

Incentivos y obstáculos

para la implementación del Hidrógeno Verde

en Costa Rica

II artículo de la serie

Innovación ambiental: claves para el crecimiento económico

Ronald Chang Díaz



 **KONRAD
ADENAUER
STIFTUNG**


ACADEMIA
DE CENTROAMÉRICA

Diciembre 2023

Abstracto:

Costa Rica, con su destacada matriz energética basada en recursos renovables y avanzado recurso humano, se encuentra estratégicamente posicionada para la rápida adopción del hidrógeno verde como vector energético.

Por tal razón, este documento analiza la actual situación energética del país, destacando el liderazgo del ICE en energías renovables, pero también señalando el desafío que representa el uso de derivados de hidrocarburos en el transporte.

Se propone una hoja de ruta que sugiere enfocarse inicialmente en el transporte público, respaldado por fondos no reembolsables para superar barreras tecnológicas. La implementación exitosa requiere una transición del sector público hacia proyectos tangibles, con el liderazgo del MINAE en la ejecución de la estrategia nacional de hidrógeno. Además, se destaca la necesidad de colaboración entre entidades como MICITT, RECOPE, CTP, ARESEP, INA y el sistema financiero para investigar tecnologías, cambiar la flota de autobuses y crear vehículos financieros innovadores.

El documento aboga por la diversificación de la matriz energética con fuentes renovables adicionales, como energía mareomotriz y solar privada, mientras se fomenta la investigación en tecnologías de hidrógeno verde en instituciones académicas y empresas privadas. Se insta a buscar alianzas internacionales para exportar hidrógeno verde y se propone un sistema de medición de desempeño.

El análisis incluye una revisión de la legislación existente, planes nacionales y acuerdos internacionales, y se destaca la necesidad de superar la dependencia de combustibles fósiles. Finalmente, basándose en la Contribución Nacionalmente Determinada, el "Trilemma Score", la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y el Fondo Verde para el Clima, se formulan recomendaciones cruciales para una transición exitosa hacia el hidrógeno verde, considerando el impacto regional y global en medio de la creciente crisis climática.

Abstract:

Costa Rica, with its remarkable energy matrix based on renewables and a skilled workforce, is strategically positioned for the rapid adoption of green hydrogen as an energy vector. This document analyzes the current energy situation in the country, emphasizing the leadership of ICE in renewable energy while highlighting the challenge posed by the use of hydrocarbon derivatives in transportation.

A roadmap is proposed, suggesting an initial focus on public transportation, supported by non-repayable funds to overcome technological barriers. Successful implementation requires a transition from the public sector to tangible projects, with MINAE leading the execution of the national hydrogen strategy. Additionally, the need for collaboration between entities such as MICITT, RECOPE, CTP, ARESEP, INA, and the financial system is emphasized for researching technologies, transitioning bus fleets, and creating innovative financial instruments.

The document advocates for the diversification of the energy matrix with additional renewable sources, such as tidal and private solar energy, while promoting research in green hydrogen technologies in academic institutions and private companies. International partnerships are encouraged for green hydrogen export, and a performance measurement system is proposed.

The analysis includes a review of existing legislation, national plans, and international agreements, underscoring the necessity to overcome dependence on fossil fuels. Finally, based on the Nationally Determined Contributions, the "Trilemma Score," the National Green Hydrogen Strategy, and the Green Climate Fund, crucial recommendations are formulated for a successful transition to green hydrogen, considering the regional and global impact amid the escalating climate crisis.

Índice

Abstracto	3
Índice	5
Abreviaciones	6
Resumen	7
Estado de la industria del H2V en Costa Rica	8
Comparación de Costa Rica en el manejo de la energía	10
Costo de energía entre diésel, baterías e hidrógeno	16
Estimación de crecimiento de H2V en el mundo	19
Plan nacional de descarbonización	21
Fondo verde para el clima de las Naciones Unidas	24
Propuesta de Hoja de Ruta	26
Liderazgo de CR en H2V en Latinoamérica	29
Beneficios para Costa Rica con la producción de H2V	30
Hidrógeno blanco	34
Conclusiones y recomendaciones	36
Glosario	38
Bibliografía	39

Abreviaciones:

ACH2:	ASOCIACIÓN COSTARRICENSE DEL HIDRÓGENO
AED:	ALIANZA EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO
ARESEP:	AUTORIDAD REGULADORA DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS
CAPEX:	CAPITAL INVERTIDO AL INICIO DE UN PROYECTO
CINDE:	COALICIÓN COSTARRICENSE DE INICIATIVAS DE DESARROLLO
CND:	CONTRIBUCIÓN NACIONALMENTE DETERMINADA
CO2:	DIÓXIDO DE CARBONO
FVC:	FONDO VERDE PARA EL CLIMA
GW:	GIGAWATT
INA:	INSTITUTO NACIONAL DE APRENDIZAJE
INCOFER:	INSTITUTO COSTARRICENSE DE FERROCARRILES
IRENA:	INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA RENOVABLE)
OCDE:	ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO.
OPEX:	COSTO DE OPERACIÓN DURANTE LA VIDA DE UN PROYECTO
PJ:	PETAJULIO
PNUD	PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO
PROCOMER:	PROMOTORA DEL COMERCIO EXTERIOR DE COSTA RICA
RECOPE:	REFINADORA COSTARRICENSE DE PETROLEO
WHO:	WORLD HEALTH ORGANIZATION (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD.

Resumen

Este documento tiene como objetivo principal realizar un análisis para entender la situación actual del país en cuanto a beneficios y obstáculos a enfrentar para la implementación de tecnologías del hidrógeno verde.

Costa Rica, con su matriz energética y recursos humanos, está bien posicionada para una rápida implementación del hidrógeno verde, por lo que enfocarse, inicialmente, en el transporte público, respaldado por fondos no reembolsables para cubrir diferencias tecnológicas, podría ser la estrategia más efectiva. El sector público debe pasar de la estrategia a la implementación de proyectos reales, ganando experiencia y es esencial que el país actúe de inmediato para independizarse de los hidrocarburos y gestionar eficientemente la energía

Por su parte, el Poder Ejecutivo y Legislativo deben mantenerse al día con avances científicos y tecnológicos. La legislatura debe concebir una ley de hidrógeno verde que integre al sector privado, académico y público, y se debe dar seguimiento a la estrategia nacional del hidrógeno y cumplir con los objetivos propuestos.

MINAE debe liderar la implementación de la hoja de ruta, mientras que el INA debe prepararse para nuevos modelos de negocios en tecnologías de hidrógeno verde. Se necesita colaboración entre MICITT y RECOPE para investigar tecnologías de almacenamiento, y entre CTP y ARESEP para estrategias en el cambio tecnológico de autobuses, además de incorporar al sistema financiero creando vehículos financieros novedosos. Se debe buscar modelos financieros con fondos internacionales

y el sistema bancario, así como incentivos fiscales para la adquisición de equipos de hidrógeno verde; también, incluir la industria del hidrógeno verde en programas académicos y realizar campañas de educación sobre los beneficios del hidrógeno verde, así como buscar alianzas internacionales para exportar hidrógeno verde y establecer un sistema de medición de desempeño con ajustes según sea necesario; también, diversificar la matriz energética con fuentes renovables como la energía mareomotriz, la solar privada en zonas urbanas y aumentar la geotérmica, promover la investigación en tecnologías de hidrógeno verde en instituciones académicas y empresas privadas, evaluando y ajustando planes de expansión, considerando el sector de transporte y generación distribuida, investigar yacimientos naturales de hidrógeno blanco y considerar proyectos piloto en el transporte público con un enfoque en la equidad de género; y evaluar el potencial de la biomasa como fuente de energía sin competir con fuentes alimenticias.

Estado de la industria de hidrógeno verde en Costa Rica

Evaluación preliminar del estado de la energía en Costa Rica.

Todo país debe entender muy claramente la importancia de la energía como el recurso más importante de gestionar después del agua y los alimentos. Costa Rica ha sabido manejar los recursos energéticos gracias a una visión poco implementada en otros países, donde el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha sido clave para el éxito. Desde su creación en el año 1949, el ICE ha seguido el camino propuesto por quien podría pensarse como uno de los mayores visionarios que ha tenido el país, el ingeniero Jorge Manuel Dengo. Costa Rica es un ejemplo mundial con casi el 100% de su energía eléctrica proveniente de fuentes renovables.

Por el momento, Costa Rica ha registrado una buena calificación en el manejo de la energía, sin embargo, el tema empieza a oscurecerse debido a la falta de un norte claro a seguir durante los últimos 20 años, donde la falta de liderazgo ha mostrado poca innovación a nivel latinoamericano. El sector más preocupante es el de transportes, ya que la importación de combustibles fósiles nos ha desviado del camino hacia lograr independencia energética. Resulta preocupante que, tras casi 7 años de la firma del Acuerdo de París, las emisiones de gases efecto invernadero han continuado en ascenso. Según el comunicado de prensa del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) emitido en enero del 2022 ([Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2022](#)), Costa Rica experimentó un aumento del 77% (1990-2017) en la emisión de gases de efecto invernadero, al analizar los datos eliminando FOLU (sector de silvicultura). Aunque el país realizó un gran esfuerzo en la reforestación

para generar formas de captura de carbono, dichos bosques van perdiendo su capacidad de absorber carbono en su matriz al madurar. Nuestra calificación real, al comparar la tendencia, es que la emisión de gases del país está aumentando debido, principalmente al sector transporte con un 42% de la participación de gases. Esto muestra que se debe focalizar todos los esfuerzos a controlar y mitigar este mal desempeño.

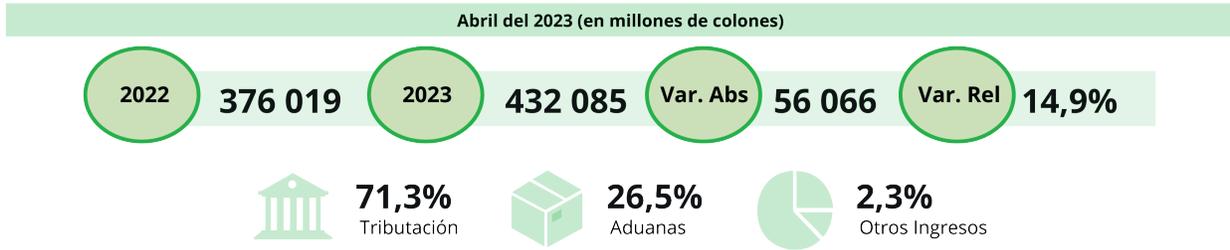
La emergencia climática se está acelerando y el 2023 ha sido realmente catastrófico, con múltiples muertes causadas por los efectos de la energía térmica acumulada. El planeta muestra, por todos lados, los efectos de la acumulación de energía en fenómenos climáticos cada día más espeluznantes, siendo los dos más recientes el de Libia, en septiembre 2023, con más de 4265 muertos registrados (World Health Organization, 2023) y 8500 personas desaparecidas y el huracán Otis, en octubre 2023, que golpeó Acapulco de forma sorpresiva dejando 45 muertos y 47 desaparecidos (BBC News Mundo, 2023).

