

Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una matriz energética sustentable mediante análisis de escenarios

Estudio de caso en zonas áridas con alto riesgo hídrico

Determination of greenhouse gas emissions (GHG) in a sustainable energy matrix through scenario analysis. Case Study in arid zones with high hydric risk

Alba Inés Ramos Sanz

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET). Buenos Aires, República Argentina.

Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHA-CONICET). San Juan, República Argentina.

Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD)

Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)

PhD. Profesora categoría Adjunto, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD), Universidad Nacional de San Juan (UNSJ; 2007-actualidad). Argentina.

https://scholar.google.es/citations?view_op=new_articles&hl=es&imq=Alba+Ramos+Sanz#

<https://orcid.org/0000-0003-4069-4740>

draarqalbaramossanz@gmail.com

Ramos-Sanz, A. I. (2020). Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una matriz energética sustentable mediante análisis de escenarios. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22(2), 114-125. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2752>



doi.org/10.14718/RevArq.2020.2752

Resumen

Se toma por caso de estudio una matriz energética sustentable, a fin de estimar las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq; GEI) por MWh de energía consumida y per cápita. Los antecedentes indican que dicha matriz se abastece con frecuencia de una matriz convencional nacional; la prueba de hipótesis confirma dicho supuesto. La matriz cubre la demanda energética en el 17% de las veces. Se determina el coeficiente de variación, a fin de observar el comportamiento de las emisiones de CO₂eq/per cápita, según la participación de la matriz energética sustentable, en ocasiones en las cuales no cubre la demanda y debe proveerse con recursos fósiles del Sistema Interconectado Nacional. Se concluye que el nivel medio de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el 83% de las ocasiones crece hasta 5 veces más que el estimado por unidad de energía (0,10 CO₂eq/MWh), y hasta 8 veces por usuario (5,20 tnCO₂eq/per cápita).

Palabras clave: Indicadores ambientales; suministro de energía; consumo de energía; balance energético; energía renovable

Abstract

A Sustainable Energy Matrix is taken as a case study to estimate the equivalent carbon dioxide (CO₂eq; GHG) emissions per MWh of energy consumed and per capita. Background data indicate that said matrix is often supplied with a national conventional matrix. The hypothesis test confirms this assumption; the Matrix covers the energy demand 17% of the time. The variation coefficient is determined, in order to observe the behavior of CO₂eq / Per Capita emissions according to the participation of the Sustainable Energy Matrix, at times when it does not cover the demand and it must be provided with fossil resources from the National Interconnected System. It is concluded that the average level of GHG emissions 83% of the time increases up to five times that estimated per unit of energy (0.10 CO₂eq / MWh) and up to eight times per user (5.20 tnCO₂eq / Per Capita).

Keywords: Environmental indicators; energy supply; energy consumption; energy balance; renewable energy

Recibido: mayo 29/2019

Evaluado: noviembre 5/2020

Aceptado: mayo 7/2020

Introducción

El presente trabajo se desarrolla dentro del marco de un proyecto de investigación financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET). Dentro de este, se busca estimar el monto de emisiones de dióxido de carbono por unidad de energía consumida, para el caso de una matriz energética que responde a criterios de sostenibilidad, dado que más de la mitad del recurso energético primario nace en usinas hidroeléctricas. Sorpresivamente, dichas represas se asientan en una zona de clima árido extremo, y entonces se plantea la necesidad de conocer el desempeño de esa matriz y su sostenibilidad resultante.

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero (GEI) que se encuentra de forma natural en la atmósfera. Existe un consenso global de la comunidad científica por el cual se atribuyen los efectos del calentamiento global al incremento de los GEI, de origen antropogénico. Una vez el CO₂ y otros gases en menor cantidad —monóxido de carbono, metano, nitrógeno, etc.— son emitidos a la atmósfera, con el paso de los meses, y hasta doce años después, se carbonizan y conforman, finalmente, un gas distinto, que es el CO₂. Por tal motivo, las emisiones en su conjunto suelen denominarse como CO₂ equivalentes, ya que el final de su proceso se dirige a conformarse como moléculas de dicho gas.

A escala global, el sistema de generación de energía contribuye en el 30% del total de las emisiones de GEI (Clemente y Naharro, 2009, pp. 19-29) procedentes de centrales térmicas que producen energía a partir de combustibles fósiles. Según fuentes de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2019), el 81% de la energía producida en el mundo en 2007, proviene de combustibles fósiles, y se estima que para 2030 ese porcentaje descenderá al 70% del total.

Los consensos internacionales persiguen la disminución de las emisiones GEI al ambiente, por medio de instrumentos de estandarización de la información compartida y metodologías comunes. Un organismo perteneciente a las Naciones Unidas, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2019), reúne a un grupo de especialistas en materia de cambio climático, y asiste a la comunidad científica y en general sobre problemáticas vinculadas al calentamiento global. El IPCC proporciona metodologías para el cálculo de las emisiones de GEI a la atmósfera en formato de documentos técnicos, con el fin de que las distintas naciones adapten esta metodología a sus datos disponibles. Por otra parte, la metodología del análisis del ciclo de vida, a diferencia de la del IPCC, que aplica el término *carbón neutro* a las fuentes de energía renovables, reconoce que estas últimas tienen un impacto ambiental cuantificable. Algunos países se han comprometido a proporcionar información ambiental a través de un documento anual mediante las *comunicaciones nacionales*, en las cuales especifican la magnitud de sus emisiones de GEI al ambiente (IPCC, 2019). El último de tales documentos presentados por Argentina data de 2015, y se titula *Tercera comunicación nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático* (Secretaría de Ambiente y desarrollo Sustentable de la Nación, 2019).

Según el IPCC (2019), la incertidumbre en la determinación de las emisiones de CO₂eq se debe, en parte, a la variabilidad de los recursos energéticos, pero el organismo no dispone de rangos de incertidumbre por defecto. En general, pocas naciones disponen de suficiente información de calidad para llevar a cabo estimaciones consistentes, por lo cual se procede a hacer cálculos sencillos con métodos determinísticos, poco confiables para proyecciones. La matriz energética de un país, por ejemplo, es una especie de fotografía de los recursos energéticos potenciales de los que dispone dicho país, pero la generación efectiva de energía es el flujo que se visibiliza mediante el balance energético, en el cual, a su vez, se ve reflejada la oferta energética en las diversas instancias —primaria y secundaria— y el consumo o la demanda de cada sector.

Según datos estadísticos del Banco Mundial (BM), (2019), entre 1960 y 2014, las emisiones GEI per cápita anuales en Argentina se duplicaron, al pasar de 2,40 tnCO₂eq a 4,70 tnCO₂eq. Con el fin de cumplir con los compromisos internacionales con el medio ambiente, Argentina deberá reducir el empleo de los combustibles fósiles para la generación de energía, debido a los cuales emite actualmente unos 200 millones de tnCO₂eq/año¹ (Apud et al., 2014) e incorporar fuentes de origen renovable a su matriz, aunque parte de esta transformación deberán llevarla a cabo individualmente los usuarios de energía, mediante la autogenera-

ción. El objetivo consiste en promover la generación de energía con base en recursos renovables. El *Plan de Acción de Energía y Cambio Climático* (MinAmbiente y MinEnergía, 2017) señala que en 2016, el 88,4% de la oferta energética interna total proviene de fuentes no renovables: en el 55,4%, del gas natural, y en el 31,8%, del petróleo. En referencia a la capacidad de generación de electricidad, el 61,2% de la potencia instalada corresponde a fuentes térmicas, seguidas por las hidroeléctricas, con el 31,5%, por las nucleares, con el 5,2%, y por las renovables no convencionales (pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, solar, eólica, biomasa, biogás), con el 2,1%. Este compromiso ambiental conduce a una serie de políticas ambientales que promueven la generación de energía mediante recursos renovables, a partir de las cuales se llevan a cabo inversiones en centrales hidroeléctricas y solares fotovoltaicas.

