

Trilema Energético, Economía del Hidrógeno y Transición Energética: análisis de consistencia y complementariedad de sus índices de desempeño para América Latina y del Caribe

Fausto Posso Rivera, UDES. Programa Energy Senior, WEC Colombia

Efraín Pinzón Reyes. UDES. Colaborador

1. El contexto

La dinámica innovadora en los paradigmas del desarrollo humano y social está teniendo un efecto disruptivo en el sector energético, en todos sus ámbitos y actuaciones. Así, el Modelo del Desarrollo Sostenible, MDS, conformado por una compleja e interconectada red de objetivos, dimensiones e indicadores, le asigna a la dimensión de energía un rol estelar en el alcance del Desarrollo Sostenible. Este posicionamiento conlleva un conjunto de retos y desafíos asociados no sólo con la generación y provisión de servicios de energía limpia, sino también con su cobertura, y con la apropiación y aceptación social de las tecnologías energéticas asociadas.

Este escenario de requerimientos y acciones necesarias por el sector energético, ha impulsado el desarrollo de enfoques conceptuales, métodos y herramientas para identificar y valorar el grado de avance de países y regiones en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que permitan proponer ajustes y mejoras pertinentes en sus políticas y planes de desarrollo energético. Entre los modelos más conocidos están el Trilema Energético, la Economía del Hidrógeno y la Transición Energética [1,2,3].

Las metodologías de valoración asociadas con estos modelos se instrumentan a través de índices de desempeño, que cuantifican periódicamente, la actuación del sector energético, apoyándose en una estructura conformada por dimensiones, categorías e indicadores. Como resultado de esta evaluación se obtiene una lista de posicionamiento, de mayor a menor, de los países de una región.

En este contexto, el propósito de esta contribución es analizar los resultados de los tres índices para América Latina y el Caribe, LAC, considerando dos dimensiones de análisis: la dimensión estadística, para evaluar la consistencia intrínseca de la data y su correlación, en conjunto con la dimensión energética, para identificar similitudes y complementariedades, entre sus índices de desempeño. Más que un producto terminado, en un aporte a la discusión sobre elemento clave en el tránsito de la sociedad en la ruta hacia un estadio de desarrollo armónico y equitativo.

2. Conceptualización

El Trilema Energético es un modelo conceptual que propone tres dimensiones de caracterización y desempeño del sistema energético de un país o región: Seguridad energética, Equidad energética y Sostenibilidad ambiental. La primera dimensión, está relacionada con el suministro fiable, permanente y resiliente de servicios básicos de energía; la segunda, aborda el acceso a la energía de todos los habitantes en un ámbito considerado y la tercera está asociada con las acciones para la ralentización del impacto ambiental negativo de la generación y usos de la energía [1].

Por su parte, la Economía del Hidrógeno se concibe como una infraestructura energética de provisión y consumo de energía no contaminante, capaz de cubrir las necesidades de energía de todos los sectores de la sociedad de un país o región, mediante el despliegue del hidrógeno renovable en complementariedad con la electricidad. Esta infraestructura energética innovadora se concreta en la cadena de valor del hidrógeno renovable que comprende las etapas de producción, transformación, almacenamiento, transporte y uso final del hidrógeno renovable y derivados [2].

En cuanto a la Transición energética, se puede interpretar como un proceso dinámico de transformación progresiva de una infraestructura energética a otra con mejor desempeño, desde una visión integral. Así, el proceso de migración del uso de la leña al carbón, luego a la gasolina y otros combustibles líquidos, y posteriormente a gases combustibles, representan transiciones energéticas que han sucedido en los últimos siglos, con una regularidad histórica asombrosa [3, 4].

Para la valoración del impacto de cada uno de estos paradigmas energéticos, se han concebido y aplicado herramientas metodológicas y métricas de evaluación. Así, el Índice del Trilema Energético, ITE, desarrollado por el Consejo Mundial de la Energía, permite contar una evaluación integral del desempeño energético de los países y la detección de posibilidades de mejora, con la intención de lograr un sistema energético seguro, equilibrado y sostenible. Tal que representa un insumo relevante para planificación energética y estudios prospectivos mediante un conjunto de indicadores [5].

