

Análisis de Sostenibilidad Ambiental basada en un Modelo Físico

Environmental Sustainability Analysis based on a Physical Model

Mario A. Gonzales Torres ¹

Recibido: Enero 2019 - Aprobado: Junio 2019

RESUMEN

La investigación analiza la sostenibilidad de indicadores ambientales lo cual es esencial en las propuestas de modelos de desarrollo sostenible. En similitud al modelo ideal físico del movimiento armónico de masas para su aplicación en un concepto de sostenibilidad, se utiliza el Método Holzer Adaptado para conceptualizar el Movimiento Armónico Sostenible (MAS) en sus dimensiones económico, social, ambiental e institucional de los componentes de sistemas ambientales. Se expone las principales características, ventajas y desventajas del MAS. Asimismo, se establecen los requerimientos y el análisis de gráficos para la aceptación de simulaciones de los modelos. Finalmente, se presentan los resultados de simulación de sostenibilidad aplicados a un grupo de indicadores ambientales. La aplicación comprueba que el análisis de los componentes de sostenibilidad mediante el modelo físico facilita la toma de decisiones para optar por un modelo óptimo de valores de indicadores.

Palabras clave: Desarrollo sostenible; Sostenibilidad Ambiental; Indicadores Ambientales.

ABSTRACT

The research analyzes the sustainability of environmental indicators, which is essential in the proposals for sustainable development models. In similarity to the ideal physical model of the mass harmonic movement for its application in a sustainability concept, the Holzer Adapted Method is used to conceptualize the Sustainable Harmonic Movement (MAS) in its economic, social, environmental and institutional dimensions of the components of systems environmental. The main characteristics, advantages and disadvantages of the MAS are exposed. Likewise, the requirements and the analysis of graphics for the acceptance of simulations of the models are established. Finally, the results of simulation of sustainability applied to a group of environmental indicators are presented. The application verifies that the analysis of sustainability components through the physical model facilitates decision making to opt for an optimal model of indicator values.

Keywords: Sustainable Development; Environmental Sustainability; Environmental Indicators.

¹ Grupo de Investigación Gestión Geográfica Ambiental (GEOAMB), Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
E-mail: mgonzalest@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Los conocimientos de las ciencias físicas han generado el avance de otras, como por ejemplo la ecología y la economía, para lo cual se requiere lograr un nivel de conceptualización operativo que son descritos en diferentes fenómenos físicos como la entropía, leyes termodinámicas. (Gómez, 1999)

La diversidad de análisis de la sostenibilidad y su correlación con base de datos estadísticos que la sustenten han sido aplicadas en la idea de cuantificar la sostenibilidad.

El análisis de la sostenibilidad de indicadores ambientales es una aplicación en similitud al análisis de un sistema de masas sometido a un movimiento armónico simple de varios grados de libertad. Su determinación favorece a tener un sistema de indicadores óptimo para la sostenibilidad.

Así la investigación busca realizar el análisis de sostenibilidad de indicadores ambientales sobre la concepción de sostenibilidad la cual está integrada por cuatro componentes de sostenibilidad y en la premisa de que el sistema debe moverse armónicamente en sus componentes económico, social, ambiental e institucional. La determinación de un sistema de indicadores ambientales permite representar un modelo de sostenibilidad óptimo.

1.1 Antecedentes

En el análisis de un sistema se ha desarrollado diversos modelos sustentados en leyes físicas y matemáticas. En tal contexto las leyes de la física, con la primera y la segunda leyes de la termodinámica, han contribuido a la teoría económica, y asociados a caracterizar el consumo de recursos; y el uso de materia de baja entropía para generar desechos de alta entropía. (Ayres, 1998)

En la investigación de (Smerlak, 2015) se desarrolló una teoría termodinámica de las desigualdades basada en la analogía entre la estratificación económica y la entropía estadística, determinando que puede establecerse en modelos con interacciones socioeconómicas y para una economía aislada se establece la relación entre la escases económica y entropía termodinámica (Kovalet, 2016)

En el análisis de sostenibilidad se ha realizado investigaciones orientadas a establecer indicadores de sostenibilidad sustentados en la teoría de conjuntos difusos sobre la base de una definición de sostenibilidad (García et al., 2014)

II. MARCO TEORICO

La Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo 1987, define el concepto de Desarrollo Sostenible como un “desarrollo que está en condiciones de cubrir las necesidades actuales sin obstruir al mismo tiempo para las generaciones futuras las posibilidades de satisfacer sus propias necesidades”. (Thesing et al, 1997)

En 1992 la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente desarrolla el concepto en relación a los

factores ambientales, sociales y económicos. Asimismo en consideración a la conceptualización en la Cumbre de Johannesburgo 2002 se establece como otro componente o pilar la sostenibilidad institucional.

