

LA TEORÍA DE LAS POSIBILIDADES Y LOS PRINCIPIOS DE INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DEL DESARROLLO SUSTENTABLE

Joel Cordero Elizalde¹

Introducción

Si aceptamos al desarrollo sustentable desde una perspectiva de sistemas complejos, suponemos un concepto que por su naturaleza, sus componentes, heterogeneidad y sus interacciones, contiene axiomas de incertidumbre, relatividad, indecidibilidad e incompletitud, es decir la complejidad del desarrollo sustentable involucra la incapacidad de alcanzar certezas, de formular leyes sobre el desarrollo, de evitar contradicciones entre las dimensiones que lo conforman, de comprender la realidad regional como unidimensional, absoluta y determinista. El desarrollo sustentable si bien depende de condiciones endógenas no se puede estudiar en sí mismo, como un ente aislado, sino en relación con su entorno. Por lo que para entender y propiciar el desarrollo se han propuesto diversos enfoques: desde los biofísicos como los límites del crecimiento y el crecimiento cero, hasta los de enfoque psicológico como el desarrollo a escala humana, pasando naturalmente por un enfoque fundamentalmente monetario como el del PIB o el de las capacidades del IDH.

Para coadyuvar en la identificación de un rumbo para la generación de una propuesta alternativa de medición del desarrollo sustentable los tres principios de Morin² (1990) podrían extenderse como un soporte a éste propósito, fundamentalmente debido a que la multidimensionalidad del desarrollo genera la posibilidad de identificar situaciones de orden y desorden coexistiendo simultáneamente cuando se agregan sus diversas componentes: sociales, económicas, ambientales e institucionales; la existencia y necesidad de los “*trade-offs*” entre las dimensiones y la importancia de los expertos en la construcción –y por tanto en la mensurabilidad- del modelo. La ausencia de una linealidad causa-efecto reorienta el procesamiento tradicional de análisis de datos y de construcción de modelos lineales –las relaciones causa efecto entre las variables que conforman las dimensiones del desarrollo sustentable son complejas y trascienden la explicación a través de una lógica binaria.

¹Maestro en Ciencias, cDr. en Ciencias Ambientales (medio ambiente y desarrollo sustentable). profesor-investigador de El Colegio de Puebla. Tel.: (222) 226 5400 ext.: 219. jcordero@colpue.edu.mx

² Principio dialógico, de recursividad y hologramático.

Además, la manifestación de cada una de las partes en el modelo de desarrollo sustentable y la interpretación de cada una de las partes a través de la percepción total del modelo proporcionan el argumento para emplear alternativas de medición con alcances generalizados. El desarrollo sustentable no es un proceso lineal y tampoco lo son sus componentes, esto involucra un grado de complejidad que dificulta su evaluación a través de medidas tradicionales, o por lo menos metodológicamente bien estructuradas.

La incertidumbre y el desarrollo sustentable

La percepción, interpretación y modelamiento del desarrollo sustentable depende de la incertidumbre e imprecisión asociada con cada una de las variables que constituyen sus dimensiones y que a su vez constituyen su sistema de medida. La incertidumbre en la determinación de una variable afectará al resultado global, pero no siempre de la misma forma ni con la misma intensidad, ello dependerá entre otros factores: del lugar y el tiempo en que se estudie, del contexto y de las interacciones entre sus componentes.

Los principios que explican la imposibilidad de conocer con certeza absoluta la situación del desarrollo y la sustentabilidad de éste, a través de magnitudes cuantificables más que con datos ya interpretados (observables), tienen un fondo, que por el origen mismo de los subsistemas económicos, sociales y naturales, permiten buscar una explicación por medio de principios originados en otros campos de la ciencia como en la física moderna y en la lógica formal como parte de la filosofía y de las matemáticas. Este marco explicativo inicia con el *principio de relatividad* de Galileo (1638) quien reconoce el carácter relativo del movimiento y el principio de relatividad de Einstein (1905) que trata los temas relacionados con el marco de referencia y la posibilidad de encontrar ecuaciones que tienen la misma forma en todos los sistemas de referencia inerciales. Haciendo una extensión de este principio esperaríamos encontrar modelos semejantes sobre desarrollo sustentable, que dieran las mismas tasas de desarrollo para diferentes regiones independientemente de sus condiciones económicas, sociales, ambientales o políticas; y que únicamente estarían modulados por un factor que asignaría un peso diferente a las diferentes sociedades, idiosincrasias, modelos económicos y estructura política –situación que depende de la existencia de sistemas de medición comparables-.

También desde el punto de vista físico, el principio de incertidumbre de Heisenberg (1927) supone un cambio fundamental en la forma de estudiar los sistemas, ya que se pasa de un

conocimiento teóricamente exacto (o al menos, que en teoría podría llegar a ser exacto con el tiempo) a un conocimiento basado en probabilidades y en la imposibilidad teórica de superar un cierto nivel de error. Para el estudio del desarrollo y la sustentabilidad, podemos tener las variables que componen cada indicador definido en el sistema de medición, pero siempre estaremos en riesgo de solo hacerlo parcialmente o con cierto grado de probabilidad. Pero si asumimos que el desarrollo puede interpretarse como intangible (Boisier, 2003), es necesario emplear otras herramientas para tratar con información insuficiente tanto temporal como espacialmente y que va más allá de los errores estadísticos propios de los sistemas de medida tan ampliamente estudiados.