La mayor diversificación de la matriz energética no atiende solo a la disminución de los GEI, sino que contribuye a disminuir el riesgo del sistema energético de un país; la incorporación de fuentes energéticas de diversos orígenes garantiza el suministro energético para una sociedad dada (Molina et al., 2011). Es razonable suponer que cuanto mayor dependencia haya de un solo tipo de recurso, tanto mayor riesgo de suministro se corre si la fuente escasea, o si no se facilita el acceso a ella por algún motivo. Hay estudios que señalan que la variabilidad del recurso hídrico en las cuencas en zonas áridas es elevada; para el caso analizado en este trabajo, se prevé para el periodo 2021-2030 una disminución de entre el 13% y el 30% en los caudales de la cuenca del río San Juan (Boninsegna y Villalba, 2019), según lo cual se estima un impacto negativo en la generación de energía a partir de dicha fuente. Respecto de esta observación, en el presente trabajo se lleva a cabo un análisis de escenarios de generación de energía de una *matriz energética sustentable*, la cual se compone en el 85% de fuentes hidroeléctricas. Se estima su vulnerabilidad al verse afectado el recurso hídrico y presentarse, en consecuencia, diversos niveles de *hidraulicidad* en la cuenca de generación. De esta manera se observa la medida en la cual el suministro de energía comienza a alimentarse de fuentes de origen no renovable desde el Sistema Interconectado Nacional (SIN), en diversa proporción para cada escenario de hidraulicidad. Es posible notar que, en efecto, un suministro de energía proveniente de recursos renovables se caracteriza por menores emisiones de CO₂, en relación con lo que ocurre cuando el suministro se nutre desde el SIN cuya matriz energética se compone en el 88,4% de fuentes no renovables.

Según datos de la International Energy Agency (IEA, 2019), en el mundo entero, la demanda energética creció en el 3,2% durante el periodo 2015-2016, hasta alcanzar los 20.863 TWh. Este crecimiento interanual en los países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) fue del 1,4%, mientras que los países no pertenecientes a dicha organización

¹ Este monto de emisiones constituye el 0,6% del total del sector energético mundial (Apud et al., 2014).

declararon un incremento del 4,8%. El 42% de este consumo mundial (8.684TWh) corresponde al sector industrial, seguido por el 27% (5.681TWh) originado en el sector residencial (IEA, 2019). En Argentina, con un total de 136 TWh de consumo de energía eléctrica, el 39% de la demanda corresponde al sector industrial; el 34%, al residencial, y el 26%, al oficial y comercial; el 1% restante se distribuye entre transporte y agro (Ministerio de Energía y Minería, 2019). En la provincia de La Rioja y de San Juan —sitio del presente análisis— el sector residencial origina la mayor demanda de energía eléctrica de Argentina (Chávez et al., 2017), con 4.026 KWh/año por persona. Esta demanda energética se explica parcialmente por la rigurosidad del clima árido tanto en verano como en invierno, y por la baja penetración de la red de gas natural en la ciudad. Se destaca la relevancia que tienen los sectores industriales y residenciales en la demanda energética a escala mundial, nacional y provincial; sin embargo, el sector industrial es inestimable, lo cual quiere decir que gran cantidad de establecimientos disponen de fuentes de autogeneración de energía que no son contabilizadas por las estadísticas oficiales. En ese sentido, el comportamiento energético del sector residencial es más claro de observar, pues en Argentina no existe gran difusión de fuentes renovables de generación de energía aplicadas a los hogares de forma masiva; así mismo, es el sector residencial el más sensible a las acciones tendientes a la reducción del consumo energético, ya sea mediante el incremento de las tarifas, mediante la educación del usuario o bien mediante la mejora de la envolvente con estrategias pasivas.

En el presente estudio se espera determinar el impacto del consumo energético de los diferentes sectores, tomando por indicador las emisiones de GEI, con base en una matriz energética sustentable, con fuentes de origen renovable. Los esfuerzos tendientes a reducir las emisiones GEI mediante el Acuerdo de París en 2015 (Comisión Europea; 2020) apuntan a la diversificación de las matrices energéticas de los países del mundo, para reducir la proporción de recursos fósiles no renovables empleados en la obtención de energía. Se observan a continuación el desempeño de este tipo de matrices sustentables y sus proyecciones vinculándolos con las emisiones GEI resultantes de la obtención de energía eléctrica y del consumo de esta por parte de cada uno de los sectores de la demanda.

Metodología

En este trabajo se procede a determinar la variación anual del nivel de emisiones GEI debidas al consumo energético por unidad de energía ($TnCO_2eq/MWh \cdot año$) y por habitante ($TnCO_2eq/per \text{ cápita} \cdot año$) y para cada sector de consumo: industrial, residencial, comercial y de servicios. Los valores de emisiones resultantes no son determinísticos: se los define a partir de una reducida muestra plasmada en una distribución t de Student y se derivan de ella los rangos, sus valores medios y las desviaciones estándar.

Mediante datos oficiales (MINEM, 2019; EPSE, 2019) se define la composición de la matriz energética sustentable y la de la matriz energética convencional nacional, cuyo factor de emisiones se estima mediante un procedimiento definido por organismos internacionales, y, por lo tanto, es oficialmente conocido. El caso objeto de estudio ofrece un interés particular, al tratarse de una matriz energética sustentable definida en los términos que promulgan los Estados comprometidos con el control de emisiones GEI, como la OCDE, los países del Grupo de los 20 (G20), los que firmaron el Acuerdo de París y aquellos que integran paneles activos en organizaciones como las Naciones Unidas. Estas organizaciones tienen por objetivo la diversificación de las matrices energéticas mediante fuentes de origen renovable (OECD, 2020). El caso de estudio seleccionado constituye un ejemplo de sustentabilidad en tal sentido, dado que se compone en el 85% de fuentes renovables de origen hidroeléctrico; sin embargo, dicho recurso hidroeléctrico es escaso, ya que se inserta en un territorio de extrema aridez y escasas lluvias y nevadas, y, en consecuencia, la hidraulicidad de la cuenca es variable año a año.

Respecto de lo ya mencionado, datos oficiales Ministerio de Minería y Energía de la Nación (2019) revelan la variable productividad de energía por parte de la Central Los Caracoles, una de las represas más importantes de la matriz energética sustentable, pues contribuye al 35% de la potencia hidroeléctrica instalada. Con esta información se infiere que, al tratarse de un sistema interconectado, alimentado de la misma cuenca, en el resto de las represas de la matriz energética sustentable tal situación se replica. Para confirmar dicho supuesto, se lleva a cabo una prueba de hipótesis mediante un t-Test² y se la compara con el valor crítico (tc). Una vez se estiman los valores en la región de aceptación o de rechazo de la hipótesis, se determina el riesgo asociado a la generación hidroeléctrica en la matriz energética sustentable, mediante el coeficiente de variación (CV). Infiriendo los resultados del CV del caso Los Caracoles sobre la totalidad de las represas de la matriz energética sustentable y dejando fijas las variables de generación de energía solar y térmica, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad mediante escenarios sobre la variable crítica de generación hidroeléctrica. Se plantean tres escenarios según el nivel de hidraulicidad (bajo, medio y alto) de la cuenca del río San Juan, estimado por los datos oficiales ya citados. Los escenarios plantean balances energéticos, cuyos déficits deben ser compensados por el Sistema Interconectado Nacional (SIN), cuyo factor de emisión de la matriz convencional es superior al factor de emisión de la matriz energética sustentable, definido en 0,38 $tncO_2eq/MWh$.

2 Es un estadístico de prueba entre los valores medios de dos muestras, a fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas, siempre y cuando los datos tengan una distribución t de Student.

El consumo energético dentro de los límites geopolíticos de la provincia de San Juan se determina recurriendo a datos de un solo año, complementados con datos históricos. En el primer caso, estos datos son útiles para conocer la demanda energética relativa intersectorial. A partir de información transversal provista por DIES (2014), se determinan el consumo energético absoluto y el relativo (%) de 2011 para los sectores económicos residencial, industrial, comercial, oficial, de riego y de servicios. Se complementa dicha información con datos registrados en un periodo longitudinal de 19 años, comprendido entre 1995 y 2014, proporcionados por Chévez et al. (2017). A partir de datos poblacionales (INDEC, 2019) se estiman los consumos per cápita y las consecuentes emisiones GEI, ya definidas con el CV para cada escenario. Los resultados se comparan con valores de emisiones normalizadas por Ferraro et al. (2013) para el territorio argentino. Dichos valores se proyectan en una barra que representa la concentración de CO₂eq/per cápita y año. En esta barra es posible caracterizar el efecto sobre las emisiones GEI de la dispersión de la matriz energética sustentable analizada, considerando *ceteris paribus* las demás variables, como el consumo energético. Posteriormente se procede a comparar estos resultados de consumo energético y emisiones GEI locales y nacionales comparando con los valores per cápita de otros países del mundo, recurriendo a datos estadísticos provistos por el BM (2019).