En el contexto nacional se ha establecido la Política Nacional Ambiental, mediante D.S.Nº012-2009-MINAM y en cual se establece los ejes de política necesarios para lograr un desarrollo sostenible.

Teniendo en consideración que las dinámicas económicas, sociales, ambientales e institucionales y sus interrelaciones requieren construir un conjunto de indicadores para el desarrollo sostenible que incorporen los principales indicadores ambientales provenientes de la economía, lo social, ambiental, e institucional con lo cual lograr integrar y conceptualizar en un modelo (CEPAL, 2009).

La sostenibilidad se define como la meta del desarrollo sostenible con el objeto de mejorar la calidad de vida y el entorno, en la visión prospectiva de no destruir el sustento de la vida de las generaciones futuras (Sifuentes, 2009).

Así también una sociedad sostenible debe tener la capacidad de solventar los requerimientos básicos de su población en forma justa y equitativa aprovechando los recursos sin degradar o agotarlos.

2.1 Definición Sostenibilidad

Es un proceso en el que un sistema puede mantenerse por sí mismos por cierta capacidad de resistir considerando que la sustentabilidad o sostenibilidad contempla los niveles económico, ambiental, social y cultural (Schulz et al., 2013).

2.2 Indicador de sostenibilidad

La medición de la sostenibilidad en la presente investigación está asociada principalmente a la definición de indicador la cual es usado en más de un sentido en las distintas ciencias o disciplinas y es asociado a datos, estándares, metas o umbrales. Se define a los indicadores como variables cuyo propósito es medir un cambio en un determinado fenómeno o proceso siendo objetivamente verificables y replicables, y percibidos como un instrumento analítico que facilita la medición de cambios por los que atraviesa un sistema.

Así las estrategias para determinar los indicadores de sostenibilidad apropiados se establece según los siguientes alcances: “1. Selección de indicadores a partir de una aproximación intuitiva (subjetiva). 2. Selección de indicadores a partir de un menú construido con base en experiencia previa. 3. Selección de indicadores a partir de un modelo causa/efecto o una aproximación analítica”. (Glave et al., 1995).

2.3 Modelo Armónico Simple

Fundamentado en la Ley de movimiento de Newton con la ecuación $\sum F=ma$, la ecuación de movimiento para un sistema de masa en movimiento es determinado por esta ley. Para un sistema con un grado de libertad se tiene la oscilación vertical. Ver figura 1 (a).

La ecuación de movimiento esta dado por:

$$m\ddot{x} = -k(d_{st} + x) + mg$$

Donde:

m =masa, g =gravedad, d_{st} =deflexión estática

Considerando que la ecuación del movimiento es: $m\ddot{x} + kx = 0$ su solución es: $x = A \text{sen}(K/m)^{1/2}t + B \text{cos}(k/m)^{1/2}t$ y para condición inicial $A=0, B=x_0$, se tiene $x = x_0 \text{cos}(k/m)^{1/2}t$

Donde:

Periodo: $T = 2\pi/(K/m)^{1/2}$ Frecuencia Natural: $F_n = 1/T$ cps y Frecuencia natural angular es: $(k/m)^{1/2} = \omega_n \text{ rad/s}$