Para la situación cuando se hace mensurable el desarrollo sustentable la incertidumbre puede presentarse en diversos grados, en ciertos casos mejor representados cuantitativamente y en otros prevaleciendo una descripción cualitativa. El determinismo, la aleatoriedad, la ambigüedad, la vaguedad (lo borroso) y la confusión son diferentes manifestaciones de la incertidumbre; la suposición generalizada sobre los sistemas de medida del desarrollo y de la sustentabilidad es que son sistemas deterministas, -en su origen fuertemente deterministas y ahora explicados también a través de un determinismo débil.

La inexistencia de incertidumbre se puede explicar a través de la idea de *determinismo fuerte* en la cuál se asume que todo conocimiento está causalmente determinado por la cadena: *causa-efecto*, no existen sucesos completamente aleatorios y por tal motivo el futuro es predecible. Por otro lado el *determinismo débil* incorpora la idea de probabilidad y la influencia de sucesos esencialmente aleatorios e impredecibles, pero asegurando que existe una fuerte correlación entre el estado presente y los estados futuros de un sistema. Tal como los modelos de los límites del crecimiento del Club de Roma basados en la teoría de la dinámica de los sistemas de Jay W. Forrester³.

La incertidumbre aleatoria se presenta cuando los posibles eventos resultantes de un experimento son conocidos y tienen la misma probabilidad de ocurrencia, por ejemplo en el

³ El modelo *World-2* (1971) trataba de definir y prever la realidad mundial basándose en un sistema de 45 ecuaciones básicas relacionando seis sectores fundamentales: población, inversión de capital, espacio geográfico, recursos naturales, contaminación y producción de alimentos. Siguiendo la misma metodología de Forrester, el equipo de Dennis L. Meadows preparó el nuevo modelo *World-3*, con 77 ecuaciones básicas que relacionan cinco variables fundamentales: población, agrícola, recursos naturales, producción industrial y contaminación. *World-3* demostraba que la actual tendencia del mundo llevaba inevitablemente a un colapso que debería producirse antes de un siglo, provocado principalmente por el agotamiento de los recursos naturales.

lanzamiento de una moneda. También aparece en situaciones de conflicto como en el caso de una afirmación que puede ser verdadera o falsa. Este tipo de incertidumbre se modela con la teoría de las probabilidades, evaluando la probabilidad de manera empírica, subjetiva o experimental, que puede presentarse en términos de rangos en lugar de valores absolutos. Una aplicación se puede encontrar en los métodos estadísticos multivariados que han sido profusamente empleados para la construcción de indicadores compuestos, tal como el IDH o el Índice de Marginación.

La ambigüedad conduce a una forma diferente de incertidumbre de tipo cualitativo, proviene de la existencia de diferentes significados de una palabra o de una expresión. Esta situación es bien conocida en el campo del desarrollo sustentable, ya que se origina desde el concepto mismo de desarrollo, sustentabilidad e incluso de sostenibilidad, que depende de los modelos conceptuales y los estilos de desarrollo empleados. En este caso los eventos no están especificados o definidos claramente y la incertidumbre corresponde a la falta de información. Al entrar en lo subjetivo de los significados, el grado de incertidumbre aumenta respecto al que tiene la incertidumbre aleatoria, con la diferencia que en la ambigüedad es difícil caracterizarla y por tanto controlarla.

Tradicionalmente, un elemento de información se representa mediante una triada del tipo $\langle \text{atributo}, \text{objeto}, \text{valor} \rangle$. La componente *valor* será, en general, un predicado, entendido como un subconjunto de un universo de referencia ligado al *atributo*, que es una determinada propiedad del sujeto. Por ejemplo, un elemento de información del subsistema ambiental es la calidad ecológica, para el atributo: superficie con erosión severa tendremos el vector $\langle \text{erosión severa}, \text{municipio X}, 30\text{has} \rangle$. La incertidumbre en este elemento de información hace referencia a la certeza de esa información, en cuanto a su conformidad con el conocimiento que se posee del mundo real, si éste conocimiento es incierto, debido al método de estimación y a las herramientas tecnológicas utilizadas para determinar la superficie erosionada –escala de la fotografía aérea, resolución espacial de la imagen satelital, experiencia del intérprete-. Es necesario añadir una cuarta componente a esta representación, con el fin de incluir la credibilidad del elemento de información: $\langle \text{atributo}, \text{objeto}, \text{valor}, \text{credibilidad} \rangle$. En el ejemplo quedaría $\langle \text{erosión severa}, \text{municipio X}, 30\text{has}, \text{alta} \rangle$ o en términos de probabilidad: $\langle \text{erosión severa}, \text{municipio X}, 30\text{has}, 0.8 \rangle$.

