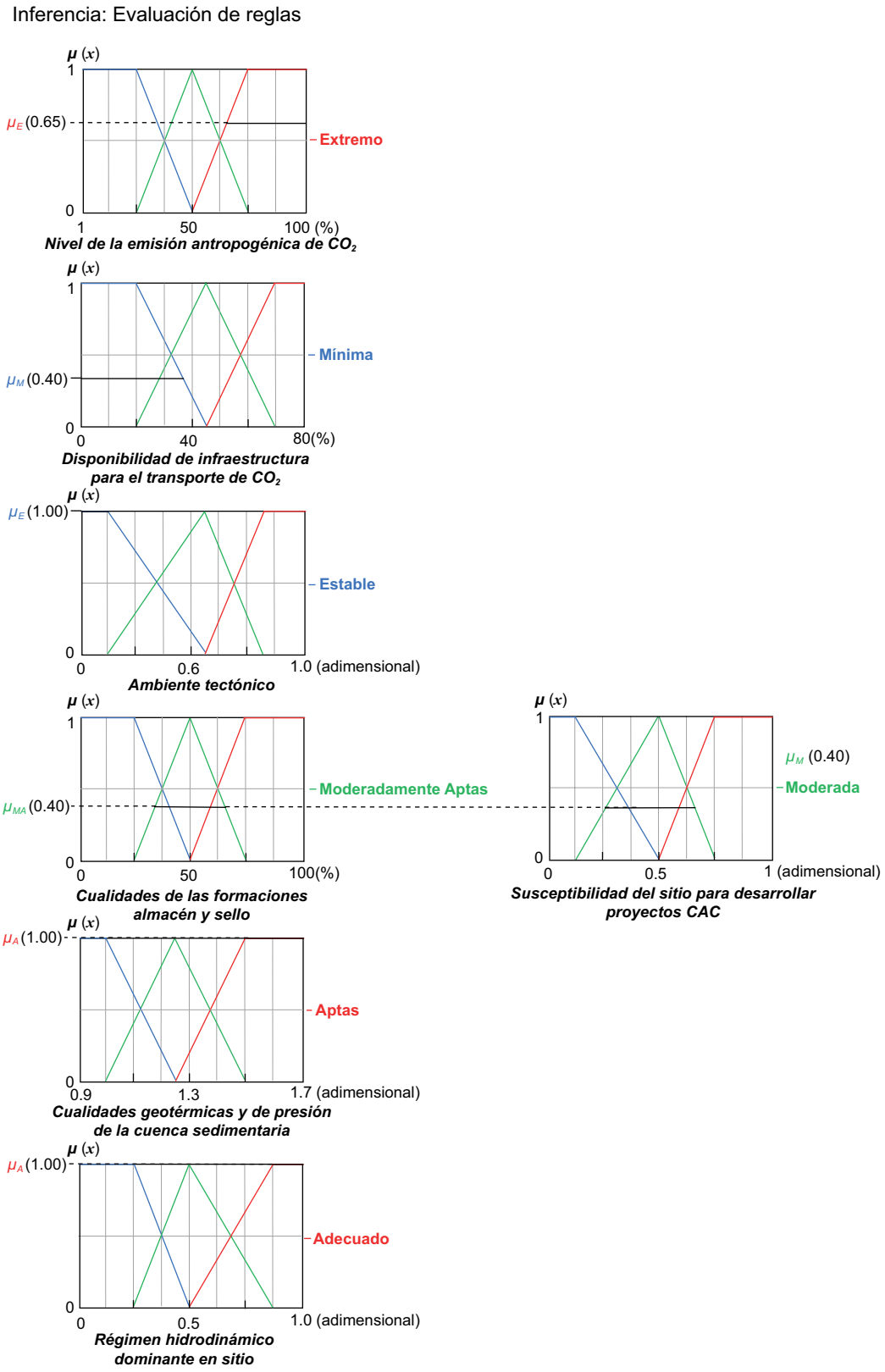


Fig. 17. Proceso de análisis de la regla 519.