No se puede mantener el statu quo, se deben realizar cambios drásticos y Costa Rica podría ser un ejemplo ante la comunidad internacional, dirigiendo sus políticas hacia una economía completamente libre de emisiones de dióxido de carbono. El Plan Nacional de Descarbonización contempla claramente los tres ejes más importantes valorados, sin embargo, ¿por qué no lo hace? La respuesta podría estar en que, en los últimos 20 años, los gobernantes no han encontrado una fórmula que nos libere de la dependencia del petróleo. Pero quizás el elemento más disuasivo para los distintos gobiernos de turno es que el petróleo deja mucho dinero a las arcas del Estado. (Ministerio de Hacienda, 2023).

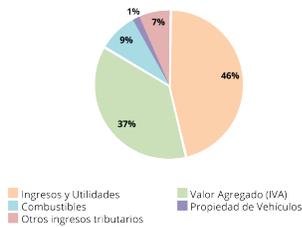
Figura1

Ingresos Tributarios de Costa Rica

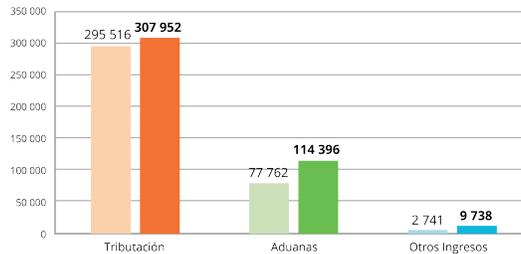
Ingresos Tributarios por Dependencia



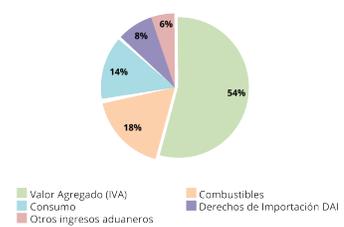
Participación % de los Ingresos Tributación 2023



Distribución de los ingresos por Dependencia 2022 - 2023



Participación % de los Ingresos Aduanas 2023



Fuente: Ministerio de Hacienda

Nota: El 9% del total de ingresos al Ministerio de Hacienda proviene de la importación de los combustibles, esto sin contar el impuesto asociado a los vehículos importados de combustión interna.

El dinero que genera es el necesario para cubrir las necesidades anuales de flujo (9% de los ingresos del Ministerio de Hacienda) y, para satisfacer las demandas de nuestra sociedad. Al parecer, nuestro país no desea hacer el cambio realmente, ya que, por el momento, no tiene una entrada que sustituya los impuestos asociados a la factura petrolera.

Comparación de Costa Rica en el manejo de la energía

El Consejo Mundial de la Energía califica a cada país mostrando las tendencias y su nivel actual en varios parámetros que son muy relevantes a la hora de tomar decisiones y para lo cual ha creado una herramienta llamada "Trilemma".

Esta herramienta consta de tres principios básicos a ser medidos en cada país;

1. Seguridad de la energía
2. Equidad de la energía
3. Sostenibilidad ambiental

El primero mide la capacidad de cada país de asegurar cubrir la demanda de energía requerida de forma continua. El segundo califica el hecho

que la energía llegue a todo usuario a un precio razonable y de forma universal. Finalmente, el tercero representa la debida transición de un país para mitigar y adaptarse a energías renovables.

El balance adecuado de estos tres ejes demuestra que el país está resolviendo correctamente el manejo de la energía. El Consejo Mundial de la Energía realiza mediciones anuales del trabajo que realiza cada país y publica esta información de forma regular.

Las tendencias negativas de Costa Rica, según el Consejo Mundial de la Energía se pueden apreciar, en la siguiente figura, marcadas con un punto rojo.

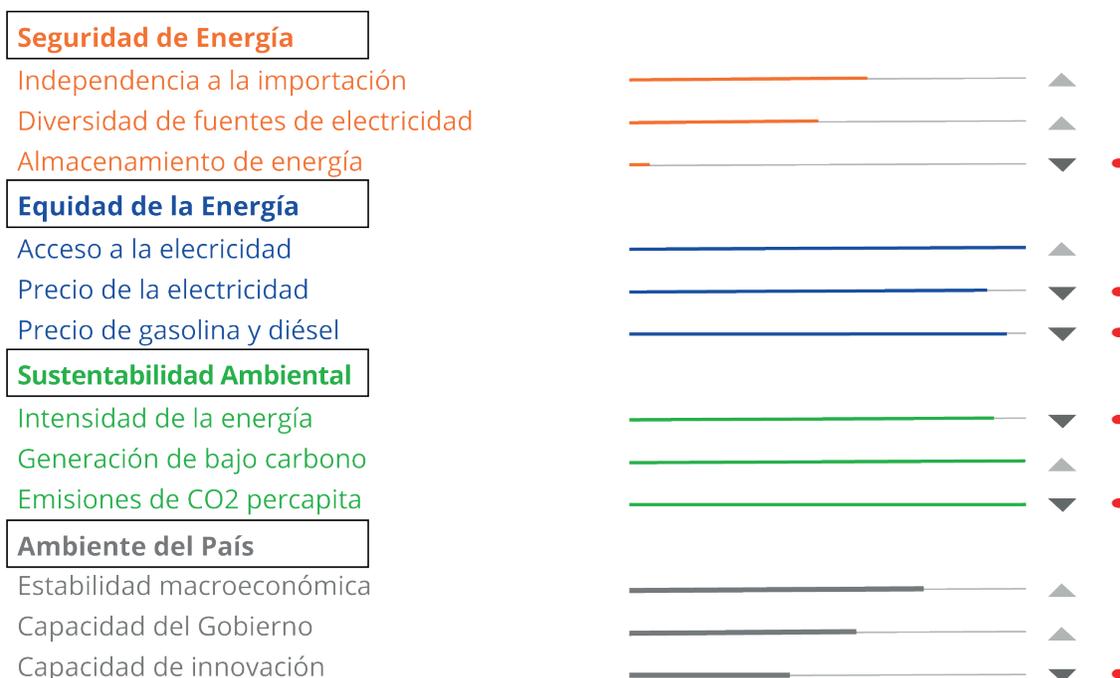


Figura 2

Evaluación de Costa Rica del Consejo Mundial de la Energía

Métricas Claves

Las métricas están determinadas relativas a otros países la barra completa significa un puntaje de 100



Fuente: Consejo Mundial de la Energía

Nota: Se aprecian las métricas generadas por el Consejo Mundial de la Energía al 2022: Costa Rica muestra muy pobre inversión en innovación, emisiones de CO2 al alza per cápita, pobre eficacia de los gobiernos y una mala capacidad de almacenamiento de energía.

Al revisar la información histórica de la calificación de varios países latinoamericanos, se pueden obtener varias conclusiones interesantes de la génesis del estado actual de Costa Rica. Es evidente el conformismo al observar que han transcurrido más de 20 años para mejorar la matriz y no se han realizado cambios importantes. Las tendencias se pueden apreciar en la siguiente tabla comparativa

de 10 países de América Latina, así como en el gráfico de apoyo a la tabla.

Lo positivo que se obtiene de los datos estudiados es que todos los países evaluados han mejorado su realidad energética y la mayoría tienen crecimientos de dos dígitos. Sin embargo, Costa Rica es el segundo con menor desempeño de los 10 países evaluados.

Tabla 1

Comparación de 10 países latinoamericanos

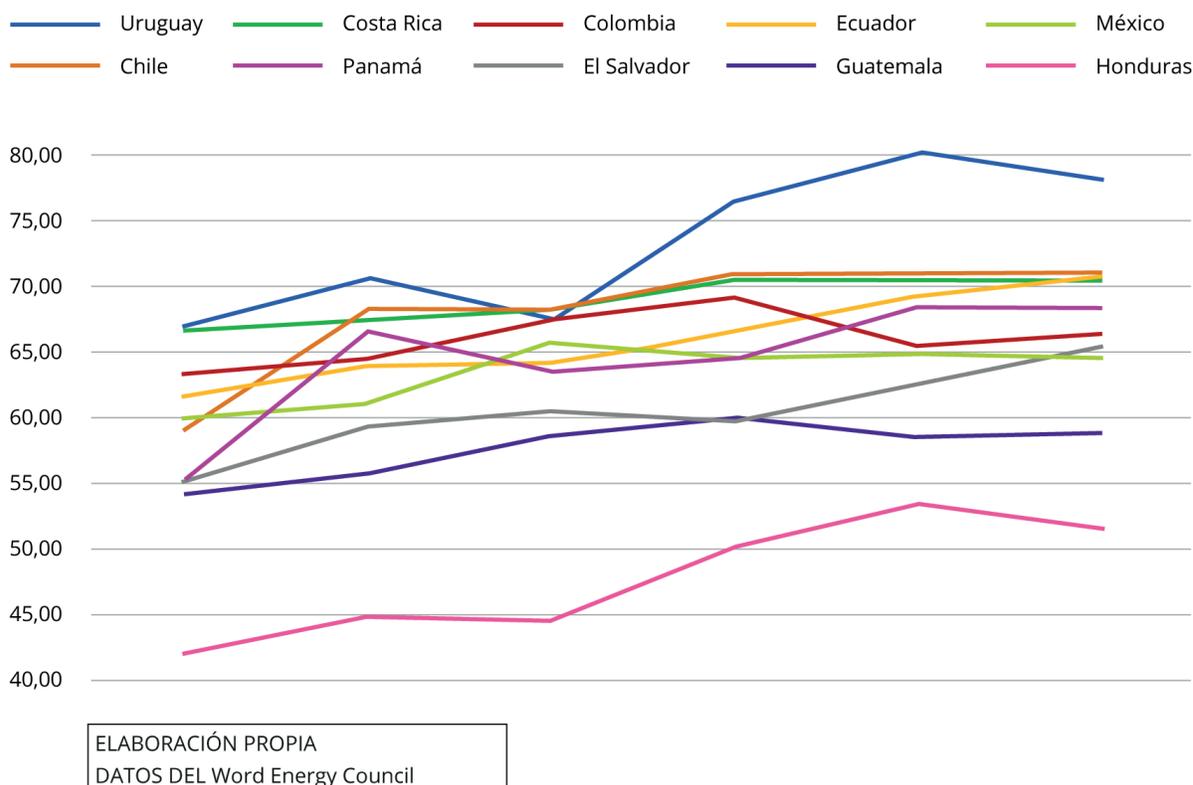
Posición en el año 2000	World Energy Council 2000-2022							% de cambio en 22 años
	Energy Trilema Index Calificación							
	Año	2000	2005	2010	2015	2020	2022	
1	Uruguay	66,93	70,50	67,59	76,60	80,10	78,10	17%
2	Costa Rica	66,76	67,45	68,37	70,87	70,69	70,69	6%
3	Colombia	63,35	64,68	67,60	69,22	65,47	66,43	5%
4	Ecuador	61,67	63,94	64,22	66,34	69,28	70,88	15%
5	México	59,96	61,23	65,77	64,67	65,05	64,62	8%
6	Chile	59,13	68,28	68,11	71,03	71,10	71,10	20%
7	Panamá	55,21	66,56	63,67	64,38	68,47	68,47	24%
8	El Salvador	54,98	59,35	60,41	59,76	62,79	65,50	19%
9	Guatemala	54,24	55,75	58,67	59,97	58,42	58,77	8%
10	Honduras	42,07	44,73	44,56	50,10	53,43	51,60	23%