La credibilidad puede interpretarse por la vaguedad de la información (borrosidad o fuzzy) que hace imposible establecer la verdad o falsedad de una afirmación, asociando variables lingüísticas que se asemejan al lenguaje común al valor y credibilidad que un objeto puede tener como elemento de información, tal como la asignación de una escala ordinal del tipo: alto, medio y bajo. Es muy importante reconocer que una mayor cantidad de información no ayuda en general a resolver el problema de la borrosidad como sucede en el caso de la ambigüedad. El tratamiento de la incertidumbre en este caso involucra técnicas alternativas que se han desarrollado por autores como (Andriantiatsaholiniaina, 2004); (Contigiani, 2006) y (Morales, 2008).

Cuando la incertidumbre es de tipo aleatorio, desde el punto de vista objetivo de la probabilidad, es posible en muchos casos modelar los problemas de incertidumbre asignando probabilidades a los distintos eventos a través de la frecuencia relativa y el análisis estadístico; estos posibles resultados están claramente definidos y de esta manera es posible obtener una medida muy concreta de la probabilidad de que esos eventos ocurran. Sin embargo si esto no es posible, desde el punto subjetivista, la probabilidad puede ser considerada como una medida personal de la incertidumbre o de creencia sobre un evento o un objeto y la probabilidad como tal no existe como algo concretamente definido (Torres A. M., 2004). Esta situación permite modelar algunos problemas en los cuales no se tienen datos estadísticos sobre la ocurrencia de ciertos eventos (por ejemplo cuando es imposible repetir una entrevista censal en varias ocasiones), pero su probabilidad puede ser asignada con base en la creencia de las personas sobre esa ocurrencia.

Algunos autores afirman que cualquier tipo de incertidumbre puede ser tratado con la teoría subjetivista de la probabilidad, reduciendo las características imprecisas de los eventos. Entonces, es posible asignar las probabilidades en un grado altamente práctico, sin la necesidad de tener una precisión absoluta de esa probabilidad. Entre las técnicas más conocidas para modelar la incertidumbre están las redes Bayesianas y las cadenas de Markov.

Para completar el cuadro de postulados de incertidumbre se pueden incorporar dos principios adicionales: el de *indecidibilidad*⁴ y el de *incompletitud*: en 1930 Gödel demostró

⁴La *indecidibilidad* es un término proveniente de la lógica de sistemas que se puede explicar como la *imposibilidad* de demostrar, en un sistema de una cierta complejidad y dentro del mismo sistema, todas las

que existían proposiciones en la aritmética que no se podían demostrar que eran ciertas pero tampoco que eran falsas. Esas proposiciones eran *indecidibles*. Este resultado desterró la idea buscada por todos los matemáticos de poder demostrar cualquier proposición como cierta o falsa a través de reglas de inferencia. El teorema estableció límites para el conocimiento lógico en particular y para el conocimiento científico en general al reconocer que no siempre una vez encontrados los axiomas adecuados, todas las verdades podrían ser deducidas a partir de ellos, mediante la lógica.

Como consecuencia de la indecidibilidad, Gödel publicó un segundo teorema, el de la incompletitud, que establece que la lógica de predicados de orden superior, la que incluye la aritmética, no puede ser a la vez completa y consistente. Es decir: en el terreno de las matemáticas, hay cosas no alcanzables, lugares a donde la deducción no llegará jamás. Gödel demostró, entre otras cosas que la potencia del método axiomático es fundamentalmente limitada. Generalizando ésta idea a situaciones tangenciales a las matemáticas, en las que evidentemente el conocimiento no se encuentra estrictamente formalizado, como es el caso de la medición del desarrollo, puede concluirse que no importa cuál sea el conjunto de axiomas que se use para construir y explicar un modelo de sustentabilidad, siempre habrá algo, que si bien es verdadero, no se puede demostrar. Esto no quiere decir que la aplicación del método axiomático al caso de la mensurabilidad del desarrollo sea inadecuada, más bien que la deducción de posibles teoremas no puede mecanizarse y que es necesario el *conocimiento experto* para la investigación en una factible ciencia de la sustentabilidad.

La Teoría de la Posibilidad.

La teoría de los conjuntos difusos (Zadeh, 1965) y su aplicación generalizada a diversas áreas del conocimiento han sido la base para desarrollar conceptos tales como los del *razonamiento aproximado*. Esto dio origen a lo que se conoce actualmente como Teoría de la Posibilidad y Lógica Difusa, ya de amplia divulgación y que ha sido objeto de atención por numerosos investigadores y especialmente desarrollada por Dubois y Prade (1988). Actualmente son numerosos los sistemas expertos que hacen uso de estos conceptos tanto para la representación del conocimiento como para la implementación de los mecanismos de inferencia.

proposiciones verdaderas. Un problema es de decisión si su resolución implica la afirmación o negación de un predicado lógico. Un problema de decisión es *decidible* si y solo si existe un algoritmo que lo resuelva, en caso contrario es indecidible.