Descripción de las matrices energéticas: sustentable y convencional

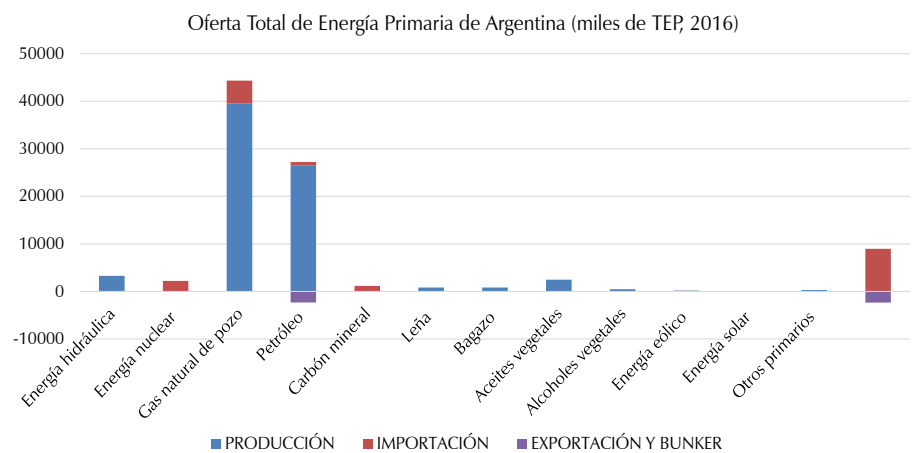
Para Argentina, el 93% de la oferta total de energía primaria (OTEP³) es producida con recursos propios; principalmente, gas natural y petróleo, y eso señala una tendencia hacia la autonomía energética, marcada por una fuerte producción nacional de energéticos no renovables. Las importaciones de energía nuclear, petróleo y gas se iniciaron en 2010, señal de un déficit energético negativo del 7%, como puede observarse en la figura 1. Entre los recursos que se importan se encuentran el carbón mineral, el petróleo y la energía nuclear. Simultáneamente, se registran exportaciones de petróleo. La fuente primaria más utilizada es el gas natural, como se muestra en la figura 1, y del cual el país dispone en abundancia; en orden de jerarquía, este país se ubica como el tercero en Sudamérica con mayor disponibilidad de dicho recurso (U. S. Energy Information Administration, 2019). En efecto, el 45% de la oferta de energía secundaria nacional se compone de gas distribuido.

Según datos del Ministerio de Energía y Minería de la Nación (MINEM, 2019), la potencia instalada de la matriz eléctrica total experimentó un crecimiento del 127% durante el periodo

1992-2017. Según la información provista, en la actualidad el 33% de la matriz energética nacional se compone de fuentes primarias de origen hidroeléctrico; sin embargo, en el balance energético nacional 2016, como se pudo apreciar en la figura 1, se observa la oferta de energía por tipo de recurso, y se nota un alcance del 4% del total de energía hidráulica en el total de energía primaria producida en el país (3,53 MTEP). La matriz energética constituye, claramente, el potencial de generación —*potencia instalada*— de energía que tiene un país, mientras que el balance refleja el tipo de energía que *efectivamente* se produjo y se consumió en un periodo dado.

La matriz energética objeto de estudio se ubica en la provincia de San Juan, localizada a 68°32'11" de longitud oeste y 31°32'15" de latitud sur, cuyas precipitaciones medias anuales son < 200 mm; en la ciudad, se reducen a la mitad (*Atlas Universidad Nacional de San Juan*, 2020). Este sitio se caracteriza, según la Norma IRAM 11603 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación [IRAM], 1996) por insertarse en la zona *bioclimática III a templada cálida*, con amplitudes térmicas diarias > +/- 14 K. La normativa señala que esta área se define por temperaturas medias de invierno iguales a los 8,3 °C, con mínimas de hasta 0,3 °C y medias de verano de 26,4 °C y máximas de 34,5 °C. Según el Departamento de Información Económica y Social (DIES, en Frank et al, 2016) —en línea con la tendencia nacional—, el consumo de energía en la provincia de San Juan se incrementa cada año entre el 1% y el 4%. En San Juan existe una elevada participación en renovables, la cual comprende el 85% de su matriz energética en energía de origen hidroeléctrico; el 8,4%, de origen solar, y el 5,8%, de origen térmico (gas natural y gasoil). La generación de energía hidroeléctrica es provista por un sistema de siete represas interconectadas: Caracoles, El Horcajo, Tambolar, Punta Negra, Quebrada de Ullum, Ullum I-II La Olla y Cuesta del Viento. Dichas centrales se ubican de manera escalonada a diversa altura y distancia, desde el nacimiento del río San Juan. La matriz energética sustentable dispone de una capacidad instalada de 220 miles

Figura 1. Diagrama de barras del balance energético nacional. OTEP en Argentina durante 2016. Fuente: Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación (2020).



³ La oferta total de energía primaria (OTEP) es medido en miles de toneladas equivalentes de petróleo (TEP), y alcanza los 84.000 MTEP.

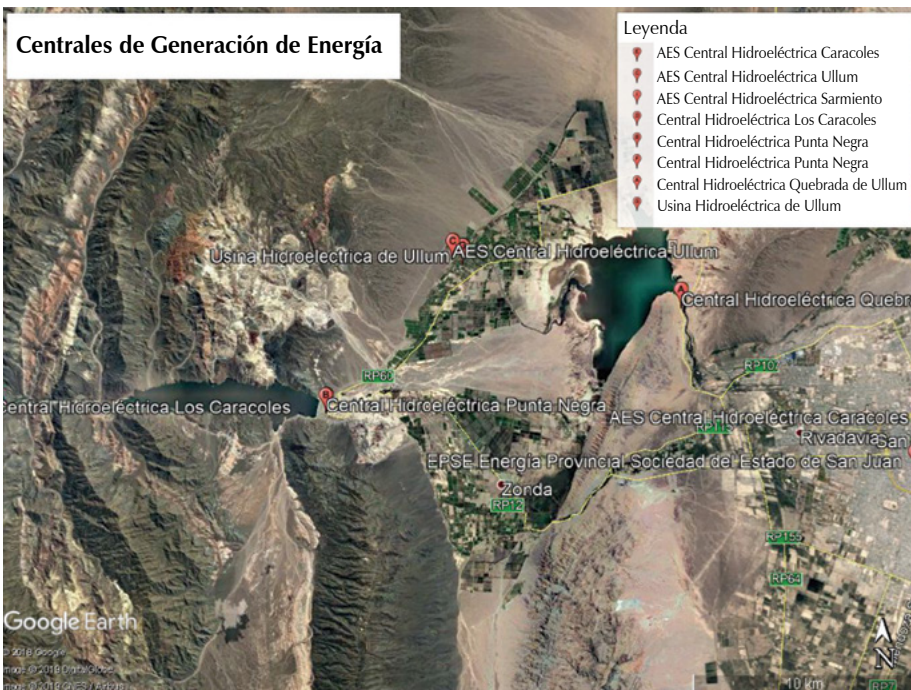


Figura 2. Imagen satelital del sistema interconectado de represas.

Fuente: US Dept of State Geographer (2018). Google Earth Pro.

Matriz energética de San Juan

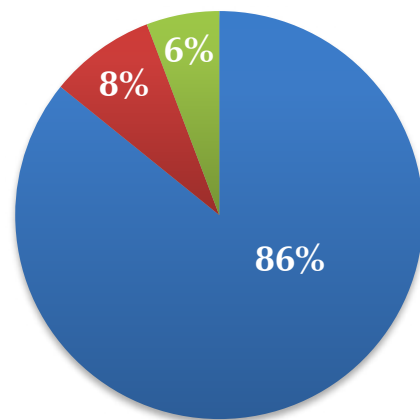


Figura 3. Diagrama de la matriz energética sustentable.