ELABORACIÓN PROPIA
DATOS DEL Word Energy Council

Fuente de calificación anual: Consejo Mundial de la Energía



Trilema Score World Energy Council Datos Desde El 2000 Al 2022



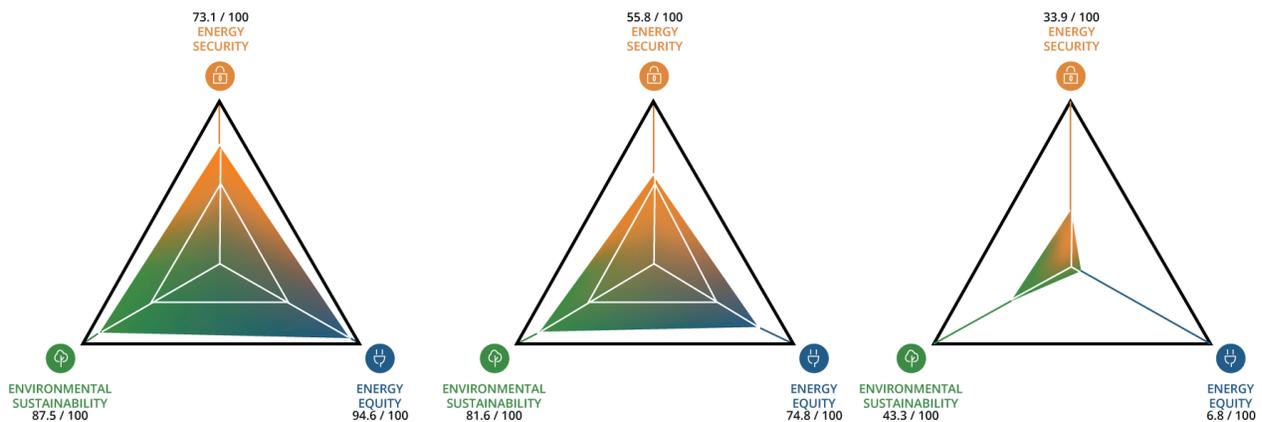
Nota: Aunque Costa Rica se aprecia en las posiciones de alto puntaje, su crecimiento ha sido de los dos más bajos en los 10 países comparados, con un crecimiento de apenas 6%. Costa Rica está perdiendo rápidamente su liderazgo en innovación y países como Panamá y El Salvador están invirtiendo fuertemente en su estructura energética.

Es interesante observar que, históricamente, Costa Rica ha tenido una posición privilegiada en América Latina, con una evaluación aceptable entre los países del mundo, de 69.3 en la calificación denominada "Trilemma Score", publicada por el Consejo Mundial para la Energía, donde Suecia es el líder con una calificación de 84.3% y Nigeria es la calificación más baja con un 29.2 (World Energy Council, 2022)

Figura 3

Trilemma Score

Comparación de Costa Rica entre la calificación más alta a la más baja de los países evaluados por el Consejo Mundial de la Energía.



Fuente: World Energy Council). Las tres aristas miden, en el sentido de las manecillas del reloj desde arriba: Seguridad de la Energía, Equidad de la Energía y Sostenibilidad Ambiental.

Nota. Comparación de Suecia, Costa Rica y Nigeria. Costa Rica tiene una calificación aceptable en la escala mundial.

Para el 2000, Costa Rica superaba a Chile y compartía una posición alta a la par de Uruguay, sin embargo, en 22 años, el crecimiento de Costa Rica, en el puntaje de la herramienta Trilemma ha sido muy pobre con un valor de apenas 6%, superando solo a Colombia. Países como Panamá, Chile, El Salvador y Honduras han registrado tasas de crecimiento de dos dígitos en la calificación Trilemma del Consejo Mundial de la Energía. La dependencia del petróleo para el transporte público es la clave que tiene a Costa Rica sin mejorar en su calificación del manejo de los tres ejes claves de la energía.

Para entender este dilema o más bien "trilema" se consultó, vía telefónica, a varias personas que han estudiado el tema del hidrógeno verde en Costa Rica, entre ellos Kathy Nanne, experta en relaciones comerciales de CINDE con empresas internacionales; Silvio Heimman, gerente general

de Cavendish, (empresa dedicada a inversiones de hidrógeno verde) y al doctor René Castro (ingeniero Civil con doctorado en Economía Ambiental y Recursos Naturales), con experiencia en el Fondo Verde para el Clima de las Naciones Unidas. Es evidente la frustración en el lenguaje expresado por muchos de ellos, ya que, aunque varias empresas internacionales han mostrado interés en desarrollar proyectos de H2 verde en el país, la reacción de las instituciones nacionales a cada esfuerzo ha sido de poco entusiasmo.

El economista Alejandro Muñoz, expresidente de Recope y miembro de la Asociación Costarricense de Hidrógeno (ACH2), tuvo la tarea de cerrar las negociaciones realizadas por Gobiernos anteriores para la instalación de una refinería con el Gobierno de China y también inició esfuerzos para buscar nuevas alternativas de combustibles alternos,

siendo el hidrógeno una de las posibilidades evaluadas. La Contraloría General de la República y la Procuraduría expresaron criterios que indicaban que RECOPE no podría entrar en el desarrollo de tecnologías de hidrógeno invocando contradicción con su ley constitutiva, lo cual detuvo cualquier esfuerzo de parte de la institución en el tema de hidrógeno.

Paralelamente, la empresa Kadelco, de origen australiano, mostró mucho interés en invertir en un proyecto de gran envergadura para la exportación de hidrógeno verde y, sin embargo, tanto el Gobierno saliente como el actual, mostraron poco interés en apoyar la iniciativa; esto causó que tanto Kadelco, como el grupo de capital costarricense Cavendish desistieran del proyecto.

El ingeniero Max Umaña, ex gerente general de RECOPE comentó que durante la administración 2018-2022, la institución intentó instalar una estación de pruebas de dispensado de múltiples combustibles en un terreno diagonal a la estatua de León Cortés, siendo el hidrógeno uno de los productos seleccionados a ser dispensados; sin embargo, por las opiniones legales antes mencionadas, la idea fue desechada.

Al parecer, la conclusión a la que se llega, al comparar los comentarios expresados por varios de las personas entrevistadas, es que el país parece estar en una zona cómoda, donde básicamente “nos hemos dormido en nuestros laureles” del pasado y no deseamos realizar cambios al *statu quo*. Los pocos esfuerzos que se están llevando a cabo son de poco impacto económico y se concentran en la empresa Ad Astra Rocket Company en conjunto con Cavendish, la Asociación Costarricense de Hidrógeno y la Alianza para el Hidrógeno, donde se agrupan los mayores promotores del país en este tema. Debe aplaudirse el esfuerzo privado, pero es imperativo que se incorpore de lleno la participación de Costa Rica en forma contundente, con participación de todos los jugadores sin excepción; tanto el sector

público, el privado y la academia. Todos deben trabajar juntos para sacar adelante la tarea.

El Plan Nacional del Hidrógeno Verde lanzado en septiembre del 2022 establece, claramente, la importancia del hidrógeno verde como uno de los caminos hacia la descarbonización. Las estimaciones expuestas en el documento de la Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde establecen que la demanda será de 20 mil toneladas/año para el 2030 y de 420 mil toneladas/año para el 2050, esto tan solo del sector transporte. Por lo tanto, la mejor forma de promover las tecnologías de hidrógeno verde es concentrándose en el sector transporte como el primer vector de negocios que incentive la economía del hidrógeno.

Según el gerente de ventas para Latinoamérica de la empresa portuguesa Caetanobus, sus socios comerciales estiman que el costo para la instalación de una “hidrogenera” en Europa ronda los 3 millones de euros para la producción de 500 kilogramos de hidrógeno verde por día, suficiente para cubrir las necesidades operativas de 30 autobuses con un recorrido promedio diario de 400 kilómetros. Suponiendo una nacionalización de los sistemas a Costa Rica, se puede estimar el costo para entrar a operar en Costa Rica en alrededor de 4 millones de dólares estadounidenses.

Figura 4

Costo de energía entre diesel, baterías e hidrógeno

Datos sobre buses de hidrógeno

BUSES ELÉCTRICOS HIDRÓGENO

Dimensionamiento de lote

- 1 estación hidrogenera: 500kg/día
- Potencia instalada: 1 MW
- Tiempo carga todo lote: 1 h 30 min (9 min/bus)
- Precio electricidad: Tarifa T-MT (punta, valle, noche)
- Precio cargar lote: 1265 USD
- Autonomía: 550 km

Eficiencia: 0,23 USD/Km



Diesel

Cargar 1 bus: 212 USD
Autonomía: 667 km
Eficiencia: 0,32 USD/km

Elaboración Propia (2023) con datos de referencia CaetanoBus.

Nota. Evaluación de tecnología de vehículos eléctricos de H2. El bus de hidrógeno tiene una autonomía y capacidad de carga que supera al bus eléctrico de baterías de litio.

Este costo es todavía alto para un empresario individual que desee realizar la inversión de forma independiente, por lo tanto, se establece un fenómeno del “huevo o la gallina”, en donde el Gobierno de Costa Rica deberá realizar la primera inversión de escala comercial, pero a esta inversión se le debe sumar una tarifa adecuada de energía eléctrica como fuente primaria para el electrolizador. El precio establecido por la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) denominada Tarifa T-UD, establece un costo de 3.9 centavos de dólar por kWh en horario nocturno y de 5,5 en horario diurno.

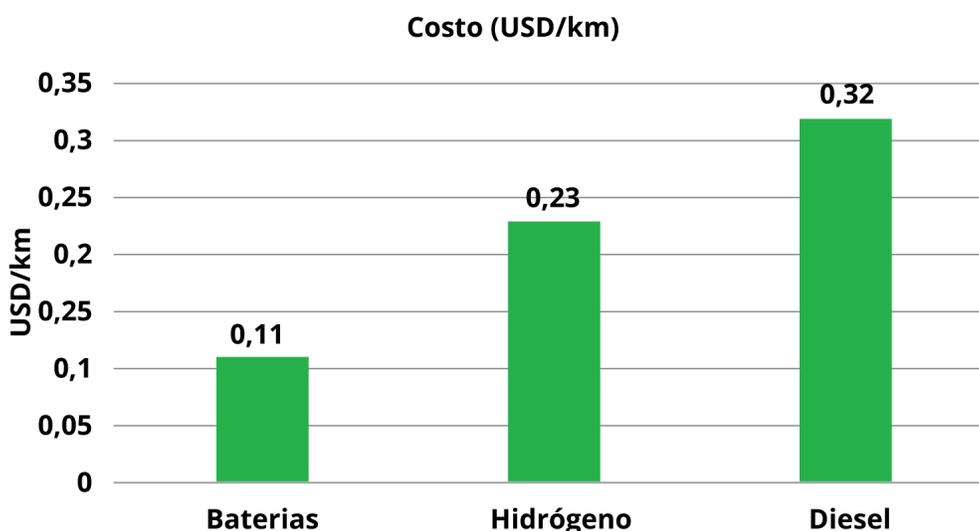
En cuanto a zonas francas, la tarifa fuera del GAM puede llegar a ser hasta de 3 centavos de dólar en horario nocturno, todas estas tarifas dependen claramente de que el país mantenga su producción de fuentes renovables; sin embargo, en los meses de julio, agosto y septiembre (2023) se está evidenciando el uso de hidrocarburos para compensar faltantes de energía. El siguiente gráfico muestra una comparación de costo suponiendo la tarifa más baja de 3 centavos por kWh.