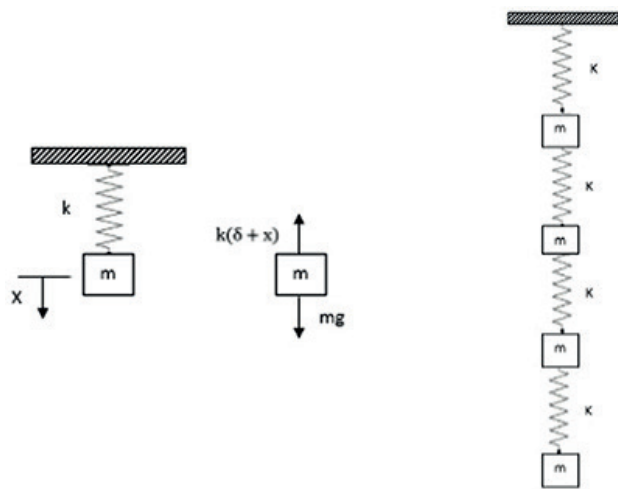


Figura N°1. Sistema un grado de libertad (a) y varios grados de libertad (b)

Para sistemas con más grados de libertad la solución del problema es también encontrada con el uso de diferentes métodos como Método de la Ecuación de movimiento, Coeficientes de Influencia, Matrices, Iteración de Matrices, Stodola, Holzer, Impedancia Mecánica, Principio de Ortogonalidad. Ver figura N°1 (b).

El método Holzer es un método tabular usado para determinar las frecuencias naturales de un sistema de masas unidades soportadas en un extremo. Se basa en asumir frecuencias sucesivas, cada una seguida por el cálculo de las amplitudes del sistema. (Seto, 1964). La ecuación que gobierna el sistema es:

i-1

$$x_i = x_{i-1} - (\omega^2/k_i) \sum m_j x_j$$

1

Donde:

x :Desplazamiento, m :Masa, ω :Frecuencia, k : Constante resorte, ω_n : Frecuencia Natural

La determinación de frecuencias naturales (ω_n)

se obtiene tabulando y graficando las frecuencias. La condición inicial es x igual a la unidad. Ver figura N°2.

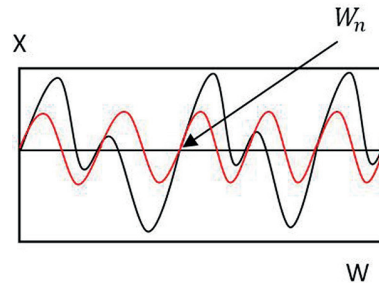


Figura N°2. Representación de ω_n en Movimiento Armónico

2.4 Movimiento Armónico Sostenible

La sostenibilidad de indicadores se sustenta en la configuración del sistema físico de indicadores sometido al movimiento armónico sostenible (MAS), considerándose el sistema de indicadores compuestos por el Indicador Económico, Indicador Social, Indicador Ambiental e Indicador Institucional que interactúan en un movimiento armónico ideal con frecuencias naturales y sin fricción o resistencia. Ver figura N°3.

Donde:

S: Desplazamiento de Sostenibilidad

I: Indicador de Sostenibilidad

W: Frecuencia de Sostenibilidad

K: Constante de Sostenibilidad

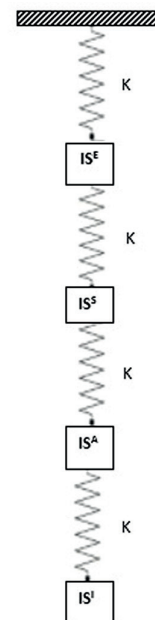


Figura N°3. Sistema de Indicadores de sostenibilidad

La evaluación para la solución del problema se determina utilizando el Método de Holzer Adaptado (MHA) determinándose las frecuencias naturales de sostenibilidad

con la condición inicial establecida de S unitario, mediante iteración siguiente:

$i-1$

$$S_i = S_{i-1} - (w^2/k_i) \sum I_j.S_j$$

1

Definiciones:

Desplazamiento de sostenibilidad (S): Es la amplitud con la cual el indicador respectivo se desplaza en correspondencia al Indicador.

Siendo sus componentes:

S^A : Sostenibilidad Ambiental

S^E : Sostenibilidad Económica

S^S : Sostenibilidad Social

S^I : Sostenibilidad Institucional

Frecuencia de Sostenibilidad (W): Son los valores de frecuencia con la cual el sistema se mueve.

Frecuencia de Natural de Sostenibilidad (W_n): Son los valores de frecuencia con el cual el sistema se mueve y para la cual la amplitud de sostenibilidad es cero.