La *teoría de la posibilidad*, propuesta por Zadeh en 1978, es uno de los marcos explicativos y metodológicos utilizados para el tratamiento y explicación de situaciones donde la información es incompleta o imprecisa. En ocasiones se le reconoce como una *teoría de la incertidumbre* y como un complemento a la teoría de la probabilidad. Sin embargo existen diferencias, una de las principales es el uso, en la *teoría de las posibilidades*, de dos funciones: las medidas de *posibilidad* y de *necesidad*⁵; en contraposición al uso de una sola función: la *probabilidad*, para la *teoría de la probabilidad*. La teoría de la posibilidad dice que un suceso del mundo real podría representarse por el par de funciones anteriores, que pueden ser evaluadas e interpretadas tanto en su valor numérico como en su significado semántico. La representación posibilística de la incertidumbre requiere de una escala ordenada, de naturaleza cualitativa que provee una representación alternativa de la ignorancia del suceso.

La consideración de una lógica difusa (continua) como parte de la teoría de la probabilidad, presenta por lo menos dos dificultades (Morillas, 2006). En primer lugar, la probabilidad trata de la incertidumbre en la ocurrencia de sucesos bien definidos, mientras que la lógica continua trata del grado de ocurrencia de sucesos mal definidos. En segundo lugar, es un hecho matemático que la intersección de un conjunto con su complementario es siempre el conjunto vacío; por el contrario, trabajando con conjuntos difusos esto casi nunca sucede.

La existencia de dos funciones en la teoría de la posibilidad, hace más manejable el tratamiento de información parcial o con cierto grado de incertidumbre. Su aplicación en estructuras de datos ordinales es una consecuencia de la no-aditividad de las funciones de posibilidad, que proporcionan una semántica que clasifica la forma natural en que se hacen las declaraciones lógicas en el lenguaje cotidiano. De ahí que es interpretada como un punto de vista “grueso”, o una versión no-numérica de la teoría de la probabilidad; como un marco de razonamiento con probabilidades extremas o como un enfoque de razonamiento con probabilidades imprecisas (Dubois, 2000).

Formalmente una distribución de *posibilidad* es un mapeo Π de un conjunto de estados de un sistema S a un conjunto de valores totalmente ordenado en el intervalo $[0,1]$. La función Π representa el conocimiento que se tiene de una situación, distingue entre lo que es más

⁵ La función de *posibilidad* $\Pi(\cdot)$ representa lo que sucede en el mundo real, mientras que la *necesidad* $N(\cdot)$ representa el cúmulo de conocimientos que se tiene acerca del suceso.

plausible –lo más esperado- de lo menos plausible. Representa una restricción flexible de la situación del estado del sistema con la convención de que:

$\pi(s) = 0$ representa un estado s que es imposible que ocurra.

$\pi(s) = 1$ establece que el estado s es totalmente posible.

Si el espacio de estados del sistema es exhaustivo, por lo menos uno de sus elementos debe ser del mundo real –en el caso del desarrollo sustentable, todos los elementos del espacio de estados son reales-, de modo que al menos un estado es totalmente posible (normalización).

Las formas extremas del conocimiento parcial en la teoría de la posibilidad, se expresan como:

- *Conocimiento completo*: para un estado s_0 , $\pi(s_0) = 1$ y para otros estados s : $\pi(s) = 0$; lo que significa que solo s_0 es posible
- *Completa ignorancia*: $\pi(s) = 1, \forall s \in S$, (cualquier estado es totalmente posible).

Al preguntarse *¿se produce un suceso A?*, donde A es un subconjunto de los estados, se puede obtener una respuesta mediante el cálculo de *los grados de posibilidad y la necesidad*, respectivamente (si la escala es la posibilidad está en el intervalo [0,1])

$$\Pi(A) = \sup_{s \in A} \pi(s)$$

$$N(A) = \inf_{s \notin A} 1 - \pi(s)$$

El grado de posibilidad $\Pi(A)$ evalúa en qué medida un acontecimiento es coherente con el conocimiento π , mientras que $N(A)$ evalúa en qué medida A está implícita en el conocimiento: $N(A) = 1 - \Pi(A^c)$; donde A^c es el complemento de A . En general,

$$\Pi(S) = N(S) = 1 \quad \text{y} \quad \Pi(\emptyset) = N(\emptyset) = 0.$$

Las medidas de *posibilidad* satisfacen la propiedad básica de *maximización*:

$$\Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B)),$$

mientras que las medidas de *Necesidad* satisfacen el siguiente axioma de las medidas de posibilidad:

$$\Pi(A \cap B) = \min(\Pi(A), \Pi(B)).$$

El conocimiento humano se expresa a menudo en una forma declarativa mediante oraciones a las que se adjunta una calificación de creencias –como se vio al construir el elemento de información generalizado-. La asignación de un valor a la incertidumbre de la información se puede hacer a través del valor α y decir entonces que *A tiene una certeza de grado α* ,

entonces ser modelado por la restricción $N(A) \geq \alpha$. La distribución de posibilidad que responden a esta posibilidad, asigna el valor de 1 a los estados donde A es verdadera y $1-\alpha$ a los estados donde A es falsa. Además la teoría de la posibilidad tiene como una de sus bases el *principio de mínima especificidad*, que asegura que la distribución más específica es el más restrictiva e informativa.

Aplicación a la construcción de un indicador ambiental como componente del desarrollo sustentable.