Figura 5

Comparación de Costos Energéticos

COMPARACIÓN DE COSTO ENERGÉTICO

¿Cuánto me cuesta caminar 1 km?



Elaboración propia con costo de 3 centavos por kWh. Solo toma en cuenta energía, para que la comparación tenga validez.

Nota. Comparación al año 2023 de los costos de energía por tecnología.

La infraestructura de la generación de hidrógeno verde no existe, por lo tanto, a la hora de comparar tecnologías existentes, es necesario comparar los costos de la energía sin cargarle al hidrógeno la inversión necesaria para igualar la tecnología ya existente. Al comparar los costos energéticos, los costos de operación de vehículos de carga pesada y de transporte de pasajeros, son más económicos en sistemas de cero emisiones, por lo que el precio por kilómetro es definitivamente muy atractivo.

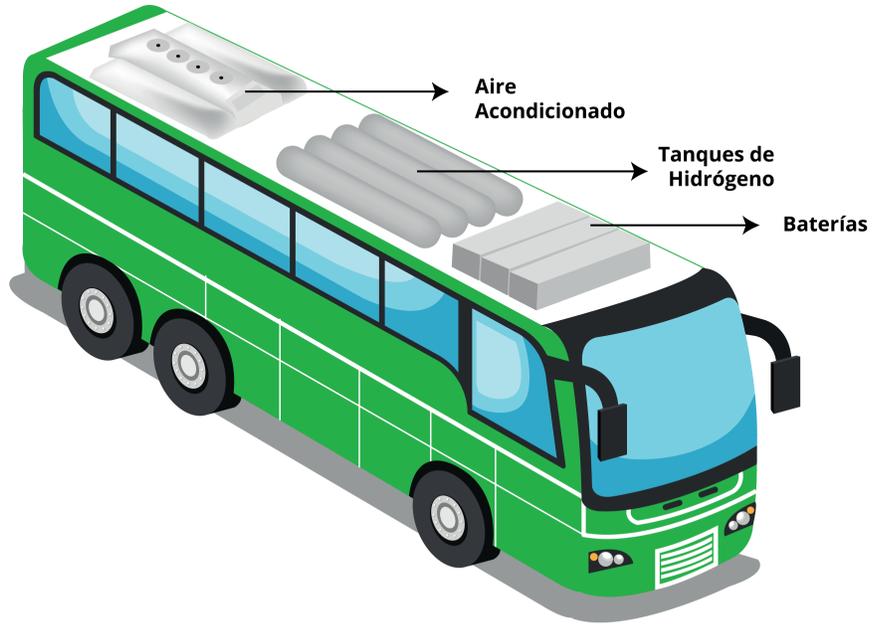
Hoy en día, el costo operativo de vehículos de hidrógeno es menor que el costo operativo de vehículos de baterías de litio, ya que las baterías de litio deben ser reemplazadas a los 7 años de operación por baterías nuevas de tal forma que se

cumpla con la vida útil de 14 años para autobuses. Además, el peso que tienen las baterías limita la carga de pasajeros o carga útil y desgasta con mayor rapidez las llantas, generando un incremento en los costos operativos comparados. Sin embargo, las tecnologías de celdas de hidrógeno son todavía costosas debido a que no han sido industrializadas por el momento, por lo que, aunque el "Opex" o costo de operación de los vehículos de hidrógeno es menor, el "Capex" o costo de inversión inicial es mucho mayor.

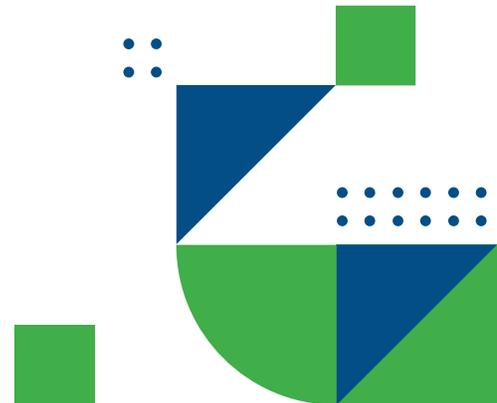
Las tecnologías de hidrógeno para vehículos pesados como trenes, camiones y buses han venido mejorando continuamente y se espera que los costos bajen mucho más en los próximos años.

Figura 6

Diagrama de un bus de hidrógeno



Nota: Autobús de motor eléctrico equipado con celdas de hidrógeno. Se puede apreciar que los tanques de hidrógeno se colocan en el techo. Esta tecnología reduce considerablemente el peso muerto ya que la energía está almacenada en forma gaseosa y no en pesadas baterías de litio.



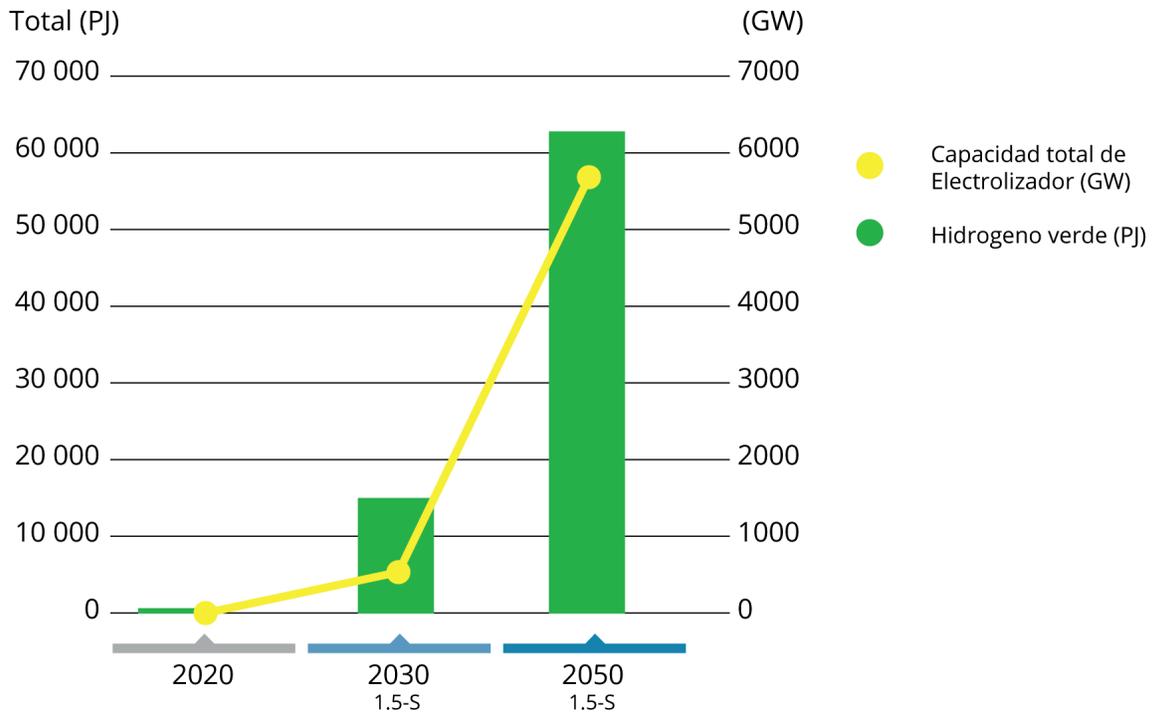
Estimación de crecimiento de H2V en el mundo

La tendencia mundial es muy clara, en su último reporte del 2023, IRENA (World Energy Transition Outlook) muestra la urgencia mundial por mitigar y adaptar el planeta a la emergencia climática y

sus estimaciones en cuanto al crecimiento del uso del hidrógeno a nivel mundial, donde se expone un crecimiento exponencial de tecnologías de hidrógeno para lograr la meta de 1,5 grados Celsius.

Figura 7

Proyección a futuro de hidrógeno verde mundial



Notas: 1,5-S = 1,5 Grados Celsius (Escenario)
GW=gigawatt PJ= petajoule

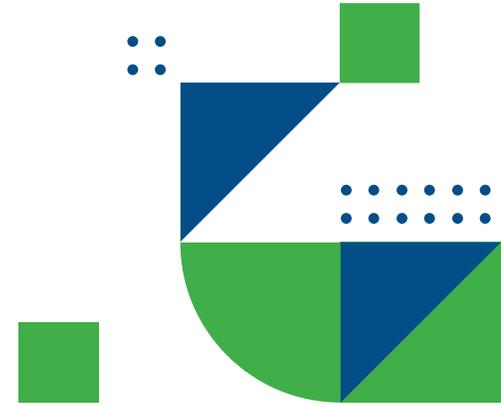
Tomado de: IRENA (2023).

Nota: Estimación del hidrógeno verde requerido en el año 2030 y 2050 para cumplir con la meta de no superar 1.5 grados Celsius.

La estimación de crecimiento mundial de hidrógeno pasará a 15.000 PJ (10^{15} Joules) o 125 millones de toneladas/año de hidrógeno a nivel mundial para el 2030 a 63.000 PJ (10^{15} Joules) o 523 millones de toneladas de H₂ para el 2050.

Este simple hecho pone al planeta entero en una verdadera encrucijada, donde se deberán cambiar las tecnologías actuales basadas en hidrocarburos a tecnologías de cero emisiones. El impacto en minería será abrumador, ya que la infraestructura existente deberá ser modificada para cumplir las nuevas exigencias y la cantidad de empleos y operaciones económicas generará una nueva revolución que va a requerir recurso humano especializado (especialistas técnicos e ingenieros).

Costa Rica inició con la ventaja en el 2011, gracias al proyecto Ad Astra Rocket Company-Recope una alianza público-privada para mostrar el camino de las tecnologías de generación, almacenamiento y dispensación de hidrógeno verde, pero lamentablemente esa ventaja se ha ido disipando debido a que se perdió el apoyo del sector público por opiniones legales del alcance de la gestión de RECOPE.