Constante de Sostenibilidad (K): Se establece como valor de esta constante igual a 1.

Indicador de Sostenibilidad (I): Valor de indicador determinado para la sostenibilidad económica, social, ambiental e institucional.

III. METODOLOGÍA

La determinación de frecuencias naturales de sostenibilidad se establece de acuerdo al Método Holzer Adaptado (MHA) con la cual la tabulación de frecuencias de sostenibilidad se itera según la tabla siguiente. Ver tabla N°1.

Tabla N°1. Matriz de iteración de MHA

ítem	I=Indicador Sostenibilidad	S_i = Amplitud de Sostenibilidad							
		W=Frecuencia Sostenibilidad	W_1	W_2	W_3	W_4	W_{i-1}	W_i
1									
2									
3									
4									
5									

3.1 Pruebas para determinar la sostenibilidad de indicadores

Se establecen dos pruebas definidas seguidamente.

Prueba de variación de frecuencias naturales de sostenibilidad

Prueba cuantitativa, es determinada para cada modelo mediante la variación relativa de las frecuencias naturales

siendo el valor de ≥ 0.2 unidades de frecuencia con lo cual se tiene un **MAS**, valores menores generan superposición de frecuencias no siendo notorio su **MAS**.

Prueba de tendencia de frecuencias naturales de sostenibilidad

Prueba cualitativa, es determinada para cada modelo propuesto analizando la tendencia de las cuatro frecuencias naturales. El modelo estándar se compara con otros modelos en cuanto a sus indicadores y verificar la tendencia similar.

IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los valores de indicadores de sostenibilidad son los siguientes.

IS^E : Indicador Sostenibilidad Ambiental

IS^S : Indicador Sostenibilidad Económica

IS^A : Indicador Sostenibilidad Social

IS^I : Indicador Sostenibilidad Institucional

Para un modelo de sostenibilidad con 160 unidades de medida se asocian a los indicadores, 40 unidades para IS^E , IS^S , IS^A y 60, 70, 80 y 90 unidades en IS^I configurando los modelos 1, 2, 3 y 4.

De acuerdo a los valores de indicadores asociado a los 4 modelos se construye la tabla N°2, con lo cual se busca determinar gráficamente los valores de frecuencia naturales.

Tabla N°2. Valores de indicadores por Modelo

Indicador	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
IS^E	0.22	0.21	0.2	0.19
IS^S	0.22	0.21	0.2	2.15
IS^A	0.22	0.21	0.2	3.15
IS^I	0.38	0.37	0.4	5.34

Los gráficos generados por el Método Holzer Adaptado para cada modelo son los siguientes. Ver figuras N°4, N°5, N°6 y N°7.

De acuerdo al análisis grafico se obtuvieron los siguientes resultados para frecuencias naturales. Ver tabla N°3

Prueba de variación de frecuencias naturales (PVFN_160): La prueba aplicada a las frecuencias naturales de sostenibilidad da como resultado lo mostrado en la tabla N°4 siguiente.

Del cuadro y valores obtenidos para la variación de frecuencias naturales de sostenibilidad $n=160$ se establece que presentan valores de variación cercanos o lo más próximo entre ellos observándose que el modelo 1, modelo 3 y modelo 4 no son aceptables. El modelo 2 es aceptable pues se cumple que las variaciones son mayores de 0.20 y menores con respecto a los modelos 1, 3 y 4.