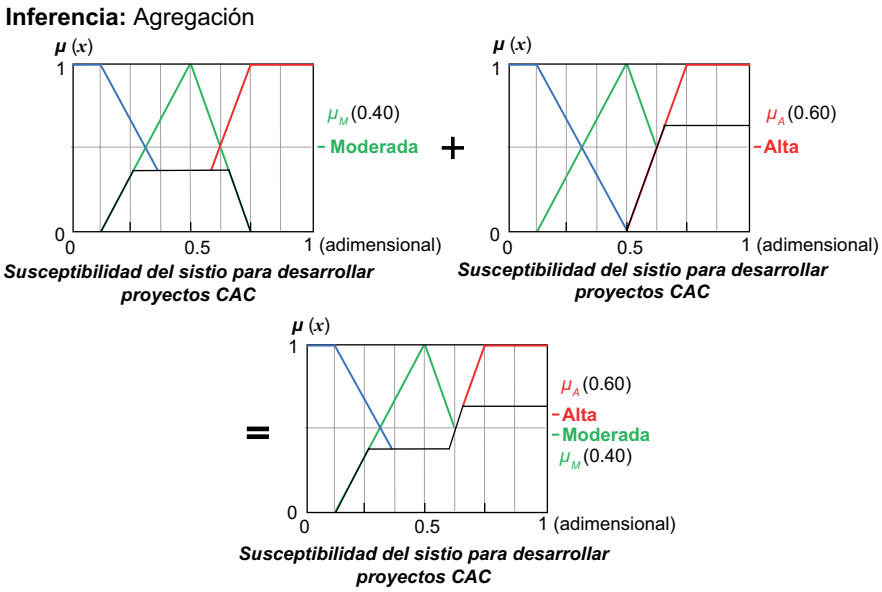


Fig. 18. Proceso de agregación.

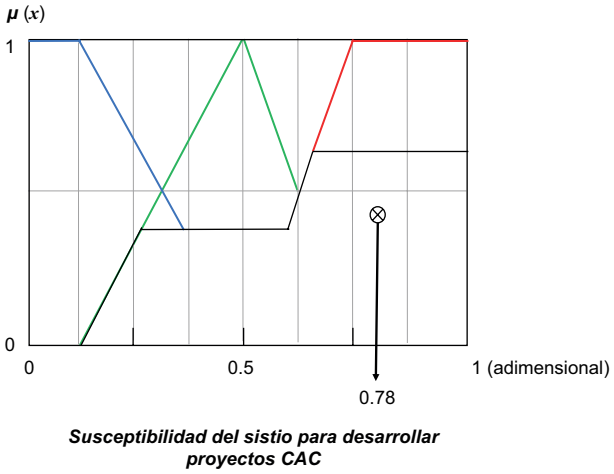


Fig. 19. Proceso de deffuzificación.

de las campañas de exploración de proyectos una vez que se han seleccionado los mejores candidatos para tal fin. Se reconoce que los parámetros involucrados en este sistema no agotan los necesarios para estudiar todos los aspectos de un proyecto CAC pero, como premisa de investigación, se consideró que los complementarios (o incluso los presentados, pero en una versión más específica) deberían abordarse en etapas posteriores en las que sea suficientemente útil adjudicar campañas de exploración más específicas.

El SED contiene métricas simples y asequibles que deberán refinarse conforme los proyectos de este tipo en todo el mundo muestren comportamientos que puedan medirse para modificar las bases de variables, conjuntos difusos y reglas de inferencia.

REFERENCIAS

Arslan A. y Kaya M. (2001). Determination of fuzzy logic membership functions using genetic algorithms. Fuzzy Sets and Systems 118 (2), 297-306. https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00065-2

Agarwal M., Mishra A. y Dixit M. (2016). Design of an improved fuzzy logic-based control system for washing machines. International Journal of Computer Application 151 (8), 5-10. https://doi.org/10.5120/ijca2016911846

Al-Baroudi H., Awoyomi A., Patchigolla K., Jonnalagadda K. y Anthony E.J. (2021). A review of large-scale CO_2 shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage. Applied Energy 287, 105047. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116510

Al-Fattah S.M., Barghouty M.F. y Dabbousi B.O. (2011). Carbon capture and storage technologies, policies, economics, and implementation strategies. CRC Press, Boca Raton, Florida, EUA, 404 pp.

Amaitik N.M. y Buckingham C.D. (2017). Developing a hierarchical fuzzy rule-based model with weighted

linguistic rules: A case study of water pipes condition prediction. Memorias. 2017 Computing Conference. Londres, Reino Unido. 18-20 de julio. https://doi.org/10.1109/SAI.2017.8252078

Bachu S. (2000). Sequestration of CO_2 in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change. Energy Conversion Management 41 (9), 953-970. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00149-1

Badaro S., Ib*áñez L.J. y Agüero M. (2013). Sistemas expertos:* fundamentos, metodologías y aplicaciones. Ciencia y Tecnología 13 (24), 349-364. https://doi.org/10.18682/cyt.v1i13.122

Bartolomé C., Mora P. y Recalde J.R. (2011). Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 en la industria del cemento. Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, Madrid, España, 102 pp.