Plan nacional de descarbonización

En la búsqueda de la actualización del VII Plan Nacional de Energía (PNE 2015-2030), se genera una actualización en el 2022 incluyendo una serie de documentos nuevos de interés nacional. Entre los documentos más relevantes que podemos citar para conocer la actualidad del país en cuanto al sector energía, están los siguientes:

- a) Proceso de adhesión a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)

Desde el año 2015, existe una Hoja de Ruta de Adhesión para Costa Rica, gracias al Consejo de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Este Consejo, integrado por 35 países miembros, fue el encargado de aprobar dicha hoja de ruta, así como de realizar una evaluación exhaustiva del marco institucional y normativo ambiental costarricense, así como de las políticas y directrices que lo acompañan. De esta manera logró concluir que el país se encuentra alineado con los estándares de la organización en dicha materia.

- b) Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050

Pretende fomentar una economía verde y más moderna, mediante una implementación de paquetes de políticas en tres periodos: inicio (2018-2022), inflexión (2023-2030) y despliegue masivo (2031-2050). Los sectores para impactar son los siguientes:

1. Sistema de movilidad con transporte público seguro, eficiente y renovable con movilidad activa.

2. Transformación a flota de vehículos ligeros a cero emisiones

3. Transporte de carga con modalidades, tecnologías y fuentes de energía cero emisiones o las más bajas posibles.

4. Sistema eléctrico nacional flexible, inteligente, y resiliente con energía renovable a costo competitivo.

5. Nuevas edificaciones (comercial, residencial, institucional) bajo alta eficiencia energética de bajas emisiones.

6. Sector industrial adaptado a usar fuentes renovables de energía.

7. Gestión integrada de residuos cumpliendo con todo lo anterior.

- c) Plan nacional de desarrollo y de inversión pública (PNDIP) 2019-2022 y sus nuevas versiones.

Su objetivo es producir un modelo de crecimiento económico cumpliendo con el ambiente, empleos de calidad y reduciendo la desigualdad y la pobreza. Bajo este marco se establecieron cinco indicadores de metas nacionales, dentro de las cuales la meta de “Descarbonización de la Economía” incluye el tema energético. Es necesario que se actualice este plan para cubrir la nueva fase denominada INFLEXIÓN que nos llevará del 2023 al 2030.

Para la actualización del VII PNE, se consideró importante analizar las siguientes intervenciones estratégicas del PNDIP:

1. Energías renovables y su uso racional.
 2. Descarbonización del transporte.
 3. Programa de medidores inteligentes.
 4. Mejoramiento y ampliación de la infraestructura de RECOPE, para asegurar el abastecimiento nacional de combustibles y asfaltos de manera confiable.
- d) Ley de incentivos y promoción para el transporte público, Ley N° 9518 y sus reglamentos vigentes
- e) Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030 (PNTE)

Este plan busca la transformación tecnológica de la flota nacional de vehículos en sus diferentes formas, tales como automóviles, autobuses, taxis, trenes, transporte de carga, motocicletas y bicicletas. Así como la mejora en la eficiencia de los medios de transporte para disminuir los gases de efecto invernadero.

Es interesante encontrar en estos documentos, una clara contradicción del plan a la hora de valorar el camino a seguir con RECOPE. Mejorar y ampliar la infraestructura pareciera dictar un seguimiento al uso de hidrocarburos. Es pertinente valorar este concepto para entender mejor cuál es la tendencia mundial en tecnologías de pavimentos modernos y asegurarse que no se realizan más inversiones que serán obsoletas en un mediano plazo.

En el conversatorio “Diálogo sobre Combustibles Fósiles” auspiciado por la Alianza Empresarial para el Desarrollo (AED) y el periódico *La República* el 1 de noviembre de 2023, cuatro panelistas expresaron opiniones divididas sobre la exploración de gas natural en Costa Rica. En el conversatorio

moderado por Eduardo Ulibarri, se destacó que la era de los combustibles fósiles está llegando a su fin, enfatizando la necesidad de adoptar nuevas tecnologías para cumplir con el Acuerdo de París.

Como indicó el licenciado Alejandro Muñoz, “Uno de los mayores activos que tiene RECOPE es la concesión del oleoducto que recorre cientos de kilómetros ligando centros de distribución de mucha importancia estratégica” Por lo tanto, sería razonable valorar, no un mejoramiento y ampliación sino más bien una transformación de los objetivos de RECOPE, para apoyar la mitigación y adaptación del cambio climático en respuesta a las tendencias mundiales ante la emergencia climática, donde el hidrógeno será un vector muy importante para lograr la transición a una economía libre de hidrocarburos.

Tal vez uno de los documentos más importante por mencionar en esta evaluación preliminar del estado de la cuestión, es el documento denominado Contribución nacional determinada (CND o NDC por sus siglas en inglés). En este, Costa Rica como país, se compromete a cumplir con objetivos muy bien definidos. Este compromiso obedece a la entrada de Costa Rica en el Tratado de París firmado en el 2015.

A la hora de proponer un camino a seguir para cumplir todo lo prometido en las promesas de Costa Rica ante la comunidad internacional resalta claramente la matriz energética nacional, siendo el mayor reto el sector transporte. Del total de energía usada por Costa Rica, el sector de hidrocarburos representa entre el 64% y 65% de la energía (Minae; *La República*).

Todo lo anterior quiere decir que se deberá transformar la actual tecnología de hidrocarburos a tecnologías de cero emisiones en los próximos 27 años, construyendo una nueva red energética para el sector transporte que cumpla con los compromisos acordados en el Acuerdo de París.

Aunque esto suena difícil, países como Alemania han generado políticas de energía renovable que aportan beneficios a hogares por colocar sistemas solares en sus techos. Esto ha motivado una rápida expansión del aporte privado, saliendo beneficiado todo el país, especialmente porque Alemania decidió cerrar todas sus plantas nucleares.

Actualmente, los compromisos adquiridos por el país no concuerdan con las políticas reales implementadas por las distintas instituciones y no se encontró evidencia de incentivos económicos reales para generar un verdadero cambio en el statu quo y promover la implementación inmediata de proyectos de hidrógeno verde.

Todos los documentos investigados hasta el momento establecen directrices y propuestas a seguir, pero sin acciones económicas reales que demuestren proyectos en ejecución a corto o mediano plazo. En otras palabras, no se está invirtiendo dinero.

En el documento oficial de la Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde en Costa Rica, con fecha de septiembre 2022, se encuentra evidencia del esfuerzo estratégico, donde se establece un plan a corto plazo y se asignan responsabilidades muy claras que se aprecian en la página 83 de dicho documento. Se rescata que estas acciones están muy bien definidas y se espera que sean ejecutadas en los próximos dos años posteriores a la publicación de la Estrategia. Por lo tanto, es de esperar que, si estas acciones se cumplen, se desarrolle todo un conjunto de proyectos reales implementando equipos de producción, almacenamiento y distribución, tanto públicos como privados. Definitivamente RECOPE y el ICE serán entidades claves para el éxito de proyectos de movilidad en alianza con otras instituciones como el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) e INCOFER.



Fondo verde para el clima de las Naciones Unidas

El Fondo Verde para el Clima de las Naciones Unidas (GCF por sus siglas en inglés), cuenta con fondos para apoyar proyectos que mitiguen y adapten a los países miembros a la emergencia climática, con un portafolio de 48 mil millones de dólares (Green Climate Fund, 2023). Es imperativo que Costa Rica aproveche esta facilidad financiera, donde proyectos como los propuestos por el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) en su plan de modernización como el tren eléctrico de carga, puedan ser operados por tecnología de hidrógeno verde, evitando la electrificación de la línea al utilizar motores eléctricos asistidos por celdas de hidrógeno verde, siguiendo el ejemplo de Alemania, que está cambiando su red de trenes de diésel a hidrógeno.

El Fondo Verde para el Clima (GCF), tiene como una de sus directrices principales la de apoyar con fondos no reembolsables la implementación de nuevas tecnologías, cubriendo la diferencia del costo en la tarifa final a los usuarios, esto significa que, es posible continuar con el presupuesto asignado, pero implementando una tecnología más costosa donde la diferencia de costo la cubre dinero de incentivo del Fondo Verde para el Clima.

Durante la investigación realizada para este estudio, no se ha encontrado evidencia de que Costa Rica haya aplicado a esta facilidad financiera internacional, por lo que es posible que la mejor forma de iniciar con proyectos de impacto real sea apoyándose en el Fondo Verde para el Clima (GCF). La alianzas público-privadas donde se le da prioridad a temas como la equidad y la igualdad con un énfasis de mitigar y adaptar los proyectos ante la emergencia climática

y que beneficien a muchos usuarios y en especial donde exista un cambio de paradigma, son muy bien recibidas por el Fondo Verde. (Green Climate Fund, 2023)

Desde el año 2006, cuando se presentó el documental "An Inconvenient Truth" (Una Verdad Incómoda) se generó todo un drama internacional donde algunos grupos organizados promovieron la falsa sensación de que el calentamiento global no era una realidad; hoy en día, la evidencia es contundente, desde los múltiples incendios forestales, las olas de calor llegando a 46 grados Celsius, la pérdida dramática de volumen de los glaciares, el aumento constante del nivel de los océanos, la pérdida del 70% de la biodiversidad (World Wildlife Fund, 2023), las sequías y desabastecimiento de agua potable y las inundaciones de gran intensidad están marcando fuertemente una tendencia imparable que ya ha dejado miles de muertes solo en el año 2023.

No podemos procrastinar más la descarbonización.

Según el Plan Nacional de Descarbonización, está iniciando el periodo llamado Inflexión (2023-2030) y al evaluar todo lo expresado anteriormente, resaltan cuatro documentos principales que se proponen como los más importantes a utilizar en la implementación de una hoja de ruta a seguir para apoyar este periodo de inflexión; estos son:

1. Contribución nacional determinada.
2. "Trilemma score" Costa Rica.
3. Estrategia nacional de hidrógeno verde.

4. Fondo verde para el clima repuesta de Naciones Unidas ante la emergencia

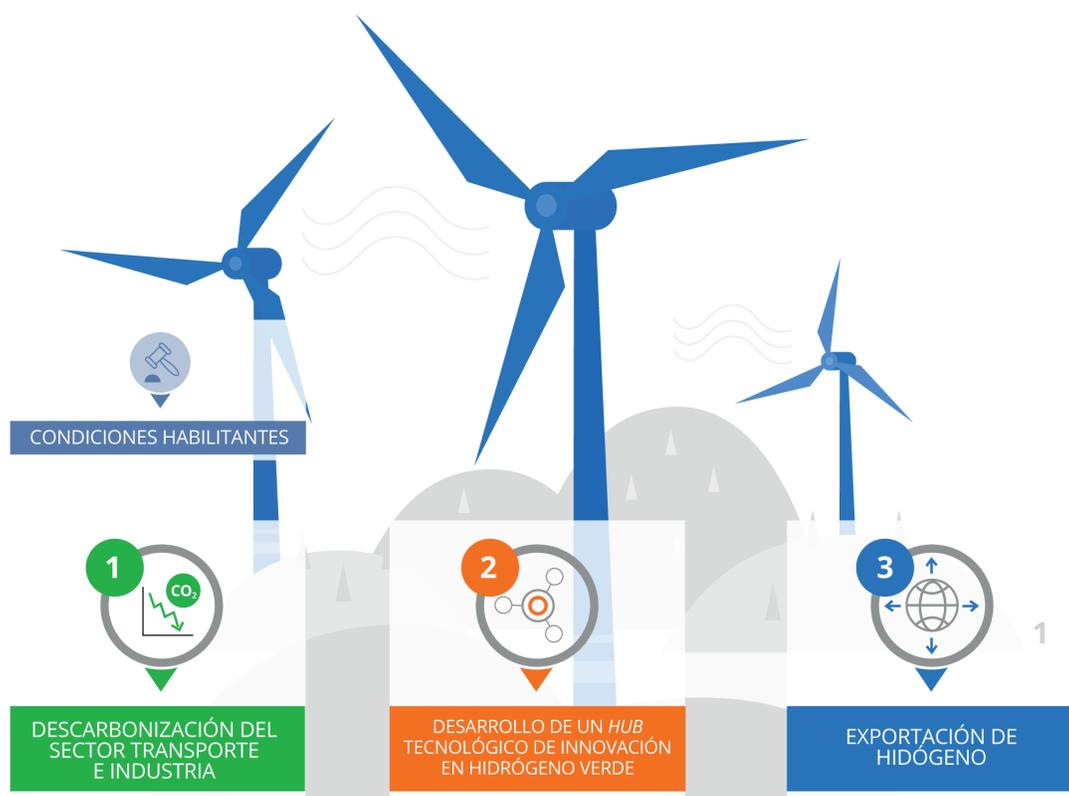
Se evaluarán estos y otros documentos con más detenimiento para llegar a una recomendación que permita apoyar la implementación real de proyectos de hidrógeno verde que realmente afecten la matriz energética no renovable.