Fuente: elaboración propia, con base en Frank et al. (2016) y AES (2019).

- Hidroeléctrica
- Solar
- Térmica (Gas natural + gasoil)

de TEP, para abastecer una demanda energética local promedio de 161 miles de TEP. La figura 2 muestra el sistema interconectado de represas, y la figura 3, la matriz energética sustentable.

Prueba de hipótesis

Hay escasos datos oficiales relacionados con la productividad de las represas hidroeléctricas comprendidas en el caso objeto de estudio. Se presenta a continuación un registro de la generación de energía hidroeléctrica en la represa Los Caracoles (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A. [CAMESA], *Informes mensuales*, 2009-2014) desde 2009, cuando empezó a producir, y cuyo trabajo representa el 35% de la energía total obtenida en la provincia mediante la explotación de dicho recurso renovable.

En un periodo de 6 años de observación, la potencia instalada se alcanza en el 17% de las oportunidades; la generación de energía hidroeléctrica

Represa hidroeléctrica Los Caracoles (base de regresión)		
Año	% del potencial	Miles de TEP (MTEP)
2009	60%	36,7
2010	95%	58,5
2011	7%	4,1
2012	2%	1,2
2013	4%	2,3
2014	10%	6,1
Promedio		18,2
DESVEST (+/-)		23,9

Tabla 1. Datos históricos de generación de energía en la represa Los Caracoles.

Fuente: Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A. (CAMESA). *Informes mensuales* 2009-2014 (2019, recuperado de Wikipedia).

permanece por debajo de la potencialidad en el 83% de las veces, y durante 4 años consecutivos fue de una productividad < 10% del potencial.

Con esta evidencia se plantea una prueba de hipótesis, a fin de determinar si es posible que la matriz energética sustentable objeto de estudio genere energía *por debajo* de los valores teóricos, cuyo potencial de generación alcanza los 182 MTEP/año de origen hidroeléctrico. Se utiliza como antecedente la muestra de la represa hidroeléctrica Los Caracoles en el periodo de 6 años, según se pudo apreciar en la tabla 1.

$$H_0: \mu > 182 \text{ MTEP/año} \quad | \quad H_1: \mu < 182 \text{ MTEP/año}$$

Debido a que las observaciones son $n < 30$, se recurre al empleo de un t-Test, propio de una distribución t de Student;

- Error tipo I $\alpha = 0,01$ (una cola); confiabilidad 99%.
- Valor crítico $t_c = 2,015$ para $\alpha = 0,05$ y 5 grados de libertad; 5-1.

$$\text{Error estándar} \quad EE(\sigma) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = 97.551 \text{ MWh/año} \quad (1)$$

$$\text{Estadístico t} \quad t = \frac{(x - \mu)}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 5,61 \quad (2)$$

Dado que $5,61 (t) > 3,3649(t_c)$ se rechaza H_0 . Esta prueba de hipótesis permite hacer inferencias sobre la población objeto de estudio. Puede decirse que existe suficiente evidencia empírica para inferir que la generación de energía hidroeléctrica en el resto de las represas del sistema se encuentra por debajo del potencial.

Riesgo de la matriz energética sustentable asociado a la variabilidad del recurso hídrico

Los datos de generación de energía hidroeléctrica registrados en tabla 1 señalan un riesgo asociado a la disponibilidad del recurso. Para estimar la tasa de variabilidad del mencionado riesgo, se define un coeficiente de variación (Cv):

$$\text{Coeficiente de variación } Cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} = 1,2 \quad (3)$$

$$\text{Rango de variación } X * (1 - Cv) \leq E(MWh) \leq X * (1 + Cv) \quad (4)$$

Se puede inferir que los factores hídrico-ambientales que afectan a la generación de energía hidroeléctrica en Los Caracoles afectan también a las demás represas del área considerada, al tratarse de un sistema que se nutre de la misma cuenca del río San Juan. En la tabla 2 se determinan los rangos de variación de generación de energía para cada represa, así como sus montos en MTEP.

Puede observarse que la generación de energía supera el 9% del potencial en la mayoría de los casos, pero no será > 68% de este, sino una vez cada 6 años, con el 17% de probabilidad. A cada valor de posición en el rango —máxi-

ma, media y mínima— le corresponde un escenario I, II y III, respectivamente. Los escenarios (tabla 3) asisten a identificar situaciones ambientales de *alta hidraulicidad* (escenario I), *media hidraulicidad* (escenario II) y *muy baja hidraulicidad* (escenario III). Cada escenario señala las cantidades de energía producida por la central, así como el diferencial oferta-demanda del total del balance energético.

Estimación de las emisiones de CO2 equivalente (CO2eq)

Se utilizan los factores estándar de emisión de CO2eq para la generación de energía eléctrica mediante la quema de combustibles fósiles, como se detalla en la tabla 4, considerando los recursos según unidades de volumen (gas natural) o peso. Con el fin de cuantificar las emisiones frecuentemente consideradas *neutras*, como las producidas por las fuentes de energía solar, eólica e hidroeléctrica, y visibilizar el impacto de estas —aunque sea relativamente despreciable—, se recurre al empleo de los factores estándar proporcionados en la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV). El factor de emisión para la generación de energía eléctrica mediante energía térmica ha sido estimado en una media igual a 0,53 tnCO2eq/MWh año (MINEM, 2019).

Confiabilidad		67%	68%	68%	68%	68%	68%	68%
MTEP+CV	X*1+Cv	42,1	13,9	7,8	1,7	17,7	20,3	20,3
Media	X	18,2	6,0	3,4	0,7	7,6	8,8	8,8
MTEP-CV	X*1-Cv	5,7	1,9	1,1	0,2	2,4	2,8	2,8
Confiabilidad		9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%

➤ Tabla 2. Rangos de generación de energía posible para cada central hidroeléctrica (MTEP), a partir del Cv.

Fuente: elaboración propia (2019).

% Fuente	Central	Capacidad instalada	Escenario I	Escenario II	Escenario III	
			(alta hidraulicidad)	(media hidraulicidad)	(baja hidraulicidad)	
[MWh/año]						
85,8%	Hidro	Ullum I-II La Olla	235.000	160.729	69.403	21.923
		Quebrada de Ullum	132.000	90.282	38.984	12.314
		Cuesta del Viento	28.000	19.151	8.269	1848
		Caracoles	730.000	487.942	210.667	66.609
		Tambolar	345.000	235.964	101.890	32.184
		Punta Negra	300.000	180.000	88.600	27.986
		El Horcajo	345.000	235.964	101.890	32.184
8,4%	Solar	San Juan	11.000	11.000	11.000	11.000
		Cañada Onda I y II	13.500	13.500	13.500	13.500
		Parque Solar Ullum	38.000	38.000	38.000	38.000
		Las Lomitas	4800	4800	4800	4800
5,8%	Térmica	Sarmiento	372.000	372.000	372.000	372.000
OFERTA TOTAL			2.554.300	1.849.333	1.059.003	634.348
Consumo promedio total			1.871.222	1.871.222	1.871.222	1.871.222
Diferencial y déficit			683.078	-21.889	-812.219	-1.236.874

➤ Tabla 3. Matriz energética y balance de energía para tres escenarios posibles.

Fuente: elaboración propia (2019).

Tabla 4. Factores de emisión por recurso utilizado para generar energía primaria. Fuente: datos estadísticos (MINEM, 2019).

Unidad	Recurso	Factor estándar de emisión (tnCO ₂ eq)	
		Convencional	Análisis del ciclo de vida
MWh	Solar fotovoltaica	0,000	0,035
	Eólica	0,000	0,007
	Hidroeléctrica	0,000	0,020
dam ³	Gas natural	1,936	-
tn	Carbón mineral	2,441	-
	Fuel oil	3,127	-
	*Factor de emisión por quema de combustibles fósiles, por unidad de energía generada	0,530	-
MWh	*Factor de emisión nacional por unidad de energía secundaria consumida	0,380	-

Factores de emisión GEI								
Recurso	Potencial		Escenario I (generación máxima) (MWh/año)		Escenario II (generación media) (MWh/año)		Escenario III (generación mínima) (MWh/año)	
	Solar FV	858	0,3%	858	0,3%	858	0,1%	858
Hidro	50.760	20,5%	33.841	14%	14.873	3%	4.681	0,7%
Gas oil	197.160	79%	197.160	82%	197.160	38%	197.160	29%
Gas natural		0%	8.318	3,5%	308.643	59%	470.012	70%
Total	248.778	100%	240.176	100%	521.533	100%	672.711	100%
Factor TnCO ₂ e/MWh		0,10		0,13		0,49		1,06

Tabla 5. Factores de emisión para consumo de energía en cada escenario. Fuente: elaboración propia (2019).