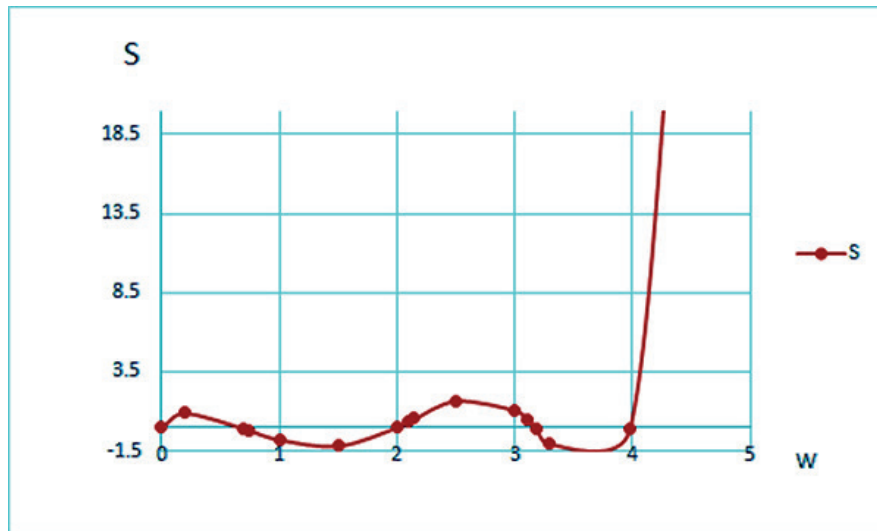


Figura N°4. Representación de frecuencias Modelo 1

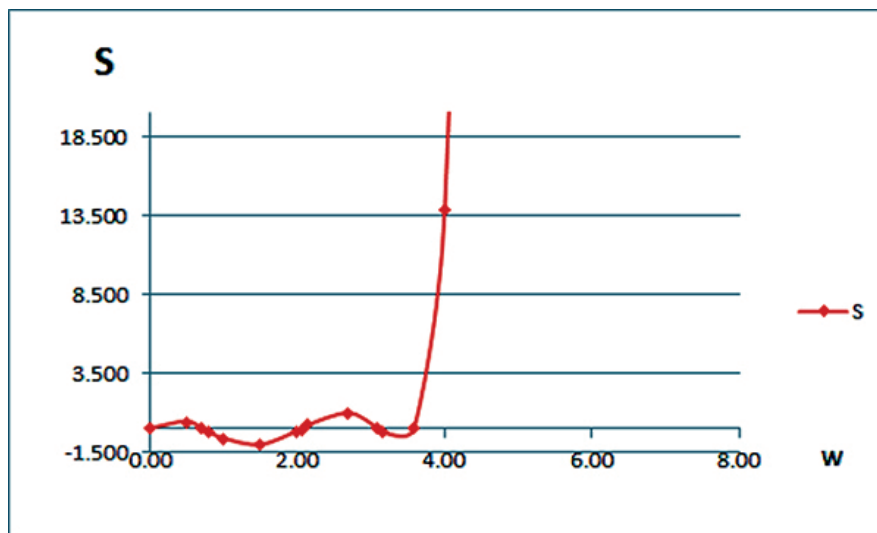


Figura N°5. Representación de frecuencias Modelo 2

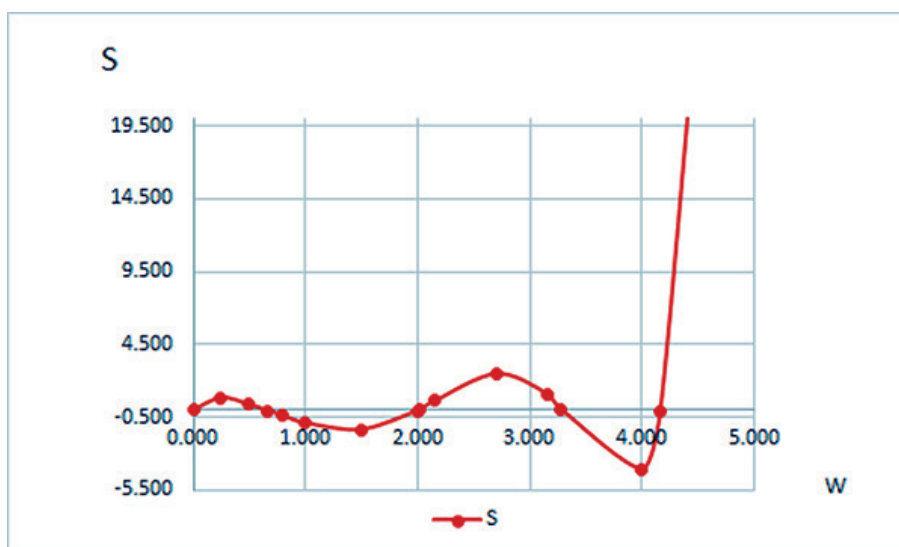


Figura N°6. Representación de frecuencias Modelo 3

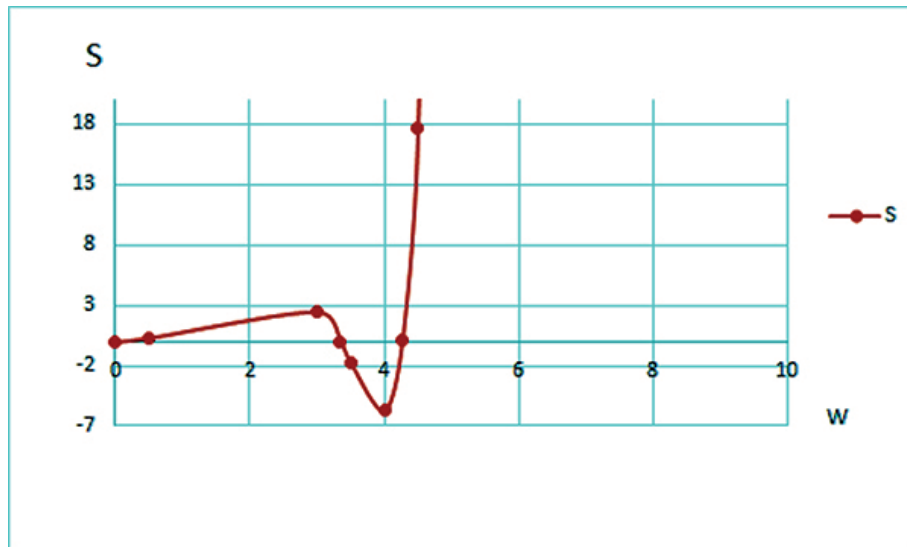


Figura N°7. Representación de frecuencias Modelo 4

Tabla N°3. Tabla de frecuencias naturales

Modelo de Sostenibilidad Minero Artesanal		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
		Wn	Wn	Wn	Wn
Sostenibilidad Económico	Indicador I_{MA}^E	0.7	0.69	0.76	3.35
Sostenibilidad Social	Indicador I_{MA}^S	2	2.06	2.01	4.26