Durante la primera sesión del ciclo de *webinars*, realizado el 5 de octubre de 2023, organizado por H2LAC (Plataforma para el desarrollo del Hidrógeno verde en América Latina y el Caribe) y las Naciones Unidas, la licenciada Carolina Flores de la Dirección

de Energía del Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE), presentó el tema “Estrategia del Hidrógeno Verde de Costa Rica” donde se mostró el panorama general para el establecimiento de una hoja de ruta. Los tres ejes mostrados fueron: 1. Descarbonización del Sector Transporte, 2. Creación de un Hub en H2V y 3. Exportación de H2V.

Figura 8

Los tres ejes de la Estrategia Nacional de H2V



Fuente: *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica (Minae).*

Estos ejes, pueden servir como base para ir guiando al país en una primera versión de hoja de ruta que nos permita avanzar y no detenernos en una parálisis por tanto análisis.

Propuesta de Hoja de Ruta

A continuación, se proponen los siguientes puntos para una hoja de ruta, esto considerando que se tienen recursos adecuados y sobre todo la real intención de implementar el plan, a saber:

1. Generar políticas y regulaciones adecuadas, mediante una ley muy bien estudiada, que permita tener un ambiente con estándares de seguridad y calidad para la producción y almacenamiento del H2V, bajo un marco legal universal y equitativo. En varios países como Alemania y Japón hay avances en este tema, por lo que se podrá usar de referencia para una versión ajustada a nuestra realidad.
2. Promover la inversión en infraestructura con la atracción de inversiones privadas de electrólisis, compresores y dispensadores. El gobierno debe abrir oportunidades muy claras que le permita a inversionistas abrir el mercado y romper el dilema del “huevo o la gallina”. Buscar apoyo de fondos verdes como el Fondo Verde para el Clima para apoyar la infraestructura de arranque. Establecer una tarifa privilegiada por un periodo de tiempo limitado para que los inversionistas puedan generar planes a corto y mediano plazo.
3. Desarrollar una cadena de suministros dedicados como solar y eólico que no afecten la red nacional de energía.
4. Realmente promover la investigación, el desarrollo y la innovación (I + D + I), tanto en la academia, como en la empresa privada,
5. la cual genere propiedad intelectual para la generación y el almacenamiento de H2V.
6. Crear incentivos fiscales para la adquisición de equipos de H2V como vehículos de carga, autobuses, trenes, generadores, calderas y demás equipos de uso intensivo para la conversión de tecnologías.
7. Educación y preparación de técnicos, profesionales y público en general sobre el beneficio del H2V como vector importante entre las herramientas de la descarbonización.
8. Fomentar alianzas internacionales para la exportación de H2V y al mismo tiempo intercambiar conocimiento de los avances generados por las partes involucradas en las alianzas. Es vital preparar al país en la exportación de H2V o sus productos derivados como el amoniaco o gases de síntesis enriquecidos para combustibles de transición de baja huella de carbono.
9. Medición de desempeño. Como el título lo indica, se deberá mantener un monitoreo del progreso de todas las etapas de la hoja de ruta de tal manera que se pueda ajustar cualquier estrategia que confirme la descarbonización en tiempo y forma. Este punto es clave, la constante medición es muy importante para ajustarse a la realidad cambiante de la emergencia climática.

Todos los puntos propuestos anteriormente, cumplen con lo previsto en los tres ejes

que establece la Estrategia Nacional del Hidrógeno de Costa Rica, sin embargo, el elemento clave es generar la ley del hidrógeno verde que permita al país transitar de forma segura hacia la implementación de una economía del hidrógeno.

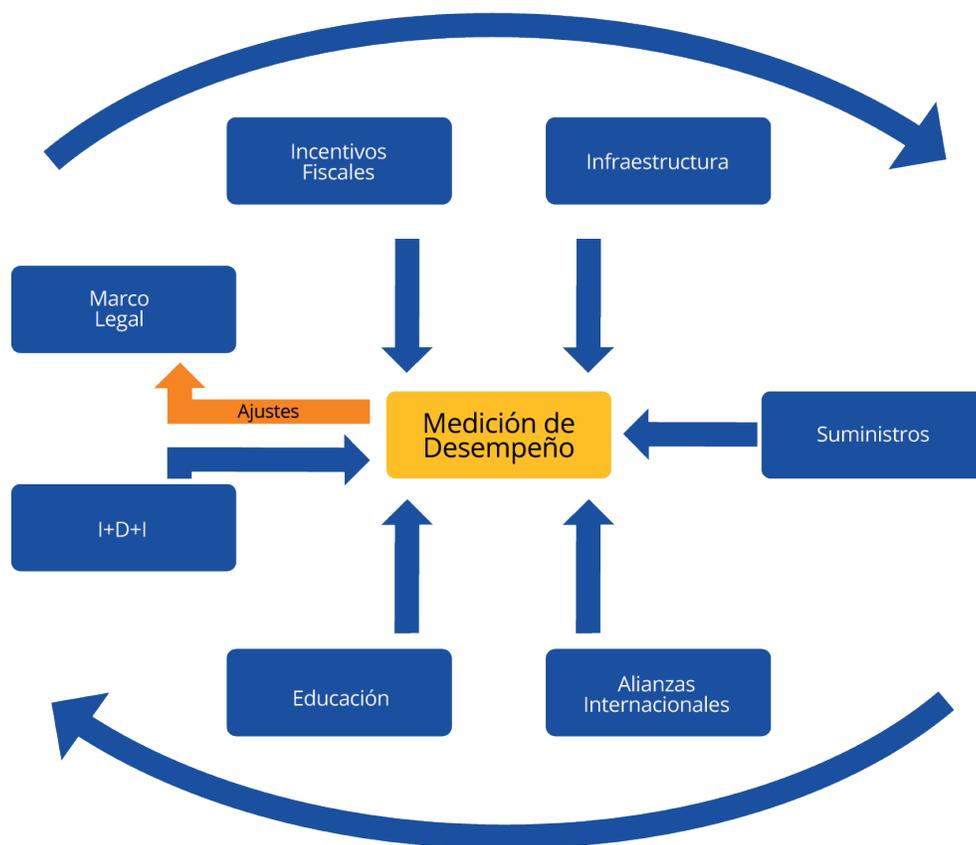
La primera etapa de la hoja de ruta ya está avanzada, con apoyo del MINAE, Inteco y verde también está avanzado, pero se requiere una revisión de la propuesta de ley presentada a la Asamblea de Costa Rica en los últimos meses. Es posible que esta propuesta de ley requiera una fuerte gestión

por parte de las partes interesadas para que pueda avanzar.

Dentro de la ley, deberá evaluarse la posibilidad de que Costa Rica tenga yacimientos de hidrógeno blanco (hidrógeno geológico), algo que ha sido poco estudiado a nivel mundial. Se deberá estudiar si se deja abierto o no dentro de la ley, la posibilidad de explotar yacimientos naturales de hidrógeno blanco como un recurso natural, por lo que la ley deberá incluir ajustes cada cuatro años para asegurar la adaptación a la realidad del momento.

Figura 9

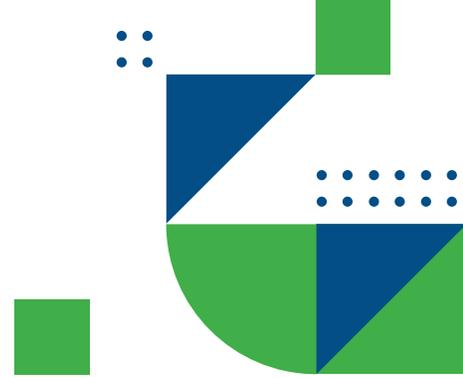
Concepto de hoja de ruta



Nota: Diagrama dinámico de la hoja de ruta propuesta. La continua medición en el tiempo deberá generar ajustes al marco legal que deberá ser dinámico para ajustarse a la emergencia climática, algo que no ha sido valorado en el pasado gracias a un clima estable. Las modificaciones al marco legal podrán hacerse cada cuatro años.

La instalación de un *hub* será clave para un buen plan de acción, pero deberá tomar en cuenta lo que están haciendo otros países de Centroamérica y el Caribe. La entrada en vigor de la estrategia de hidrógeno verde en Panamá deberá ser estudiada adecuadamente para buscar alianzas y sinergias que puedan beneficiar a ambos países. La operación del Canal de Panamá podría dar una oportunidad a Costa Rica de apoyar una posible fuerte demanda de H₂V, especialmente por efectos de la emergencia climática. También se debe tomar en cuenta que Panamá está pasando por un momento crítico debido a la emergencia climática, donde el canal está limitado por el déficit de agua; podría ser razonable pensar que Costa Rica pueda emprender la construcción de un canal seco que complemente el servicio con el Canal de Panamá, donde las oportunidades de una demanda de H₂V se multipliquen.

Todos los países del mundo deberán ajustar su matriz energética para alejarse lo más pronto posible del uso de hidrocarburos y la realidad es que pocos países podrán reaccionar a la velocidad que se necesita, y Costa Rica cuenta con las credenciales necesarias para liderar la transformación energética a nivel de Centroamérica y el Caribe.



Liderazgo de Costa Rica en H2V en Latinoamérica

En el año 2011, este investigador, como director ejecutivo de Ad Astra Rocket Company Costa Rica, tuvo la oportunidad de negociar la instalación de la primera operación de H2V en América Latina, gracias a la participación de la Junta Directiva de la Refinadora Costarricense de Petróleo de Costa Rica (RECOPE) con el apoyo de su presidente, el Ing. Jorge Villalobos. y el ministro del MINAE, Dr. René Castro.