Boot-Handford M.E., Abanades J.C., Anthony E.J., Blunt M.J., Brandi S., Mac-Dowell N., Fernández J.R., Ferrari M.C., Gross R, Hallet J.P., Haszeldine R.S., Heptonstall P., Lyngfelt A., Makuch Z., Mangano E., Porter R.T.J., Pourkashanian M., Rochelle G.T., Shah N., Yao J.G. y Fennell P.S. (2014). Carbon capture and storage update. Energy and Environmental Science 7 (1), 130-189. https://doi.org/10.1039/c3ee42350f

Bui M. y Mac-Dowell N. (2019). Introduction - Carbon capture and storage. En: Carbon capture and storage (Bui M. y Mac-Dowell N., Eds.). Royal Society of Chemistry, Londres, Reino Unido, pp. 1-7. https://doi.org/10.1039/9781788012744-00001

Cabrera-Llanos A., Ortiz-Arango F. y Cruz-Aranda F. (2019). Un modelo de minimización de costos de mantenimiento de equipo médico mediante lógica difusa. Revista Mexicana de Economía y Finanzas (nueva época) 14 (3), 379-396. https://doi.org/10.21919/remef.v14i3.410

Caja-Rojas N.C. (2017). Correlación litoestratigráfica de la formación Yumagual comprendida en los sectores de Ronquillo, Puyllucana y la Encañada. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 87 pp.

Calzada-Gómez J. (2015). Implementación de un sistema de predicción de falla de resistencias eléctricas en hornos de sostenimiento de temperatura de aluminio líquido basado en lógica difusa. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Asistencia Técnica, Aguascalientes, México, 128 pp.

Chacón J., Soriano J. y Salazar O. (2018). Sistema de inferencia difusa basado en relaciones booleanas y kleeneanas con combinador convexo. Ingeniería 23 (1), 7-30. https://doi.org/10.14483/23448393.11138

G. y Pham T.T. (2001). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy control system. CRC Press, Boca Ratón, Florida, EUA, 329 pp.

CIEMAT (2007). Almacenamiento geológico de CO_2, criterios de selección de emplazamientos. Informe t*écnico*. Departamento de Medio Ambiente, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid, España, 110 pp.

Correa-Henao G.J. (2004). Aproximaciones metodológicas para la toma de decisiones, apoyadas en modelos difusos. Tesis de Maestría. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 229 pp.

Dávila-Serrano M. (2011). Viabilidad técnica y ambiental para el almacenamiento geológico de CO_2 en México. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 195 pp.

Dawood M., Rahman A., Mahmood S., Rahman G. y Nazir S. (2021). Assessing the impact of climate change on discharge in Swat river basin using fuzzy logic model. Arabian Journal of Geosciences 2021 (14), 1850. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08219-4

Del-Moral J.M. (2013). Análisis de estratigrafía de secuencias del Mioceno, en los cubos Najucal y Jimba en la cuenca terciaria de Veracruz. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 125 pp.

García R.E., Félix-Benjamín G. y Bello-Pérez. R. (2014). Evaluación del impacto de la capacitación con lógica difusa. Ingeniare 22 (1), 41-52. https://doi.org/10.4067/S0718-33052014000100005

García-Benítez S.R. y Martínez-Meneses J.H. (2021). Lógica difusa en la calificación de sitios para captura y almacenamiento de CO_2. Memorias de la XXX Reunión Nacional de Ingenieros Geotecnistas México, 15-19 de marzo [en línea]. https://www.smig.org.mx/biblioteca-digital/busqueda.php?avanzada=0&where-0=Autor&keyword-0=jos%C3%A9+henrique+mart%C3%ADnez+meneses

GCCSI (2020). Global status of carbon capture and storage 2020. Reporte anual. Global Carbon Capture and Storage Institute, Melbourne, Australia, 80 pp.

Gutiérrez A. y Ferreira W. (2020). Un modelo de regresión lineal aplicando lógica difusa. Revista Sextante 23, 48-54. https://doi.org/10.54606/Sextante2020.v23.05

Hájek P. y Novák V. (2003). The sorites paradox and fuzzy logic. International Journal of General Systems 32 (4), 373-383. https://doi.org//10.1080/0308107031000152522

Idowu S.O., Capaldi N., Zu L. y Gupta A.D. (2013). Encyclopedia of corporate social responsibility. Springer, Heidelberg, Alemania, 301 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28036-8_100191

IPCC (2005). Carbon dioxide capture and storage. Reporte especial. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Inglaterra, 431 pp.