La teoría de lógica difusa de Zadeh se ha desarrollado como una herramienta elemental para el control de subsistemas y procesos complejos, ya que los sistemas difusos permiten modelar sistemas no lineales, y conocer de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje. La lógica difusa surge como una generalización de la lógica booleana tradicional, en la que los conjuntos son considerados como sistemas con solo dos posibles valores o estados: de “pertenencia” o “no pertenencia” (inclusión o exclusión), donde tradicionalmente se define una función característica, f_A que describe la pertenencia de un elemento x al conjunto A , como:

$$f_A = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Así, la pertenencia de un elemento al conjunto A queda fraccionada y las relaciones entre conjuntos quedan categorizadas, siendo la transición entre dos conjuntos (o estados) A y B radical e inmediata, es decir, f_A es la función característica del conjunto clásico A , también llamado conjunto rígido (crisp). En términos de *conjuntos difusos* se generaliza esta función, dado el conjunto completo X , un conjunto difuso \tilde{A} en U es un conjunto de pares ordenados:

$$\tilde{A} = \{x \in X, \mu_{\tilde{A}}(x)\}$$

Donde $\mu_{\tilde{A}}(x): X_{\tilde{A}} \rightarrow M$ es la *función de pertenencia* de los puntos $x \in X$ que indica los distintos grados de pertenencia $\mu_{\tilde{A}}(x)$ agrupados de forma ordenada en el conjunto de pertenencia M , normalmente acotado entre $[0,1]$. Mediante esta función se define completamente un conjunto difuso, donde x pertenece con un cierto grado a \tilde{A} ⁶.

En lógica difusa una idea fundamental es que los elementos claves del pensamiento no son numéricos, sino que son ideas con cierto grado de vaguedad, donde los elementos

⁶ Zadeh (1978) interpreta el valor de pertenencia $\mu_A(x)$ como la *posibilidad* de que el parámetro cuyo valor es quasi-desconocido y que viene descrito por el conjunto difuso \tilde{A} . El valor de x fluctuará entre 0 (totalmente imposible) y 1 (totalmente posible).

pasan de un conjunto a otro de manera suave y flexible, convirtiéndose de esta forma en una herramienta atractiva para manejar la incertidumbre.

El uso de modelos difusos para medir el desarrollo sustentable con base en un conjunto de indicadores tiene fundamentalmente dos metodologías: la lógica difusa y la agregación de conjuntos difusos Cornelissen *et al.* (2001). Los conjuntos difusos son determinados por sus funciones de pertenencia, comúnmente, el número de conjuntos difusos es definido de manera tal que contenga todo el rango de posibles valores que podría adoptar la variable. Este rango de variación es conocido como *universo de discurso*. Las funciones de pertenencia generalmente son funciones continuas cuyo dominio es el conjunto de discurso y su imagen un valor real entre 0 y 1, el cual representará el grado de pertenencia de la variable al conjunto difuso en cuestión. Estos conjuntos de pertenencia, junto a las reglas difusas, determinarán el comportamiento que tendrá la variable de salida.

Las operaciones con conjuntos difusos requieren de la formulación de reglas para combinar los conjuntos de pertenencia y los conjuntos de unión, intersección y complemento. Estas operaciones entre conjuntos se asocian con las conexiones lingüísticas *y-o*. Así, la intersección se asocia a *y*, mientras que la unión a *o*. De esta manera se pueden conectar y manipular los conjuntos para obtener nuevos conjuntos de pertenencia. En principio, no existen reglas generales o un método de construcción de reglas difusas o de funciones de pertenencia, por lo que éstas son determinadas por el investigador. No obstante deben cumplir con propiedades especiales para la intersección y para la unión llamadas t-normas y t-conormas respectivamente⁷.

Mediante la lógica difusa es posible razonar de un modo más parecido a como lo hacen los seres humanos, ya que en los razonamientos a menudo es necesario utilizar información incompleta o que no es muy precisa. En el momento de clasificar características de los ecosistemas, tal como la calidad ambiental o la fragilidad natural⁸, no siempre existe una manera de hacerlo de un modo excluyente como se hace utilizando conjuntos convencionales. Por ejemplo, supongamos que queremos clasificar la *fragilidad natural*⁹ de

⁷ Un libro muy accesible para estudiar la teoría y aplicaciones es el de Kaufmann (1987).

⁸ Estas variables se emplearon en el trabajo de investigación desarrollado para la construcción de un Índice Difuso de Desarrollo Sustentable para el estado de Puebla (Cordero-Elizalde, 2009)

⁹La *fragilidad natural* se define como la capacidad intrínseca de una unidad territorial a enfrentar agentes de cambio, basado en la fortaleza propia de los componentes y en la capacidad y velocidad de regeneración del medio (SEMARNAP-SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2000). La fragilidad proviene de la asociación resistencia-resiliencia, es decir de la relación entre la habilidad de una unidad territorial a evitar desplazamientos desde un estado de equilibrio dinámico y la velocidad a la cual regresa a la situación de equilibrio si se ha manifestado

un municipio, la metodología establece que debe presentarse en cinco clases: muy alta, alta, media, baja y muy baja. Para clasificarla se determina la asociación entre la pendiente, el suelo y la vegetación; de tal forma que un ecosistema con alta fragilidad puede estar compuesto por un bosque mesófilo de montaña ubicado en laderas pronunciadas; debido a que cualquier cambio de origen natural o antrópico impacta fuertemente sobre este ambiente y puede modificarlo irreversiblemente, eliminándose la cobertura vegetal y el suelo. Por otro lado las zonas con baja fragilidad se regeneran rápidamente aún cuando existan impactos considerables.