Para esos años, el plan piloto se estimó en una operación demostrativa de 2 kg por día de H2V. Los costos estimados de una hidrogenadora de 500 kg por día se estimaron en más de 6 millones de dólares. Para finales del 2020, el costo estimado había bajado a unos 5 millones. Durante la entrevista realizada a Francisco Magallanes de la empresa CaetanoBus en Portugal, realizada en mayo del 2023, los costos de la instalación de una hidrogenadora de 500 kg por día se estiman en 3 millones de euros si se ubica en España, lo cual podría traducirse en unos 4 millones de dólares si se construye en Costa Rica. Esto demuestra la rápida caída de costos que está llevando la industria del hidrógeno verde, lo cual implicaría que ya es relativamente viable la instalación de una hidrogenadora en el Valle Central. Es posible valorar que una hidrogenadora de 500 kg/día podría abrir el uso de vehículos de carga como cabezales, camiones de suministro y de reparto, así como el uso del H2V como combustible para generadores de emergencia, en lugar del gas licuado de petróleo.

Para cumplir con el punto número 2 de la Hoja de Ruta propuesta, se deberá escoger una primera inversión en infraestructura. Es ideal empezar por

impactar el área de mayor reducción de carbono, esto es el sector transporte. Se recomienda iniciar por la instalación de una primera planta de 500 kg/día de H2V, paralelamente se deberá contemplar la entrada en operación de equipos que puedan utilizar los 500 kg por día.

Iniciar con un proyecto de transporte público daría un muy buen comienzo a la industria del hidrógeno en Costa Rica, un autobús de hidrógeno requiere 37,5 kg de H2 para llenar su tanque a 350 bares de presión (CaetanoBus). Esta cantidad de H2V le da al autobús una autonomía de 667 km, esto implica que se puede estimar unos 25 autobuses haciendo un recorrido diario de 300 km por día.

Beneficios para Costa Rica con la producción de H2V

Un proyecto combinado de 25 autobuses con una hidrogenera podría ascender a unos 22 millones de dólares. Una suma aún muy elevada para que sea cubierta por una operación privada. La tecnología de hidrógeno está en desarrollo y es muy posible que siga el camino que siguió la industria de energía solar y que está siguiendo la tecnología de baterías, industrializando la producción donde los precios bajan sustancialmente.

Para no esperar a que la tecnología madure, Costa Rica puede valorar la implementación de un proyecto piloto, cumpliendo con los requisitos de equidad y de igualdad que exige el Fondo Verde para el Clima (GCF). El GCF puede apoyar dos proyectos claves, el tren eléctrico y una ruta de 25 autobuses, en ambos casos, cada proyecto traerá beneficio social y por lo tanto el GCF podrá asignar fondos no reembolsables, de tal manera que la tarifa al público mantenga el costo actual, esto daría números rentables aceptables. La implementación de tecnologías avanzadas novedosas son parte de los lineamientos del GCF, siempre y cuando el beneficio social sea muy bien definido.

En el caso del tren eléctrico, el beneficio social es muy fácil de demostrar, debido a la participación del INCOFER, para el caso de la línea de autobuses, el tema es un poco más complicado, ya que si se establece el proyecto con la participación de una empresa privada para los 25 vehículos, el GCF podría oponerse a apoyar a un solo inversionista. El modelo que podría seguir el proyecto es la implementación de una cooperativa tipo Coopesa (Coopesa, 2023), donde los propietarios sean múltiples y que se

cumpla con una cuota adecuada de equidad de género.

La implementación de estos proyectos deberá ser con energía renovable, sin embargo, es poco probable que el Instituto Costarricense de Electricidad pueda aportar la energía necesaria sin afectar la demanda nacional. Es imperativo que el Gobierno permita la incorporación de un muy buen ambiente de la cadena de suministros, para que los inversionistas privados puedan crear proyectos que generen la energía que supla a estos modelos de movilidad. Garantizar la seguridad jurídica a los inversionistas privados es vital por lo que el ICE deberá incorporar en sus tarifas un plan de mediano plazo para la implementación de proyectos de energía asociada a la movilidad eléctrica; este plan deberá ser de al menos 15 años.

Esto es especialmente importante al observar el plan de expansión del ICE 2020-2040 (ICE, ; ver figura 9), donde se aprecia que el plan de expansión no pareciera tomar en cuenta **la rápida transición que se espera del** sector transporte ni la aceleración de los efectos climáticos, lo cual podría duplicar el requerimiento de energía eléctrica al año 2040, y sin duda serán dos de los mayores elementos de estrés a la red nacional.

El hidrógeno podrá funcionar como una herramienta de almacenamiento de energía que podría apoyar la red en momentos de sobrantes de energía y apoyar la red cuando se necesite.

El hecho de que no se esté tomando en cuenta el sector transporte en el plan de expansión del ICE

podría indicar que no se ha realizado una evaluación conjunta y por lo tanto este hecho debe confirmarse y corregirse.

La ley correspondiente deberá ser modificada, tanto en el futuro de expansión, así como la parte de la generación distribuida.

Una de las ramas del sector transporte que está realizando cambios importantes a nivel mundial es el combustible usado por la aviación. El 25 de abril del 2023, la Unión Europea anunció que la aviación en Europa deberá reducir en dos tercios las emisiones de CO2 para el 2050 (Comisión Europea, 2023). Este nuevo mandato obligará a la industria a la generación de sintegás (Syngas en inglés) rico en hidrógeno para modelos de amoníaco y metanol, las tecnologías buscarán la eliminación de emisiones de carbono para cumplir con las nuevas regulaciones europeas.

Costa Rica deberá adelantarse a este nuevo paradigma y podrá incorporar empresas como Coopesa, que ha mostrado gran habilidad en los últimos 60 años para operar alta tecnología de la industria de la aviación. El gerente Rimsky Buitrago, durante una visita realizada el martes 3 de octubre del 2023 a las instalaciones de Coopesa en el

Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, mostró gran interés por valorar nuevas tecnologías de hidrógeno verde y poder preparar con anticipación al equipo humano de Coopesa.

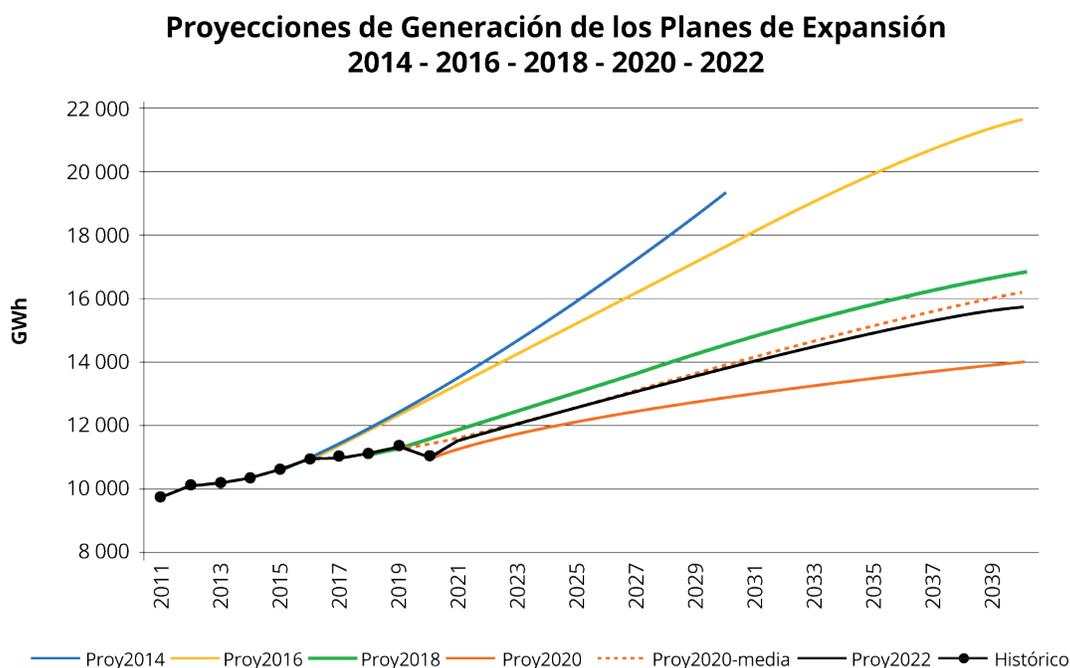
Todo lo anterior va a requerir una gran cantidad de energía de fuentes renovables y, por lo tanto, las alternativas de expansión deberán incluir energía mareomotriz, corrientes marinas, baterías mecánicas, un mayor uso de proyectos geotérmicos, entre otras tecnologías.

La biomasa, otra posible fuente de energía, tendrá un papel muy delicado en este juego de ajedrez tan complejo, ya que de ninguna manera deberá competir la energía del país con las fuentes de alimento para la población. El cambio climático está generando periodos de tiempo con temperaturas extremas en varias zonas del planeta donde existen grandes extensiones de producción agrícola, dicha producción está sufriendo perdidas por el colapso de las plantas, ya sea por el calor o el exceso de agua. Es posible que la energía almacenada en los residuos de la piña y el banano deban ser aprovechados como fuentes de nutrientes en un futuro donde la agricultura estará muy comprometida por la agresividad climática.



Figura 10

Curvas del plan de expansión del ICE



Tomado de Plan de Expansión del ICE 2020-2040. La línea negra muestra el crecimiento histórico y su extrapolación al 2040. La extrapolación no pareciera mostrar un efecto del sector transporte.

El marco legal para la implementación de toda esta estrategia deberá ser modificable, algo nunca visto en la legislación nacional. La emergencia climática está mostrando efectos cambiantes que obligarán al monitoreo constante, esto implica que la legislación nacional deberá ajustarse para adaptarse al cambio.

“La inteligencia es la habilidad de adaptarse al cambio” Stephen Hawking.

Al igual que muchos países del mundo, la emergencia climática está causando una división clara entre los distintos actores de la sociedad. Algunos piensan que la emergencia climática no es una realidad, otros están indefinidos con dudas hacia un lado u otro y finalmente, la mayoría, saben que el ser humano está en un umbral de cambio muy peligroso. El mayor problema es la educación, la mayor parte de

la gente desea recibir la información procesada y sin mucha explicación técnica, pero, hoy en día, hay muchas fuentes de información con datos falsos o mal interpretados. Es obligación de la comunidad científica, como ingenieros, físicos, químicos, biólogos, etcétera, primero ponerse de acuerdo y segundo informar a la población. Se debe tener una clara comprensión del problema y las posibles soluciones.

Debemos reproducir el éxito del protocolo de Montreal de 1989, pero para hacerlo, todos debemos estar convencidos de que no se debe promover los combustibles fósiles y se debe detener la emisión de carbono al aire, por lo que el punto número 6 (Educación) de la hoja de ruta propuesta es tal vez uno de los más importantes de implementar. El problema más grave es que el tiempo apremia, la

emergencia climática suma cada vez más pérdidas humanas, esto sin mencionar la biodiversidad y que, los fenómenos climáticos agresivos serán más comunes cada año.