En el caso de la Economía del Hidrógeno, H2LAC, plataforma colaborativa concebida para impulsar el desarrollo del hidrógeno de bajas emisiones (HBE) y sus derivados en LAC, ha elaborado el H2LAC Index (IH2Lac), cuyo propósito es estimar el avance de la Economía del Hidrógeno en países de la región latinoamericana apoyada en cinco indicadores clave [6].

En cuanto a la evaluación del estado de la Transición Energética en países y regiones, el Foro Económico Mundial (WEF por sus siglas en inglés), ha formulado el Índice de Transición Energética (ITRNE), posicionando a los países según el desempeño de sus sistemas energéticos y sus acciones proyectadas para el progreso de la transición, utilizando dos categorías amplias e indicadores asociados. [7].

3. El posicionamiento en los índices de desempeño energético en LAC.

La ubicación de países en LAC en los tres índices, para el año 2024, se muestra en la Tabla 1. En el primer indicador, la clasificación es directa ya que el IH2Lac se ha enfocado en esta región; mientras que, para los otros índices, la posición de los países LAC, se extrae de su clasificación global en ellos.

Tabla 1. Clasificación de los países para los índices H2LAC, ITrelema Energético y Transición energética

Posición	Indice H2LAC		Indice Trilema energético		Indice Transición energética	
	País	Puntos	País	Puntos	País	Puntos
1	Chile	73.25	Uruguay	75.9	Brasil	65.7
2	Brasil	72.75	Chile	70.2	Chile	63.9
3	Colombia	72.25	Argentina	70.0	Costa Rica	61.3
4	Uruguay	54.75	Costa Rica	69.7	Uruguay	60.8
5	Costa Rica	54.70	Brasil	68.3	Colombia	60.7
6	Argentina	51	Ecuador	67.7	Paraguay	59.6
7	Panamá	45	Panamá	67.0	El Salvador	58.4
8	Perú	44	Perú	65.8	Perú	58.3
9	Paraguay	38.75	Colombia	65.7	Panamá	57.1
10	R. Dominicana	37.5	Paraguay	63.8	México	56.3
11	México	35.25	México	63.6	Bolivia	54.8
12	Trinidad&Tobago	23.75	El Salvador	62.5	Ecuador	53.2
13	Guatemala	22.75	Bolivia	61.6	Argentina	52.6
14	Ecuador	20.75	Guatemala	59.3	Guatemala	50.8
15	El Salvador	17.50	R. Dominicana	58.1	Honduras	48.8
16	Barbados	11.50	Trinidad&Tobago	57.7	Jamaica	46.6
17	Honduras	10	Jamaica	57.3	Nicaragua	46.0
18			Nicaragua	52.9		
19			Honduras	52.3		

En la Tabla 2 se muestran las cinco primeras posiciones del IH2LAC, ITE, y ITRNE para LAC. Se destaca el liderazgo de Chile al ubicarse en las dos primeras posiciones en todos los índices; seguido del desempeño de Brasil, mientras que los tres países restantes presentan una evolución oscilante, siendo Colombia el país con la diferencia más acentuada entre sus posiciones en los tres índices.

Tabla 2. Top Cinco en LAC

	IH2LAC	ITE	ITRNE
Chile	1	2	2
Brasil	2	5	1
Uruguay	4	1	4
Costa Rica	5	4	3
Colombia	3	9	5

4. Análisis estadístico

Los valores de los tres índices se analizaron en términos de su correlación; primero se verificó el cumplimiento del supuesto de Normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk [8]. Se obtiene que, para todos los índices, los valores del Estadístico (Tabla 3, columna 2) son cercanos a 1 (IH2Lac= 0.940; ITE=0.946; ITRNS=0.972), cumpliendo con el criterio de normalidad de los datos. También, se valora el nivel de Significancia (sig); así, como los valores de la columna 4 (Sig, p: probabilidad) son superiores a 0.05 para todos los índices (IH2Lac= 0.422; ITE=0.495; ITRNS=0.908) se garantiza que los resultados de los estadísticos no se dan por el azar de los datos, esta prueba fue aplicada a los 14 países (gl) en todos los ítems.