Kayacan E. y Khanesar M.A. (2015). Fuzzy neural networks for real time control applications concepts, modeling and algorithms for fast learning. Elsevier, Oxford, Reino Unido, 242 pp.

Kunhimangalam R., Ovallath S. y Joseph P.K. (2013). A novel fuzzy expert system for the identification of severity of carpal tunnel syndrome. BioMed Research International 2013, 846780. https://doi.org/10.1155/2013/846780

Liao R., Chan C.W. y Huang G.G. (2005). Fuzzy logic controller for an oil separation process. Memorias. 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Saskatoon, Canadá, 1-4 de mayo. https://doi.org/10.1109/CCECE.2005.1557155

López-García D.R. (2002). Herramientas de CAD para el desarrollo de sistemas difusos. Tesis de doctorado. Facultad de Física, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 229 pp.

Lorenzo E. y Morato A. (2008). Geología del petróleo. UPSE, Santa Elena, Ecuador, 215 pp.

Macián-Sorribes H. (2012). Utilización de lógica difusa en la gestión de embalses. Aplicación a los ríos Sorbe, Esla y Mijares. Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería de Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 226 pp.

Martínez-Meneses J.H. (2021). Lógica difusa para la caracterización de sitio para fungir como almacén geológico de CO_2. Tesis de Maestría. Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 234 pp.

Nava-Jiménez A. (2014). Análisis de las condiciones del equipamiento e infraestructura urbano-industrial de los parques industriales en el Estado de México, 1980-2010. Tesis de Licenciatura. Centro Universitario Universidad Autónoma del Estado de México Tenancingo, Universidad Autónoma del Estado de México, Tenancingo, Estado de México, México, 106 pp.

NETL (2017). Best practices: Site screening, site selection, and site characterization for geologic storage projects. National Energy Technology Laboratory, Department of Energy, Albany, Oregón, EUA, 120 pp.

Newell P. e Ilgen A.G. (2019). Overview of geological carbon storage (GCS). En: Science of carbon storage in deep saline formations. (Newell P. e Ilgen A.G., Eds.). Elsevier, Londres, Reino Unido, pp. 1-13. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812752-0.00001-0

Nojedehi P. y Nasirzadeh F. (2017). A hybrid simulation approach to model and improve construction labor productivity. KSCE Journal of Civil Engineering 21 (5), 1516-1524. https://doi.org/10.1007/s12205-016-0278-y

Ross T.J. (2010). Fuzzy logic with engineering applications. 3a ed. Wiley, Hoboken, Nueva Jersey, EUA, 585 pp.

Ruiz C., Prado A.J., Campos R., Hurtado A., Pelayo M., De la Losa A., Martínez R., Sastre J., Pérez L., Eguilior S., Lomba L. y Recreo F. (2008). Almacenamiento geológico de CO_2: criterios de selección de emplazamientos. Memorias. Noveno Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid, España, 1-5 de diciembre.

Ruvalcaba-Coyaso F.J. y Vermonden A. (2015). Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal. Universidad y Empresa 17 (29), 239-256. https://doi.org/10.12804/rev.univ.empresa.29.2015.10

Salais-Fierro T.E., Saucedo-Martínez J.A., Rodríguez-Aguilar R. y Vela-Haro J.M. (2020). Demand prediction using a soft-computing approach: A case study of automotive industry. Applied Science 10 (3), 829. https://doi.org/10.3390/app10030829

Sánchez J.M., González A., Navarrete B., del Castillo G. y Martín M. (2008). Sostenibilidad de los recursos energéticos fósiles y minerales: uso racional en el abastecimiento y el consumo. Memorias. Noveno Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid, España, 1-5 de diciembre.

Singh H., Gupta M.M., Meitzler T., Hou Z.G., Garg K.K., Solo A.M.G. y Zadeh L.A. (2013). Real life applications of fuzzy logic. Advances in Fuzzy Systems 213, 581879. https://doi.org/10.1155/2013/581879

Smith E., Morris J., Kheshgi H., Teletzke G., Herzog H. y Paltsev S. (2021). The cost of CO_2 transport and storage in global integrated assessment modeling. International Journal of Greenhouse Gas Control 109, 103367. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103367

Thaker S. y Nagori V. (2018). Analysis of fuzzification process in fuzzy expert system. Procedia Computer Science 132, 1308-1316. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.047

Wilcox J. (2012). Carbon capture. Springer, Nueva York, EUA, 324 pp.