Con seguridad, no se dudaría en afirmar la pertenencia de un municipio a la clase de muy alta fragilidad natural si se satisfacen completamente cada uno de los criterios propuestos, que ya de forma natural llevan implícito un grado de incertidumbre al tener como unidad de medida el área que da cuenta de la superficie del territorio que se encuentra con un suelo, vegetación y pendiente específicos. ¿Qué pasa sin embargo si queremos clasificar a un municipio que tiene andosoles, con una pendiente en el límite de los 45°, una gran parte de su territorio es bosque templado y la disección es “*moderada*”? La clasificación guarda cierto grado de incertidumbre y se podría decir que pertenece al mismo tiempo a dos tipos de clasificación (alta y muy alta); es entonces que, la decisión final está reservada a la opinión del conocimiento experto, que intuitivamente podría decir que “pertenece más” a un conjunto que a otro y sin embargo su decisión tendría la misma validez si el resultado fuese *alta* o *muy alta*. Es aquí donde se aprecia la utilidad de los conjuntos difusos pues nos permiten expresar grados de pertenencia que no se pueden manifestar fácilmente con los conjuntos convencionales.

alguna perturbación del sistema. La fragilidad se analiza desde un punto de vista puramente natural, sin considerar elementos sociales o económicos.

Para la clasificación la metodología establece una matriz de criterios como la de la tabla 1.

Fragilidad natural	muy alta	alta	media	baja	muy baja
Vegetación	Bosque mesófilo; bosque templado; selva	Pradera de alta montaña; bosque templado; matorral	Pastizal natural; vegetación halófila	Palmares, sabanas	No existe en el país debido a las características del medio
	Y	Y/O	Y/O	Y	
Relieve	Montañas muy disectadas y conos	Montañas de disección moderada, volcanes poco	Relieve kárstico con disección alta,	Terrazas con discción moderada	Idem
	O	O	O	O	
Pendiente	>45°	25 – 45°	12 – 25°	0 - 6°	
	Y	Y/O	Y/O	Y	
Suelo	Gleysoles, andosol gléico	Regosol, cambisol, andosol, luvisol, acrisol,	Vertisol, rendzinas, planosoles, arenosotes,	Xerosoles, faeozem, castañoze ms	Idem

Tabla 1: Criterios básicos para clasificar la fragilidad natural.

Fuente: SEMARNAP-SEDESOL-CONAPO-INEGI (2000).

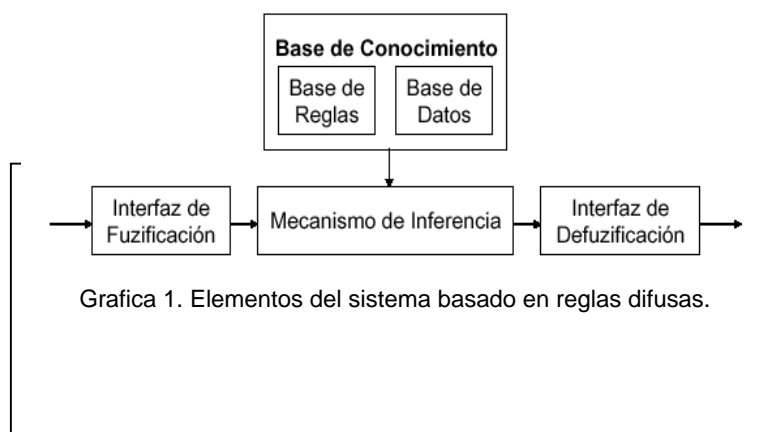
La necesidad de tomar decisiones respecto a la conservación o explotación de un recurso o ecosistema, va irremediablemente asociada a riesgo e incertidumbre (Funtowicz y Ravetz, 1991). Cierta riesgo puede ser manejado asignando probabilidades a los posibles eventos que aparecen en el corto plazo. De esta forma, para el desarrollo sustentable es posible maximizar el valor esperado conociendo el conjunto de posibles “estados de la naturaleza” así como todas las situaciones intermedias que incluyan las dimensiones: social, económica, ambiental e institucional.

Para decidir sobre la ocupación y ordenamiento del territorio en Puebla, se ha utilizado un sistema basado en reglas difusas y la propiedad de maximización de la medida de posibilidad; para calcular un indicador difuso de potencial natural como componente de un *índice difuso de desarrollo sustentable* (Cordero-Elizalde, 2009), para lo cual se consideró a

¹⁰ Guía metodológica para el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial. (SEMARNAP-SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2000)

la fragilidad natural y la calidad ecológica¹¹, definidas para su empleo en el ordenamiento del territorio (SEMARNAP-SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2000), y calculadas como medidas difusas que se procesan con técnicas de razonamiento aproximado.