Tabla 3. Análisis de estadísticos de los tres índices de desempeño

Índice	Prueba de normalidad			Prueba de correlación		
	Shapiro-Wilk			Pearson		
	Estadístico	gl	Sig.	H2Lac	TE	TRNE
H2Lac	0,940	14	0.422	1	0.692	0.799
TE	0.946	14	0.496	0.692	1	0.763
TRNE	0.972	14	0.908	0.799	0.763	1

En cuanto a la Prueba de Correlación de Pearson [9], se identifican relaciones positivas y estadísticamente significativas. En la Tabla 3 se registran correlaciones de 1 en la diagonal, ya que es la evaluación del índice consigo mismo y se observan valores de matriz inferior y superior de correlación entre los pares para H2Lac - ITE ($r = 0.692$), H2Lac - TRNE ($r = 0.799$) e ITE-ITRNE ($r = 0.763$). Estos valores muestran una correlación, en términos de una relación directamente proporcional; asimismo, en los valores de p, inferiores a 0.05 para todas las correlaciones, permiten descartar que las mismas sean resultado del azar en los datos revisados.

Estos resultados sugieren una fuerte asociación entre los tres índices, lo que indica que el desarrollo de Economía del Hidrógeno en la región está estrechamente vinculado con el avance de la Transición Energética y del Trilema Energético, en términos de la categoría Desempeño del sistema energético.

En la Figura 1 se observa una tendencia positiva en la distribución de los datos, lo que sugiere una correlación directa entre los índices relacionados, ITE y ITRNE. Este comportamiento evidencia su relación, destacando un patrón similar en las comparaciones bivariadas entre ambos índices. Resultados similares se dan el representar las duplas ITE-IH2Lac, y ITRNE-H2Lac. Estos resultados refuerzan la consistencia de la asociación entre los indicadores, sugiriendo que el desempeño en uno de ellos influye positivamente en el comportamiento de los demás.

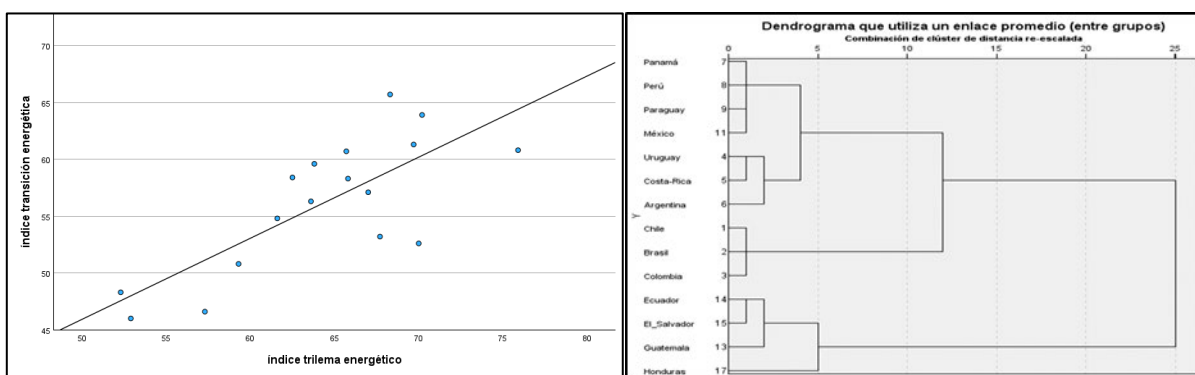


Fig. 1. Diagrama de dispersión de la relación ITE-ITRNE

Fig. 2. Análisis de Clúster de la relación ITE-ITRNE

Como conclusión de este análisis estadístico, se obtiene que los datos que sustentan la clasificación de los países en los tres indicadores de desempeño, sugieren una correlación positiva y evidencian relaciones significativas entre ellos; así, el nivel de desempeño de un país en un índice específico conlleva a un nivel similar en los otros dos índices.

Para complementar este análisis, en la Fig. 2, se presentan el Dendrograma o análisis de clúster [10], de los grupos de países formados por aquellos países con valores cercanos entre los tres índices evaluados. Estos grupos son: Grupo1 (Panamá, Perú, Argentina, Paraguay, México); Grupo 2 (Uruguay, Costa Rica); Grupo3 (Chile, Brasil, Colombia); Grupo4 (Ecuador, Salvador, Guatemala) y Grupo 5 (Honduras), estas cercanías entre los índices pueden deberse a múltiples factores como la geolocalización, gestión de los recursos energéticos y la política pública en torno a la sostenibilidad energética, entre otros.