Sostenibilidad Ambiental	Indicador I_{MA}^A	3.18	3.09	3.28	---
Sostenibilidad Institucional	Indicador I_{MA}^I	3.97	3.58	4.16	---
Condición de Sostenibilidad		Aceptable	Aceptable	Aceptable	No Aceptable

Tabla N°4. Variación de frecuencias naturales (160)

Variación Relativa de Wn	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
	Wn	Wn	Wn	Wn
Wn2-Wn1	1.3	1.37	1.35	0.91
Wn3-Wn2	2.18	1.03	1.27	---
Wn4-Wn3	0.79	0.49	0.88	---
Condición de Sostenibilidad	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable

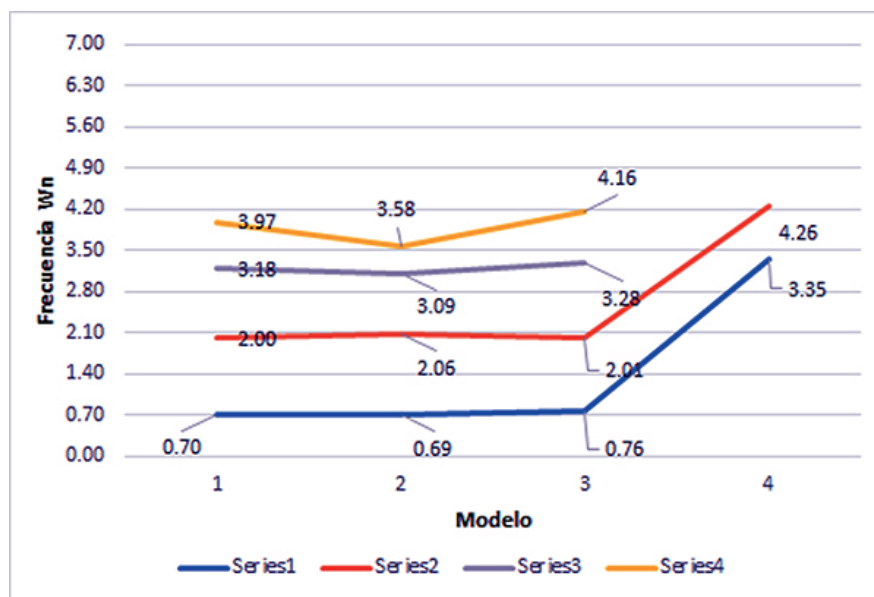


Figura N°8. Tendencia de frecuencias naturales por Indicador E, S, A, I en grupo de modelo (160)