El factor de emisiones empleado en este apartado para cuantificar las emisiones GEI *por consumo* de energía secundaria que ingresa desde el Sistema Interconectado Nacional para suplir los diferenciales en la oferta para cada escenario es de 0,38 tnCO₂eq/MWh. Este último es el factor que corresponde a la energía que cubre al déficit, para los tres escenarios estimados en la tabla 4.

Resultados

Indicadores ambientales: factores de emisiones GEI

A medida que se pronuncia una menor *hidraulicidad* en el caudal del río San Juan, la demanda local depende en mayor medida del Sistema Interconectado Nacional, con lo cual se incrementa el valor promedio de su factor de emisiones GEI, al provenir de una matriz energética convencional con gran proporción (67%) de fuentes no renovables. Puede observarse en tabla 5 que el factor de emisión varía en función de la disponibilidad de cada recurso.

Puede observarse, igualmente, que el escenario I, cuya estimación es del 95% de la potencia instalada de generación de energía, presenta niveles de emisiones GEI bajos, en comparación con los otros dos escenarios. Como ya se ha mencionado, esta *línea verde* se ha presentado una vez cada 6 años, con una probabilidad del 17%. El escenario opuesto (III) se ha construido con base en los valores máximos extremos del rango superior, por lo cual constituye, precisamente, valores posibles, pero cuya probabilidad se asemeja a los extremos inferiores (escenario I). Por ello, cabe enfocarse principalmente en el escenario II, como un valor medio para un diagnóstico más factible.

Consumo energético y emisiones GEI sectoriales

Mediante datos oficiales (Departamento de Información Económica y Social [DIES], 2014), se caracteriza el consumo energético de los sectores económicos residencial (44%), industrial (36%), comercial (7%), oficial (5%), de riego (4%), alumbrado público (3%) y servicios sanitarios (1%). Cabe hacer una observación en cuanto

Emisiones GEI Sectoriales

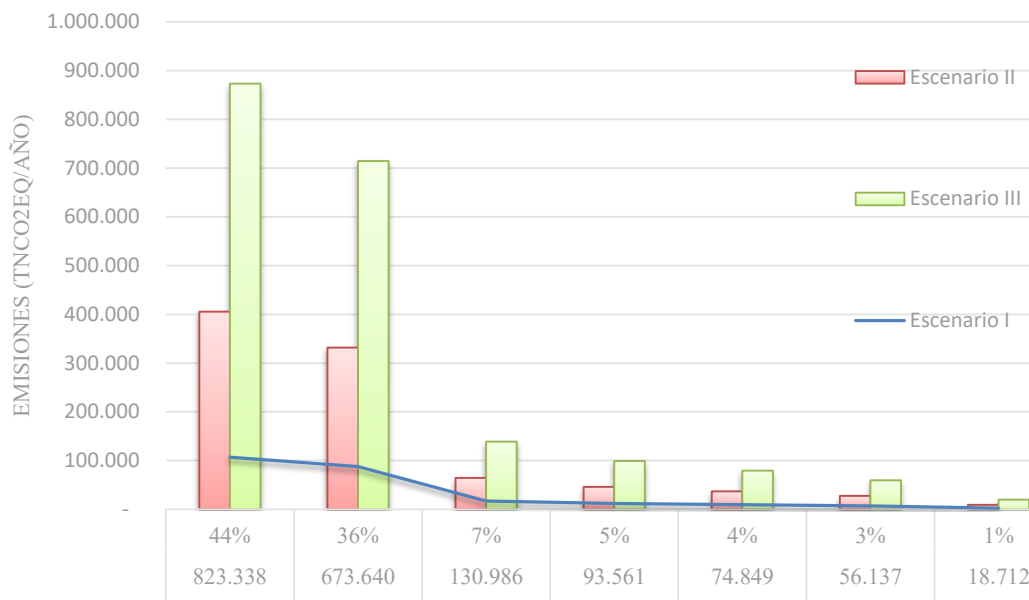


Figura 4. Emisiones GEI derivadas de los consumos energéticos por sector, para cada escenario y cada año. Fuente: elaboración propia, con base en datos estadísticos de consumo energético sectorial (DIES, 2014).

a la participación del sector riego: este porcentaje es relativamente bajo para pertenecer a una zona árida, cuya fuente de riego se obtiene mediante bombeo desde napas subterráneas. En el ámbito nacional, dichas participaciones son diferentes; particularmente, en el sector transporte (29%), no contemplado a escala provincial. En el país, el consumo energético en los sectores residencial (27%) e industrial (24%) se ha visto afectado a lo largo de su historia por una progresiva desindustrialización nacional, una mayor autonomía energética de las industrias hacia la autogeneración y una producción marcada por el consumo de gas. En San Juan, casi la mitad de la energía que se produce se destina exclusivamente al sector residencial.

En el caso del sector industrial, los consumos energéticos están en función de variables económicas (macro y micro) y tecnológicas, pero en el caso del sector residencial los consumos dependen principalmente de las características urbanas, del parque edilicio, de la interacción de las unidades habitacionales frente al clima y de los hábitos de los usuarios. En la figura 4 se observa el impacto que tienen en las emisiones GEI locales los sectores de mayor consumo energético: residencial (44%) e industrial (36%), en cualquiera de los 3 escenarios. En estos sectores el potencial de reducción del consumo energético es fundamental para disminuir la contaminación ambiental.

La rigurosidad del clima árido, de gran amplitud térmica, y en el cual se halla la matriz energética sustentable, no solo explica en parte la variabilidad en la generación hidroeléctrica, sino también, la creciente demanda energética del sector residencial en acondicionamiento térmico.

Algunos estudios (Frank, 2019) señalan que la demanda energética del sector residencial, y particularmente, de edificios en altura localizados en la provincia de San Juan, se vincula, principalmente, al empleo de equipos de acondicionamiento térmico (61%) y otros artefactos de uso cotidiano (37%), como heladeras, lavarrropas, etc. Esta información indica que una persona por año podría generar, en promedio, 1 tn CO_{2eq} tan solo en el uso de artefactos de aire acondicionado.

Indicadores ambientales: emisiones GEI per cápita

Considerando una población local de 681.023 personas en la zona objeto de estudio (INDEC, 2019), se determina que el consumo energético per cápita medio para el periodo transversal (2011) alcanza los 2,75 MWh/año. Este consumo no se aleja demasiado del promedio nacional, de 3,11 MWh por persona y año. En su estudio longitudinal de 19 años (1995-2014), Chévez et al. (2017) señalan que la población sujeto de estudio presenta consumos per cápita mayores que los estimados para 2011, con 4 MWh/año. Esta diferencia encuentra su razón en variaciones en la demanda; en el caso de Chévez et al. (2017), se halla una demanda de energía superior durante el periodo 1995-2014, en comparación con el caso registrado por los organismos oficiales a lo largo del periodo 2011 (Frank et al., 2016; AES, 2019). Considerando dicho antecedente y dada su extensión temporal, se estiman los factores de emisión en cada escenario para la población sujeto de estudio y para el enfoque longitudinal (1995-2014) y seccional (2011), como se aprecia en la tabla 6.

**Emisiones históricas GEI/energía consumida per cápita
[TnCO₂eq/pers*año]
(1995-2014)**

Escenario I	Escenario II	Escenario III
0,52	2,00	4,30
0,36	1,40	2,90

Emisiones GEI por energía consumida per cápita [TnCO₂eq/pers*año] (2011)

Tabla 6. Emisiones de CO₂eq para cada escenario, a partir del consumo energético medio anual.