5. Análisis de similitud y complementariedad

En este apartado se analiza la estructura y componentes de los tres indicadores estudiados para identificar características comunes y complementarias entre ellos. Para el ITE, su estructura comporta por tres dimensiones, tal que su representación usual es un triángulo en el cual cada vértice tiene asociado una dimensión de análisis de desempeño. Para el ITRNE, su estructura comprende dos categorías: Desempeño del sistema energético y Preparación para la Transición. Las dimensiones asociadas con la primera categoría son: Equidad, Seguridad y Sostenibilidad. Más que una similitud se aprecia una identidad entre los componentes de esta categoría y las dimensiones de ITE, Fig. 2 (a, b); aunque con diferencias en sus indicadores asociados.

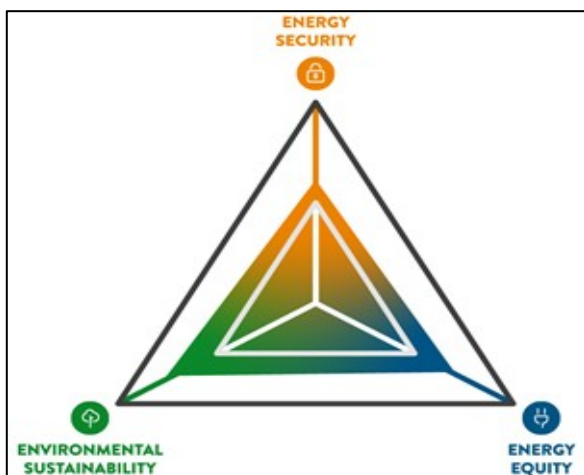


Fig. 2a Estructura ITE [5]

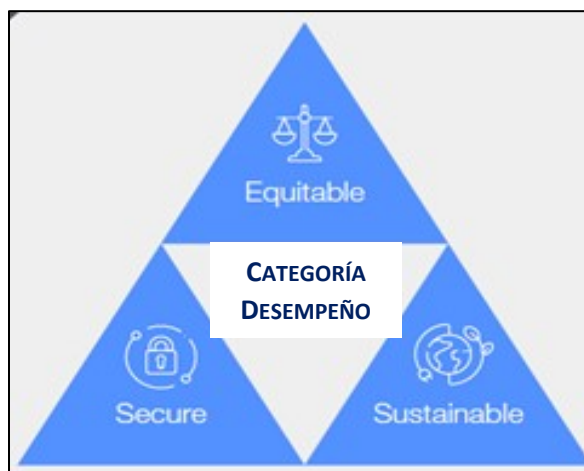


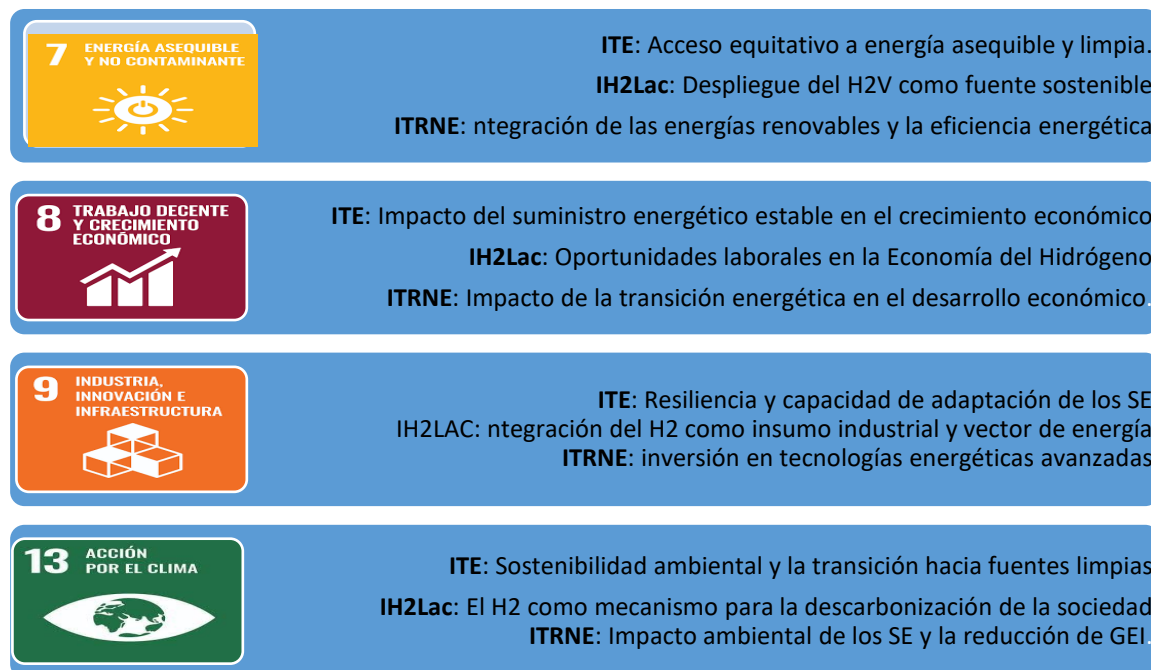
Fig. 2b. Estructura ITRNE. Categoría Desempeño [7]