Prueba de tendencia de frecuencias naturales (PTFN_160): La tendencia de frecuencias naturales de los cuatro indicadores para cada modelo se representa en la figura N°8, la cual se analiza también por cada indicador lo que se puede apreciar en la figura N° 9 a, b, c, d.

Del análisis de tendencia de frecuencias naturales en los modelos configurados en el grupo n=160 se tienen una tendencia positiva en los indicadores económico y ambiental, mientras que los modelos 1 y 2 presentan una tendencia positiva incompleta.

Del cuadro y valores obtenidos para la variación de frecuencias naturales de sostenibilidad del Modelo 160 se establece que presentan valores de variación cercanos o más próximos entre ellos observándose que el modelo 1, modelo 3 y modelo 4 no son aceptables. El modelo 2 es aceptable pues se cumple que las variaciones son mayores de 0.20 y menores con respecto a los modelos 1, 3 y 4.

Ventajas y Desventajas

La aplicación del modelo basado en el MAS posibilita el análisis cuantitativo de los indicadores de sostenibilidad para un grupo y conjunto de modelos de sostenibilidad.

El MAS es una aproximación ideal y acotada que puede en su análisis más real considerar aspectos físicos de amortiguamiento del sistema.

V. CONCLUSIONES

El análisis de un sistema de indicadores ambientales evaluados mediante el Modelo Armónico Sostenible

(MAS) para la determinación de frecuencias naturales de sostenibilidad y sometidos al análisis de variabilidad relativa y tendencia de frecuencias naturales permite establecer un estándar de referencia cuantitativo.

El análisis de la interacción armónica de los indicadores posibilita medir la sostenibilidad en conjunto con determinados grupos de indicadores de sostenibilidad.

VI. AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Académico de Ingeniería Geográfica de la FIGMMG de la UNMSM por el apoyo logístico para el trabajo de gabinete y al grupo de investigación Gestión Geográfica Ambiental (GEOAMB).

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayres, Robert 1998. Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological economics*. Volume 26, Issue 2. p189-209. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00101-8)
- Thesing, J., Hofmeister, W., & Adenauer, F. K. (1997). *Protección del medio ambiente: conceptos y políticas*. CIEDLA. p 189. <http://biblioteca.spda.org.pe/biblioteca/catalogo/ver.php?id=1944&idx=16002>
- CEPAL. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. p 22. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5502>
- García, Maria; Flores, Lucio; Venegas, Beatriz. (2014). Análisis del desarrollo sostenible en espacios locales. Aplicación de