Fuente: elaboración propia, con datos de consumo energético provisto por Chévez et al. (2017) y el Departamento de Información Económica y Social (DIES, en Frank et al., 2016).

En el escenario II se cuadruplican las emisiones per cápita respecto de las estimadas en el escenario I, el más similar (95 %) al potencial de generación de la matriz energética sustentable. En un escenario III con muy baja hidraulicidad en el caudal, las emisiones per cápita son 8 veces superiores a las esperadas, con base en el potencial de la matriz energética sustentable, con igual consumo energético.

Respecto de análisis determinísticos previos realizados sobre la matriz energética sustentable analizada, se cita el trabajo de Frank et al. (2016), el cual señala una emisión per cápita = 0,10 tnCO₂eq/MWh año, correspondiente al 100% de generación de energía hidroeléctrica potencial. Este valor, multiplicado por los 4 MWh de consumo energético medio anual per cápita, establece emisiones GEI por 0,40 tnCO₂eq. El resultado es similar al observado en el escenario I, con un enfoque determinístico basado en la generación potencial de la matriz energética sustentable, como se vio en la tabla 3. Al introducir el riesgo asociado a la variabilidad de la hidraulicidad del río San Juan, el parámetro de emisiones GEI per cápita se aleja significativamente del valor esperado, de lo cual resulta 8 veces la emisión teórica, estimada con base en la visión determinística y sin riesgo de la generación de energía a partir de la potencia instalada. El escenario I se manifiesta con el 17% de probabilidad, mientras que el restante 83% de las ocasiones (años) las emisiones GEI son superiores a 0,52 TnCO₂eq per cápita.

Considerando los datos de consumo energético relativo de cada sector económico, en San Juan y disponiendo de una matriz energética sustentable, las emisiones GEI per cápita para el sector residencial pueden alcanzar, en el peor escenario, hasta 1,90 tnCO₂eq/MWh año, donde 1,16 tnCO₂eq/MWh año corresponde a las emisiones debidas al empleo de equipos de aire acondicionado (Frank, 2019). En tal sentido, en el peor escenario, el 29% de las emisiones GEI originadas en los límites geopolíticos de San Juan se deben al empleo de estos artefactos de acondicionamiento térmico, a pesar de la penetración de gas natural en el sector edilicio capitalino,

analizado por la autora. Se puede inferir que en el sector residencial de zonas semirurales y rurales, ante la baja penetración de las redes de distribución de gas natural, este consumo energético en acondicionamiento térmico es mayor, así como las emisiones GEI.

Etiquetado de emisiones GEI per cápita

En la figura 5 se observa la representación gráfica de los niveles de emisiones GEI, producto del consumo anual de energía eléctrica per cápita medido en tnCO₂eq. Ferraro et al. (2013) proporcionan *estándares nacionales* de emisiones anuales que van desde 0,08 hasta 2,03 tnCO₂eq per cápita. Los valores de dichos estándares se obtienen a partir del factor de emisión para consumo, con base en la Matriz Energética Nacional (2010), estimada en 0,38 tnCO₂eq/MWh. Esos estándares se restringen a los resultados de estudios realizados en Argentina, y se plasman, en este caso, como lo han hecho varios autores, en una figura, uno de cuyos extremos es de color verde, y el extremo opuesto, rojo. El color verde (hacia el valor 0,08) señala un mejor desempeño ambiental por consumo por persona al indicar emisiones GEI relativamente bajas. En el caso extremo, el color rojo (hacia el valor 2,03) indica mayores emisiones GEI y un desempeño ambiental negativo. La misma figura en colores se aplica a gran diversidad de casos y productos, y se la cita como indicativo a fin de observar el grado de desplazamiento de las emisiones GEI per cápita consecuentes con dos variables: el consumo de energía eléctrica, por un lado, y, por otro, la variabilidad de la composición de los recursos con los cuales se obtiene esa energía. Dicha representación cromática permite comparar la dispersión gráfica de las emisiones GEI de la Matriz Energética Nacional (2010, en color) y la dispersión gráfica de la matriz energética sustentable (1995-2014, sin relleno o en blanco), al ser analizada con la perspectiva de los escenarios I, II y III.

Los rangos obtenidos en este trabajo mediante el análisis de sensibilidad utilizando escenarios optimistas, medios y pesimistas se presentan en un rectángulo sin relleno, plasmado sobre la gráfica en colores en la figura 5. Se consideran tanto el periodo transversal de consumo de energía eléctrica (2011) como el registro histórico longitudinal de 19 años (1995-2014). En ambos casos, las emisiones GEI per cápita de la matriz energética sustentable local sobrepasan los estándares nacionales, pues se extienden hasta superar los valores máximos de la figura (2,03 tnCO₂eq/pers*año). El rango señala que es posible que en algunos años (uno cada 6) las emisiones GEI se ubiquen hacia la izquierda (verde), entre los 0,36 y los 0,52 tnCO₂eq/pers*año; sin embargo, el valor de emisiones GEI per cápita del escenario II —el más probable— se localiza en el extremo rojo de las emisiones a escala nacional. Puede observarse que, también en el

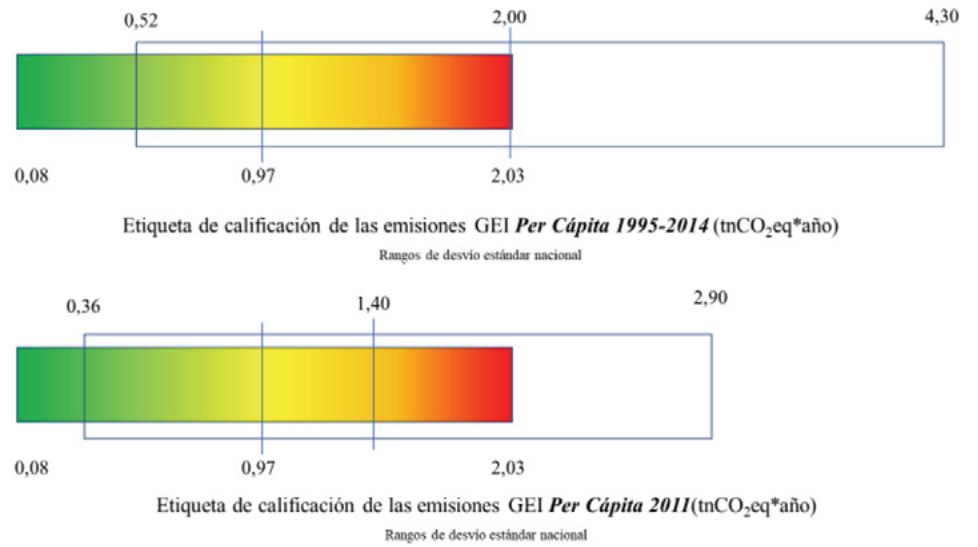
ámbito nacional, San Juan —aun disponiendo de una matriz energética sustentable— podría generar emisiones GEI superiores a las observadas en la Matriz Energética Nacional, cuya mayor proporción corresponde a fuentes no renovables.

Benchmarking de emisiones GEI per cápita en otros países del mundo

Los valores de las emisiones GEI van en concordancia con el grado de desarrollo económico del país. De esa manera, según datos estadísticos del BM (2019), las naciones cuyos ciudadanos presentan ingresos económicos bajos exhiben un promedio de 0,30 tnCO₂eq/pers*año; aquellos con ingresos medianos, uno de 3,90 tnCO₂eq/pers*año; los que disponen de ingresos medios-altos, uno de 6,60 tnCO₂eq/pers*año, y los ciudadanos con ingresos altos, uno de 10,70 tnCO₂eq/pers*año. En la figura 6 se destaca el elevado nivel de emisiones que presentan países como Arabia Saudita (19,52 tnCO₂eq/pers*año), seguido por Estados Unidos (16,49 tnCO₂eq/pers*año) y Canadá (15,11 tnCO₂eq/pers*año).