En el caso del IH2Lac, sus diferencias estructurales no se identifican directamente, ya que sus cinco indicadores valoran las acciones para el despliegue armónico e integral del hidrógeno de bajas emisiones en la región. Así, para determinar su similitud se recurre al análisis sobre la intervención del HBE en el avance de la transición energética según la región [7], que permiten identificar la asociación del HBE con las dimensiones de Sostenibilidad ambiental y Equidad energética

Tabla 4. Intervención del Hidrógeno en ITRNE

Región	Categoría de actuación
Asia	Sostenibilidad ambiental
Africa	Sostenibilidad ambiental
LAC	Sostenibilidad ambiental
Medio Oriente y Golfo Pérsico	Sostenibilidad ambiental
Europa	Equidad energética

En cuanto a la complementariedad de los índices, ésta se interpreta desde el reconocimiento de los ODS en los cuales tienen participación en común, obteniendo que existen cuatro en los que se esa concurrencia, Figura 3.



6. Consideraciones finales

- Los tres índices de desempeño analizados manifiestan un comportamiento correlacional positivo y relaciones positivas entre las duplas de indicadores
- La similitud estructural y conceptual es directa entre el ITE y el ITRNE, mientras que para el IH2Lac, esta semejanza se manifiesta en su intervención favorable en las dimensiones de desempeño de los dos primeros índices
- La complementariedad entre los tres índices se plasma en su contribución concurrente al alcance de cuatro ODS, en una acción sinérgica positiva
- Todos los índices de desempeño evalúan la capacidad y propósito de un país de consolidar un ecosistema propicio en pro de la transición energética inclusiva y armónica, independientemente de la especificidad y particularidad de la métrica de evaluación utilizada en ellos
- Los índices analizados componen un marco de actuación amplio en el cual los países decididos a incorporar los conceptos emergentes de bienestar, equidad y sostenibilidad en sus planes de desarrollo, desde una visión multidimensional, cuentan con elementos valiosos para la toma de decisiones

- El análisis retrospectivo del desempeño de Colombia en los índices analizados, así como de sus tendencias, será el tema a desarrollar en el siguiente reporte.

Referencias documentales

- [1] World Energy Trilemma 2024: Evolving with Resilience and Justice. World Energy Council. 2024
- [2] Mokrzycki, E.; Gawlik, L. The Development of a Green Hydrogen Economy: Review. *Energies* 2024, 17, 3165. <https://doi.org/10.3390/en17133165>
- [3] Phemelo, T; et. al. Sustainable futures: Aligning climate actions and socio-economic justice through the just energy transition. *Energy Strategy Reviews* 2025: 101726. Doi: 10.1016/j.esr.2025.101726
- [4] Scott D. Hydrogen in the evolving energy systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 2003; 18: 197-204.
- [5] Fostering Effective Energy Transition. Insight Report. World Economic Forum. June 2024.
- [6] H2LAC Index 2024. Results of the 4th Hydrogen Economy Index Latin America & The Caribbean. www.h2lacindex.com
- [7] World Energy Trilemma Index: Evolving with Resilience and Justice. 2024. World Energy Council. <https://trilemma.worldenergy.org>
- [8] Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparison of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33. <https://doi.org/10.21125/entrenova.2017.0619>
- [9] Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2013). *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences* (3rd ed.). Routledge
- [10] Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2019). *Using Multivariate Statistics* (7th ed.). Pearson