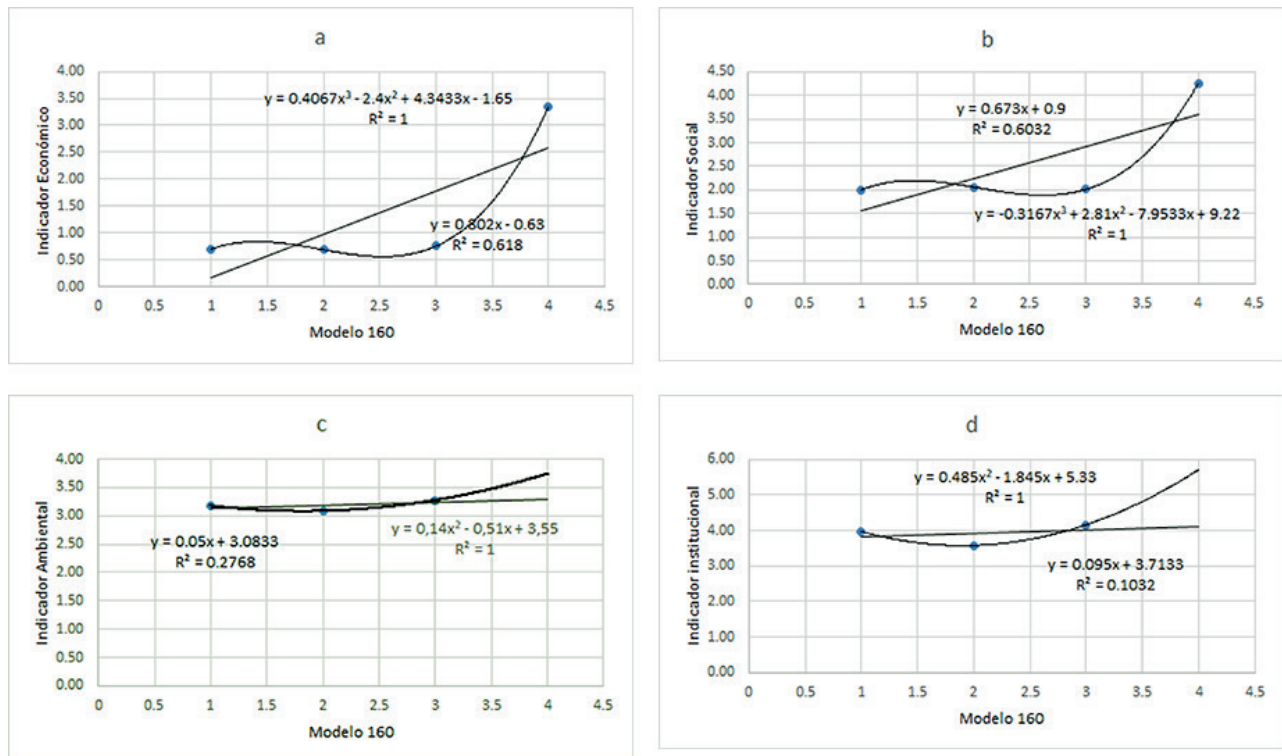


Figura N°9. Tendencia de frecuencias naturales por Indicador E, S, A e I en modelos (160)

- la teoría de conjuntos difusos. *Revista Iconos* N°54. Quito. <http://dx.doi.org/10.17141/iconos.54.2016.1454>
- Gómez, Luis. (1999). *La entropía y sus relaciones con la economía y la ecología*, Volumen 9. Número 15, p. 9-27. Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). Facultad de Ciencias Humanas y Económicas. Departamento de Economía. Colombia. DOI:10.15446/ede
- Kovalev, Andrey (2016). Misuse of thermodynamic entropy in economics. *Energy*. volume 100. Science direct. p 129-136. National Research University Higher School of Economics. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.071>
- Schulz Michel, Omland Clara, Wehrheim M, Schult R, Schmidt E. (2013). *La sostenibilidad en Latinoamérica: Hacia un buen vivir desde la perspectiva interdisciplinaria*. Lima. San Marcos. <http://www.librosperuanos.com/libros/detalle/13992/La-sostenibilidad-en-Latinoamerica.-Hacia-un-buen-vivir-desde-una-perspectiva-interdisciplinaria>
- Smerlack, Matteo. (2015) *Thermodynamics of inequalities: From precariousness to economics stratification*. Physica A: Statistical mechanics and its applications. volume 441. Elsevier.p 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.09.001>
- Glave, Manuel; Escobal, Javier. (1995). *Indicadores de sostenibilidad para la agricultura andina*. Debate Agrario 23. Madrid. Universidad Complutense de Madrid. <https://www.grade.org.pe/publicaciones/179-indicadores-de-sostenibilidad-para-la-agricultura-andina/>
- Sifuentes, Eudocio. (2009). *Energía Social libertad y bienestar*. p 47. https://books.google.com.pe/books/about/Energ%C3%ADa_social_libertad_y_bienestar.html?id=sPhSQwAACAAJ&redir_esc=y
- Taha, H. *Investigación de Operaciones*. Una Introducción. p209. <https://jrvargas.files.wordpress.com/2009/01/investigacion-de-operaciones-9na-edicion-hamdy-ataha-fl.pdf>
- Seto, William. (1964). *Theory and problems of Mechanical Vibrations*. New York. Schaum publishing co.