Un sistema basado en reglas difusas está formado por (1) una base de conocimiento constituida por una base de reglas que contiene el conjunto de acciones a realizar y una base de datos que contiene la definición lingüística de las variable; (2) un mecanismo de inferencia, que realiza el proceso de razonamiento para estimar la salida en función de la entrada y (3) entradas y salidas nítidas, que incluye una interfaz de fuzzificación, que convierte la entrada nítida en un valor difuso y un interfaz de defuzzificación, que transforma la salida difusa en un valor nítido (crisp).



La base de reglas del indicador difuso de potencial natural es del tipo:

R1: **SI** QE es muy baja y FN es muy alta **ENTONCES** PNat es muy bajo

R2: **SI** QE es muy baja y FN es alta **ENTONCES** PNat es bajo

·
·

R125: **SI** QE es muy alta y FN es muy baja **ENTONCES** PNat es muy alto.

Donde QE es la calidad ecológica y FN la fragilidad natural, obtenidas del Programa Estatal de Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla (2004); PNat es el *potencial natural* –una medida difusa del estado de las condiciones del medio natural que representa su capacidad

¹¹ La *calidad ecológica* es un resumen de las condiciones del medio natural, es una condición que se refiere al mantenimiento de los elementos y procesos geocológicos dentro de una unidad territorial, o ecosistema, cuando un agente de presión deteriora los recursos, se modifica la estructura de los elementos del sistema y los procesos son afectados, situación que reduce la calidad de los recursos naturales.

para responder a agentes de cambio-, que se obtuvo para 213 de los 217 municipios del Estado de Puebla que contaban con información completa.

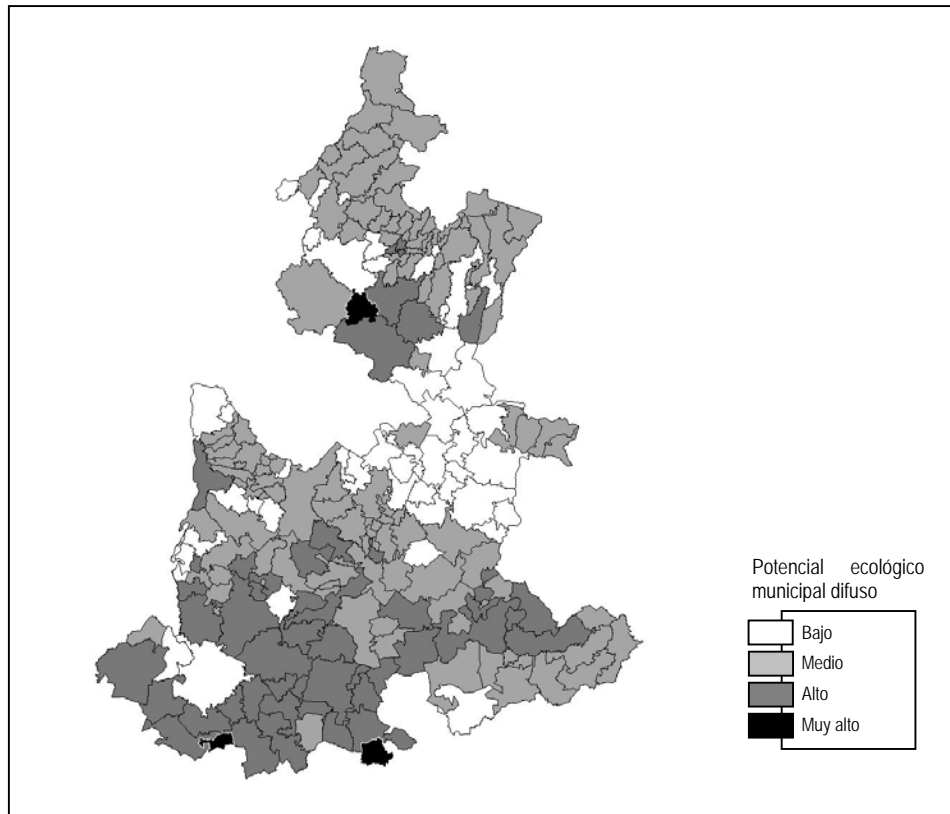
El mecanismo de inferencia supone funciones de pertenencia triangulares provenientes de una base de datos conformada con elementos de información del tipo *⟨atributo, objeto, valor, credibilidad⟩*, es decir:

⟨QE, municipio X, [muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo], [alta, media, baja]⟩

⟨FN, municipio X, [muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo], [alta, media, baja]⟩

para obtener elementos del tipo:

⟨Pnat, municipio X, [muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo], [alta, media, baja]⟩



Mapa 1. Potencial ecológico municipal difuso del estado de Puebla. Elaboración propia

Finalmente se obtuvo una clasificación municipal del estado de Puebla como la que se muestra en el mapa 1, conformada por 116 municipios con PNat medio; 49 con PNat alto; 45 bajo y solo 3 municipios con PNat muy alto. Esto es, la mayor parte del estado tiene un potencial natural medio, lo que significa que ante las condiciones del medio natural: relieve, pendiente, erosión, estado de la vegetación, presión por sobrepastoreo, tipo de suelo,

contaminación de agua superficial y la condición de acuíferos; el territorio tiene una capacidad media de responder a agentes de cambio locales –bajo las mismas tendencias en que se encontraba el municipio en el periodo de su evaluación. La propagación de la incertidumbre como resultado del encadenamiento de las reglas de inferencia y las funciones de posibilidad es un trabajo actual que se analiza con medidas de confianza del tipo Dubois y Prade.