En Argentina, hasta el 29% de la matriz energética se compone de fuentes hidroeléctricas; en Brasil, el 61%; en Chile, el 31,7%; en Bolivia, el 28,9%; en Paraguay, el 100%, y en Uruguay, el 60%. En el país, solo el 10% del total de la energía final consumida proviene de fuentes de origen renovable (solar y eólica). Este valor es relativamente inferior, en comparación con los demás países limítrofes de la región, como Chile (24%), Uruguay (58%), Paraguay (62%), Brasil (44%) y Bolivia (17,5%). Como puede observarse, no obstante disponer de recursos similares entre países limítrofes, Argentina tiene un menor porcentaje de fuentes no convencionales (hidro y renovables) en su matriz energética que los demás países de la región, e igual acceso a la electricidad en la población (superior al 90% en todos los casos).

Datos registrados en 2014 señalan que Argentina se ubica (Banco Mundial, 2019) entre los países con menores emisiones GEI (promedio ponderado), con 4,74 tnCO₂eq/pers*año, en línea con la media mundial, de 5 tnCO₂eq/pers*año. Junto con Chile y Venezuela, este valor de emisiones GEI per cápita es uno de los más altos de América Latina, región cuyo promedio de emisiones es de 3,10 tnCO₂eq/pers*año (figura 6). Los países miembros de la OCDE⁴, los cuales se han comprometido a mantener, y en algunos casos —como Francia y Polonia— reducir, sus emisiones, alcanzan las 9,50 tnCO₂eq/pers*año. Este valor triplica las emisiones GEI de América Latina y duplica el valor de las emisiones en la matriz energética sustentable objeto de análisis.



Se observa que, pese al impacto del riesgo hídrico de la matriz energética sustentable analizada sobre el nivel de emisiones GEI, el escenario pesimista (III: 4,30 tnCO₂eq/pers*año), definido en el presente trabajo, señala montos de GEI menos impactantes que los observados en los países desarrollados, cuyos parámetros se aproximan y superan los 10 tnCO₂eq/pers*año.

Cuando la matriz energética sustentable satisficiera su potencial de generación —uno de cada seis años—, las emisiones GEI locales per cápita se ubican entre las más bajas del mundo: entre los 0,36 y los 0,52 tnCO₂eq/pers*año.

Discusión

El valor estimado de emisiones con base en la potencia instalada de la matriz energética es un valor extremo y con baja probabilidad de ocurrencia, y ofrece una impresión de sustentabilidad engañosa. La matriz energética sustentable analizada es difícil de mantener en el tiempo, y solo el 17% de las veces promete emisiones despreciables. Una de las razones de esta variabilidad puede hallarse en la creciente contracción de los glaciares andinos (*Diario de Cuyo*, 2018), manifestada en una reducción del caudal del río⁵. La introducción del concepto de riesgo en los análisis, en general, conduce a la disminución de errores de estimación. Podemos ver que un rango en sí mismo ofrece valores esperados flexibles, para diferentes probabilidades. Al considerar el espectro de valores probables, se identifica el impacto de una variable independiente, extraña al análisis, como lo es el nivel de hidraulicidad del río sobre las emisiones de CO₂eq por unidad de energía generada y por usuario. En consecuencia, otra cuestión por rever es el valor

Figura 5. Etiqueta de emisiones per cápita de GEI en tnCO₂eq*año para periodos longitudinales (1995-2014) y transversales (2011) de consumo de energía eléctrica en San Juan.

Nota: Las líneas en colores indican la variación de mayor (rojo) a menor (verde) cantidad de emisiones. La línea en blanco señala los valores GEI obtenidos en el presente trabajo.

Fuente: elaboración propia, con base en estándares nacionales proporcionados por Ferraro et al. (2013).

⁴ Agrupa a 36 países, cuya extensa lista puede consultarse en diversos sitios de internet. De América Latina, Chile y México hacen parte de esta organización en la actualidad.

⁵ Este factor tiene relación con fenómenos mundiales como las mayores temperaturas ocasionadas por el calentamiento global y la disminución de las lluvias en zonas desérticas del planeta.

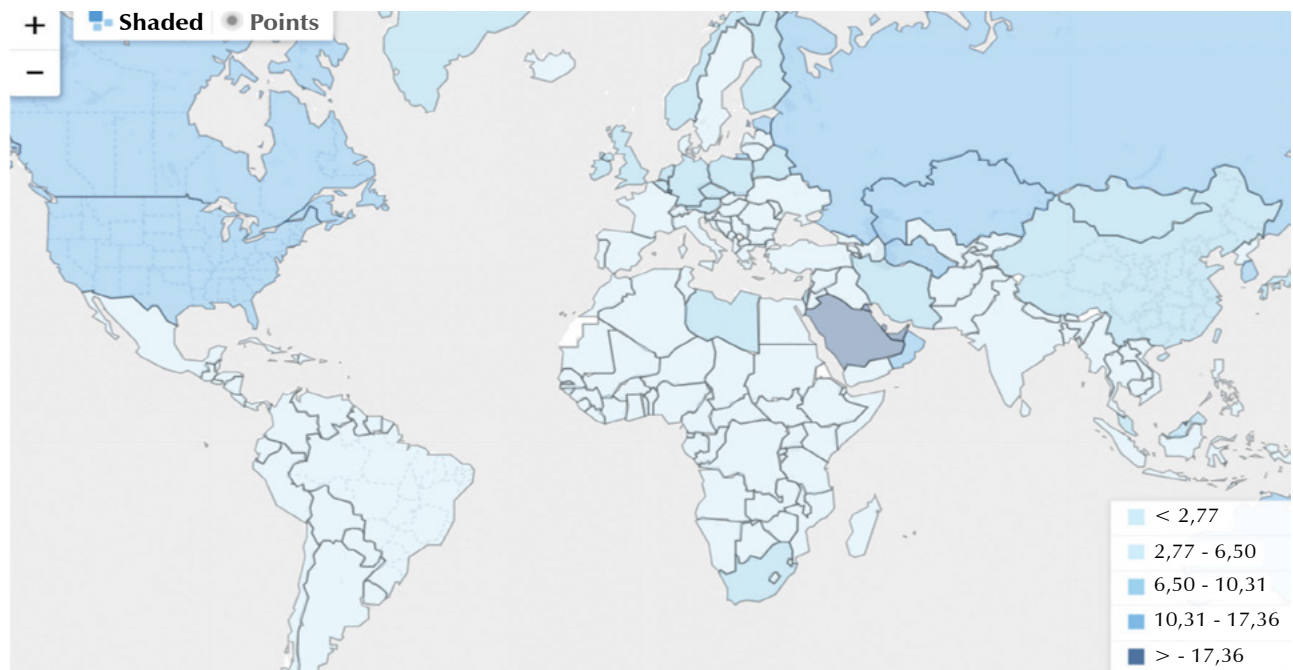


Figura 6. Distribución geopolítica del promedio ponderado de emisiones de GEI per cápita y por países para 2014.

Fuente: Banco Mundial (2019).

del factor de emisión: analizar si debe ser considerado un valor rígido, o bien, un rango de valores posibles; particularmente, en matrices en las cuales impera la incertidumbre.

Por otra parte, cabría preguntarse si la escala de aproximación de las emisiones por países no es demasiado amplia; hay estudios (Puliafito et al., 2017) que señalan la mayor precisión alcanzada en la estimación de las emisiones al abordar regiones a escalas inferiores a las departamentales. Resulta razonable escalar las emisiones a dichos límites, pues las normativas de acondicionamiento térmico, entre otras que afectan al consumo energético residencial (casi el 50% en San Juan), dependen de los municipios, los partidos o los departamentos (Chávez et al., 2017).

En vista de la gran participación en la demanda energética del sector residencial, parece determinante reducir las emisiones a la atmósfera mediante la optimización de la envolvente de viviendas barriales. Estudios (Blasco Lucas et al., 2011) confirman que el mayor consumo energético en viviendas se produce para conservar el confort higrotérmico de los usuarios, y que esto supone el uso de diversos recursos no renovables. En el mencionado trabajo también se ha verificado que la calidad de diseño y construcción de los hogares es uno de los factores que influyen fuertemente en el consumo de energía. Sería posible conservar constante el nivel de emisiones GEI mediante el diseño de un sistema tarifario que penalice el mayor consumo energético en épocas de baja generación hidroeléctrica. De esa manera, la incertidumbre respecto de la disponibilidad de energía de origen renovable, ligada al riesgo de baja *hidraulicidad*, podría comunicarse al consumidor y ser este un sujeto activo sobre el nivel de emisiones GEI.

Conclusiones

Los escenarios I, II y III elaborados en el presente trabajo se basan en evidencia empírica de un caso altamente representativo, como lo es el que constituye la central hidroeléctrica Los Caracoles, cuyo potencial de generación de energía comprende el 35% de la matriz energética sustentable analizada. Este registro histórico contradice la hipótesis de sustentabilidad energética y ambiental (H_0) esperada en una matriz energética sustentable, principalmente constituida por recursos renovables, cuyo potencial de generación hidroeléctrica alcanza el 85% de esta. Mediante una prueba de hipótesis t-test se confirma dicho supuesto.

Respecto de las emisiones originadas en la matriz energética sustentable objeto de análisis, con rangos entre los 0,52 y los 4,30 tnCO_2eq año/per cápita, con una media de 2,00 tnCO_2eq año/per cápita, se puede decir que en periodos de baja *hidraulicidad* las emisiones GEI se incrementan significativamente, y que este efecto negativo presenta mayor frecuencia (83%) que el escenario esperado o potencial (17%). Es decir, la mayoría de los años se producen emisiones GEI superiores a las reflejadas a partir de la composición de la matriz energética sustentable abordada. En el escenario más pesimista, existe el 66% de déficit energético en la matriz energética sustentable, que debe ser cubierto mediante la provisión de energía eléctrica secundaria inyectada por el Sistema Interconectado Nacional, con sus consecuentes incrementos en las emisiones GEI a la atmósfera (0,38 $\text{tnCO}_2\text{eq}/\text{MWh}$).

Los resultados obtenidos mediante los métodos estadísticos de prueba de hipótesis permiten establecer inferencias sobre la población verificando que la matriz energética sustentable estudiada genera energía hidroeléctrica por debajo del prome-

dio esperado, lo cual impacta significativamente sobre el desempeño ambiental incrementando de un año al otro el nivel de emisiones a la atmósfera. La matriz energética sustentable analizada se ve afectada de forma directa por el nivel de *hidraulicidad* de la cuenca, debido a que es la generación hidroeléctrica su principal componente (85%). La matriz energética nacional se compone de fuentes hidroeléctricas abundantes y estables, asentadas en cuencas prominentes. A escala nacional, la variabilidad de la *hidraulicidad* de la matriz energética sustentable analizada impacta en menos del 5% de la generación hidroeléctrica en el país, por lo tanto, no sería factible suponer que el factor de CO₂eq por unidad de energía producida sea muy diferente del estimado para Argentina. En el plano internacional, las emisiones locales de CO₂eq per cápita originadas en la Matriz Energética Nacional (4,75 y 4,35 tnCO₂eq año/per cápita; Banco Mundial e IEA, respectivamente) entre una de las más bajas, si consideramos que Estados

Unidos emite entre 14,95 y 16,49 tnCO₂eq año/per cápita.

Los parámetros de emisiones GEI por escenario obtenidos en este trabajo son aplicables a todo sector o población cuya demanda energética total provenga de la matriz energética sustentable objeto de análisis. Es posible que el sector industrial deba contemplar los efectos de la autogeneración de energía en la estimación de sus emisiones.

Nomenclaturas

- μ ; media poblacional o teórica, igual a 730.000 MWh*año
- x ; media muestral, igual a 182.000 MWh*año
- σ ; desviación estándar de la muestra 97.551 MWh*año
- s ; desviación estándar de la población
- n ; observaciones o eventos (6 años)
- C_v ; coeficiente de variación

Referencias

- AES Argentina. (2019). *Negocios*. <https://www.aesargentina.com.ar/>
- Apud, E., Aráoz, J. C., Devoto, E., Echarte, R. (2014). *Argentina debe modificar su Matriz Energética*. <https://www.exsecretarios.com.ar/>
- Atlas Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). (2020). *Precipitaciones medias anuales*. <http://www.atlas.unsj.edu.ar/contenidos/PRECIPITACIONESMEDIASANUALESdoc.html>
- Banco Mundial. (2019). *Datos. Emisiones de CO₂*. <https://datos.bancomundial.org/>
- Blasco Lucas, I., Facchini, M., Avelin, R., Roses, R., Hoese, L., . (2011). Análisis comparado de Consumos energéticos en el sector residencial de la ciudad de San Juan. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1, 61-69. <http://www.asades.org.ar/biblioteca/revista-averma/>
- Boninsegna, J., Villalba, R. (2019). *Documento sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de cambio climático*. <https://inta.gov.ar/>
- Chávez, P., Martini, I., Díscoli, C. (2017). Políticas de eficiencia energética orientadas al sector residencial de la República Argentina. *Revisión de Trayectorias Disímiles. Revista Investigación Joven*, (2017), 7-17. <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov>
- Clemente, C., Naharro, J. (2009). Comparación de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la generación de energía. *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, 13, 19-29. <http://www.publicacionesrade.es/index.php/arade>
- Comisión Europea (2020) *Acuerdo de París*. https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico SA (CAMESA). (2019). *Informes mensuales 2009-2014*. <https://despachorenovables.cammesa.com/>
- Departamento de Información Económica y Social (DIES). *Consumo de Electricidad 2014*. <http://dies.chaco.gov.ar>
- Diario de Cuyo*. (2018). Confirman que el río San Juan traerá menos agua de la que se esperaba. <https://www.diariodecuyo.com.ar/economia/>
- Energía Provincial Sociedad del estado (EPSE). *Hidráulica, solar, térmica*. <http://epsesanjuan.com.ar/web/energia/hidraulica/1>
- Ferraro, R., Gareis, M. C. y Zulaica, L. (2013). Aportes para la estimación de la huella de carbono de los grandes asentamientos urbanos de Argentina. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 87-106. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg>
- Frank, A. (2019). *Herramienta integral de valoración de la eficiencia energética de edificios de viviendas particulares en altura en etapa post-ocupación; el habitante como eje fundamental. Casos de estudio en ciudad de San Juan, Argentina*. En prensa.
- Frank, A., Kuchen, E., Alamino Naranjo, Y., Arballo, B. (2016). Emisiones de dióxido de carbono originadas por el consumo de energía eléctrica en edificios de la Provincia de San Juan-Argentina. *Revista Internacional Hábitat Sustentable*, 6(1). <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2352>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (1996). *Norma IRAM 11603: Clasificación Bioambiental de la República Argentina*.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). (2019). *Censo 2010*. <https://www.indec.gov.ar/>
- International Energy Agency (IEA). (2019). *Estadísticas por países. Emisiones*. <https://www.iea.org/statistics/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable y Ministerio de Energía y Minería de la Nación. (2017). *Plan de acción nacional de energía y cambio climático*. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/sustentabilidad/planes-sectoriales/energia>
- Ministerio de Energía y Minería de la Nación Argentina (MINEM). (2019). *Datos y Estadísticas*. <https://www.argentina.gob.ar/energia/datos-y-estadisticas>
- Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación. (2020). *Balances Energéticos*. <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>
- Molina, J., Martínez, V., Rudnick, H. (2011). *Evaluación de escenarios de generación, diversidad energética y emisiones de CO₂ del Sistema Interconectado Central de Chile*. Conferencia. Third Latin American Meeting on Energy Economics, ELAEE 2011. <https://www.iaee.org/>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). *Data*. <https://data.oecd.org/>
- Puliafito, S., Castesana, P., Allende, D., Ruggeri, M., Pinto, S., Gariglio, A. (2017). *Inventario de alta resolución de emisiones atmosféricas del sector energético para Argentina. Parte III: Comparación con otras bases*. Conferencia. PROIMCA-PRODECA 2017. <https://utn.edu.ar/es/>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2019). *Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático*. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/sustentabilidad/cambioclimatico/>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Elección de la metodología y realización de nuevos cálculos*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/>
- US Dept of State Geographer. (2018). *Google Earth Pro*. <https://www.google.com.ar/intl/es/earth/>
- US Energy Information Administration (EIA). (2019). *Analysis*. <https://www.eia.gov/international/analysis/country/ARG>
- Wikipedia. (2019). *Represa Los Caracoles*. https://es.wikipedia.org/wiki/Represa_Los_Caracoles