Conclusiones

El conocimiento incompleto de las dimensiones en que se ha segmentado al mundo para modelarlo en un marco de sustentabilidad introduce grados de incertidumbre en la medición del desarrollo sustentable; por su naturaleza existen limitaciones en la forma de representar integralmente el conocimiento económico, social, ambiental y político del territorio. Las causas son la información incompleta o poco confiable; que origina un conocimiento impreciso y contradictorio, lo que conduce a un deficiente poder descriptivo y a una representación parcial y segmentada de la realidad.

Las técnicas de razonamiento aproximado aplicadas a la medida de la sustentabilidad mediante el uso de indicadores, dan una nueva perspectiva a la interpretación del desarrollo sustentable en contextos de información limitada tanto en su disponibilidad a nivel municipal como en su comparabilidad temporal. No se trata de reducir la incertidumbre, originada desde los propios sistemas de medición, sino más bien de poder determinarla y conocer la forma en que afecta la construcción de un índice agregado.

La construcción de indicadores a través de modelos de razonamiento aproximado, basados en la teoría de la posibilidad es un campo fértil del conocimiento que presenta múltiples facetas de investigación tanto básica como aplicada en situaciones como la que actualmente presenta la información a nivel municipal en México, frecuentemente insuficiente y limitada tanto espacial como temporalmente.

Referencias bibliográficas

- ANDRIANTIATSAHOLINIAINA, L. (2004) Evaluating strategies for sustainable development: fuzzy logic reasoning and sensitivity analysis. . *Ecological Economics*, 48 i2, 149-172.
- BOISIER, S. (2003) ¿Y si el desarrollo fuese una emergencia sistémica? *CLAD Reforma y Democracia*, 27.
- CORDERO-ELIZALDE, J. (2009). Una propuesta alternativa para la medición del desarrollo sustentable en el estado de Puebla. *Tesis doctoral. Instituto de Ciencias BUAP*. México.
- CONTIGGIANI, F. C. D. M. (2006) A Fuzzy Set Approach to Poverty Measurement. *Fuzzy Economic Review*, 11, 37-55.
- CORNELISSEN, A.M.G., J. van den Berg; W.J. Koops; M. Grossman y H.M.J. Udo (2001): Assessment of the contribution of sustainability indicators to sustainable development: a novel approach using fuzzy set theory. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 86: 173-185.
- DUBOIS D., y PRADE, H. (1988) Possibility Theory, New York: *Plenum Press*.
- DUBOIS, D. et.al. (2000) Fuzzy sets and probability: misunderstandings, bridges and gaps. IN PRADE, D. D. Y. H. (Ed.) *Fundamentals of Fuzzy Sets*. Boston, Kluwer.
- FUNTOWICZ, S.O. y J.R. RAVETZ (1991) *A new scientific methodology for global environmental issues*. En Constanza, R. (ed.): *Ecological Economics*. New York. Columbia University Press: 137-52.
- GALLOPÍN, G. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. Serie: medio ambiente y desarrollo (Vol. **64**). Chile: CEPAL.
- GÖDEL, K. (1931) *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme, I*. Monatshefte für Mathematik und Physik, **38**. 173-198.
- KAUFMANN, A. Y GIL ALUJA, J. (1987): *Técnicas operativas de gestión para el tratamiento de la incertidumbre*. Barcelona. Ed. Hispano Europea
- MORALES, M. A. (2008) La teoría de conjuntos difusos como una opción para medir la pobreza: el caso de México. *El Trimestre Económico*, 75, 641-662.
- MORILLAS, A. (2006) *Introducción al análisis de datos difusos*. Notas de clase para el curso de doctorado en economía cuantitativa. Universidad de Málaga.
- MORIN, E. (1990) *Introduction à la pensée complexe*, Paris, ESPF Éditeur.
- PEARCE, D.W. y G.D. ATKINSON (1995) Measuring sustainable Development. *En Bromley, D. (ed.): Handbook of Environmental Economics*. Oxford. Blackwell. 166-181.

PHILLIS, Y. A., y ANDRIANTIATSAHOLINIAINA L. A. (2001) Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics*, Elsevier. **37**(3), 435-456.

SEMARNAT-SEDESOL-CONAPO-INEGI (2001) *Guía metodológica para el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial*. México.

TORRES A. M., C. T. R. (2004) ¿Inferencia y razonamiento probabilístico o difuso? *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*, 19, 157-165.

ZADEH, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, 338-353.

ZADEH, L. (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, **1**: 3-28.