Se propone en la Hoja de Ruta incorporar la investigación y desarrollo como unos de los ejes más importantes de una sociedad exitosa. En este punto, la legislación deberá premiar el I+D+i con incentivos fiscales adecuados de tal manera que la empresa privada entre fuertemente a invertir. La unión de los tres jugadores, el Gobierno, la academia y la empresa privada en la inversión en I+D+i es fundamental para la creación de propiedad intelectual. La generación de conocimiento que promueva patentes es poco usual en Costa Rica, realidad que debe cambiarse contundentemente hacia una economía altamente creativa. La educación primaria, secundaria y universitaria deberá promover el hecho de formar emprendedores y premiar el esfuerzo por el registro de patentes.

Aunque muy abundante, el hidrógeno es rara vez encontrado en forma libre en la Tierra, pero sí existen yacimientos naturales y se le conoce con el nombre de hidrógeno geológico o hidrógeno blanco. Recientemente se descubrió un posible yacimiento de hidrógeno geológico en Francia, el cual podría convertirse en una gran fuente de energía limpia para Europa (NRS NEWS, 2023). Sin embargo, el hidrógeno geológico es poco común y no hay suficiente investigación para confirmar más yacimientos por lo que por el momento, la humanidad deberá optar por el hidrógeno verde o H₂V.

El hidrógeno verde es producido por un proceso llamado electrólisis, el cual requiere que el agua pura sea expuesta a un voltaje que separe la molécula de agua en sus dos componentes, el oxígeno y el hidrógeno. La aplicación de este voltaje puede venir de cualquier fuente de energía, pero solo aquella energía que venga de fuentes renovables será considerada verde.

Hidrógeno Blanco

Figura 11

Hidrógeno Blanco



Tomado de : Colegio Oficial de Geólogos de España.

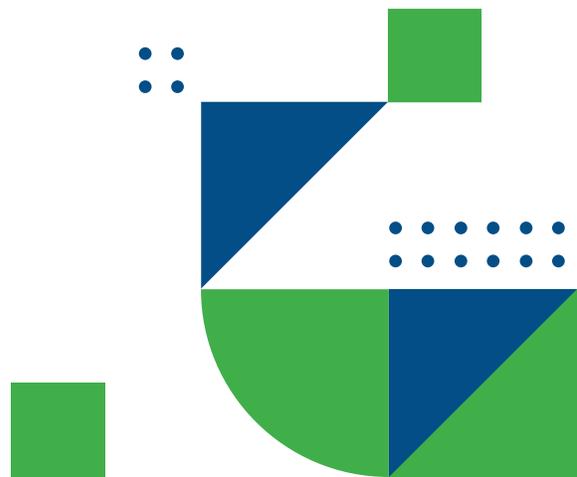
Nota: Afloración de gases geológicos como el metano y el hidrógeno. Pueden oxidarse generando llamas.

Costa Rica se ha diferenciado a nivel mundial por lograr mantener una matriz energética de un 99% generado a base de fuentes renovables. La matriz se ve compuesta por generación por medio de recursos renovables como: hídrico, geotérmico, eólico, solar y biomásico, junto a una parte mínima de generación térmica, que funciona como un seguro energético instalado. (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015). Estas fuentes renovables, con excepción de la geotermia, son todas dependientes del clima. Por ejemplo, la hidroeléctrica es estacional: en la

época seca los caudales de los ríos se reducen bajo el promedio y con la llegada de la lluviosa sucede lo contrario. El viento es también estacional: en los meses secos aumenta su velocidad y su producción, y en los húmedos se reduce. Las cosechas de la biomasa dependen también del clima. Además, como un elemento limitante, la energía solar es variable y solo produce la mitad del día.

Costa Rica opera con casi el 99% de su matriz energética proveniente de fuentes renovables, lo que atrae a la industria de generación de hidrógeno

verde (H2V) internacional, lo cual podría traducirse en un gran negocio para la economía del país en un mediano plazo. Aunque el país ha mantenido estas cifras, el impacto climático sugiere la necesidad de reevaluar los modelos de consumo. La producción de H2V para el mercado nacional e internacional aumentará considerablemente el consumo eléctrico, requiriendo una mayor infraestructura renovable. Sin embargo, la transición hacia una economía del hidrógeno enfrenta desafíos, como inversiones iniciales significativas, almacenamiento complicado y la necesidad de capacitación constante para garantizar el éxito.



Conclusiones y recomendaciones

Implementación rápida del hidrógeno verde:

- Costa Rica tiene condiciones ideales para implementar el hidrógeno verde rápidamente debido a su matriz energética y recursos humanos.
- Enfocarse en el transporte público, como trenes y autobuses, puede ser la mejor estrategia inicial con el apoyo de fondos no reembolsables que cubran el diferencial tecnológico.

Acciones gubernamentales:

- El sector público debe pasar de la estrategia a la implementación de proyectos reales para ganar experiencia.
- El Poder Ejecutivo y Legislativo deben mantenerse actualizados con avances científicos y tecnológicos.

Emergencia climática y acciones inmediatas:

- Costa Rica debe actuar de inmediato para independizarse de los hidrocarburos y controlar eficientemente la energía.
- Confirmar y monitorear el recurso hídrico de tal manera que sea suficiente para abastecer todas las necesidades sin alterar el ya muy afectado equilibrio de la biodiversidad remanente.

Marco legal y regulatorio:

- La Asamblea Legislativa debe crear una ley de hidrógeno verde bien concebida para integrar sector privado, académico y público.
- Seguimiento a la estrategia nacional del hidrógeno y cumplir con los objetivos propuestos.

Liderazgo y preparación:

- El MINAE debe liderar la implementación de la hoja de ruta.
- El INA debe prepararse y adaptar sus programas para nuevos modelos de negocios en tecnologías de hidrógeno verde.

Colaboraciones e investigaciones:

- Colaboración del MICITT y de RECOPE para investigar tecnologías de almacenamiento.
- Colaboración del CTP y de la ARESEP para estrategias en el cambio tecnológico de autobuses.
- Incorporar al sistema financiero creando vehículos novedosos.

Inversiones y financiamiento:

- Buscar modelos financieros con fondos internacionales y el sistema bancario.
- Incentivos fiscales para la adquisición de equipos de hidrógeno verde.

Educación y concientización:

- Incluir la industria del hidrógeno verde en programas académicos.
- Campañas de educación sobre los beneficios del hidrógeno verde.

Internacionalización, alianzas y métricas:

- Buscar alianzas internacionales para exportar hidrógeno verde.
- Establecer un sistema de medición de desempeño y realizar ajustes según sea necesario.

Diversificación energética:

- Diversificar la matriz energética con fuentes renovables, como la energía mareomotriz, solar privada de zonas urbanas e incrementar geotérmica.

Investigación continua:

- Promover la investigación en tecnologías de hidrógeno verde en instituciones académicas y empresas privadas.
- Evaluar y ajustar planes de expansión, considerando el sector de transporte y generación distribuida.

Exploración de recursos naturales:

- Investigar yacimientos naturales de hidrógeno blanco.
- Considerar proyectos piloto en el transporte público con enfoque en equidad de género.

Diversificación adicional:

- Evaluar el potencial de la biomasa como fuente de energía sin competir con fuentes alimenticias.

En resumen, Costa Rica debe seguir avanzando en la implementación de su Hoja de Ruta para la transición hacia una economía libre de hidrocarburos, con un enfoque en el hidrógeno verde como una solución prometedora para reducir las emisiones de carbono en el sector de transporte y en toda la matriz energética del país.

Es imperativo que Costa Rica ponga atención a lo que están haciendo otros países de Latinoamérica y no perder el liderazgo que la ha caracterizado en materia ambiental y de energía en la región.



Glosario

Amoníaco: Gas de olor muy desagradable sin color rico en hidrógeno y nitrógeno. Su uso es ideal para abonos, productos de limpieza y refrigeración.

Fusión nuclear: Proceso de unión de núcleos para formar elementos más pesados, transformando materia en energía.

Interferometría: Procedimiento de medición por medio de interferencia de ondas electromagnéticas o de sonido que son alteradas y por medio de la medición de la alteración se conocen propiedades de lo medido.

Geotermia: Energía calórica de la tierra.

Biomasa: Masa de origen biológico que usualmente se asocia a residuos.

Eólico: Asociado al viento.

Hidrolinera: Estación de dispensación de hidrógeno.

Hídrico: Relacionado al agua.

Hidrogenara: Estación de producción y dispensación de hidrógeno.

Metanol: Líquido sin color altamente tóxico que se usa como aditivo para combustibles, es un alcohol con la molécula más simple.

Electrólisis: Procedimiento para la separación de los elementos de un compuesto como el agua en sus componentes, oxígeno e hidrógeno mediante la aplicación de voltajes.

Ondas gravitacionales: Perturbaciones de la

gravidad causadas por explosiones de cuerpos cósmicos de gran energía que viajan por el espacio como ondas en el agua.

Silvicultura: Disciplina que trata el manejo de los bosques.

Referencias

- 2018-2022, L. A. (16 de septiembre de 2023). Consulta de las políticas de RECOPE en la administración 2018-2022. (R. Chang-Díaz, entrevistador)
- Alianza Empresarial para el Desarrollo. (01 de noviembre de 2023). *Diálogo sobre combustibles fósiles. Un vistazo al contexto mundial y de Costa Rica*. Obtenido de https://www.facebook.com/watch/live/?ref=watch_permalink&v=4321035624787339
- Asociación Costarricense de Energía Solar. (2023). *Regulación Nacional*. Obtenido de <http://www.acesolar.org/regulacion-nacional/>
- Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP). (2023). *Electricidad*. Obtenido de https://aresep.go.cr/electricidad/?option=com_content&view=article&id=1392&catid=85&Itemid=641
- BBC News Mundo. (Octubre de 2023). *BBC News Mundo*. La policía que amamantó a un bebé en Acapulco que llevaba más de dos días sin alimentarse tras el huracán Otis: Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/articulos/c3g3g44zp40o>
- BN Americas. (07 de marzo de 2023). *Atome fija cronograma para desarrollo de hidrógeno verde en Costa Rica*. Obtenido de <https://www.bnamericas.com/es/noticias/atome-fija-cronograma-para-desarrollo-de-hidrogeno-verde-en-costa-rica>
- Coopesa. (2023). *Página Principal*. Obtenido de <https://coopesa.com/>
- Energía Estratégica. (04 de noviembre de 2022). *Hidrógeno verde en Costa Rica como clave para el futuro de la producción de combustibles y fertilizantes*. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/hidrogeno-verde-en-costa-rica-como-clave-para-el-futuro-de-la-produccion-de-combustibles-y-fertilizantes/>
- European Commission . (26 de abril de 2023). *European Green Deal: new law agreed to cut aviation emissions by promoting sustainable aviation fuels*. Obtenido de https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_2389
- Gobierno de Chile. (Diciembre de 2022). *Plan de Acción Hidrógeno Verde*. Obtenido de <https://www.planhidrogenoverde.cl/>
- Gobierno de Colombia. (s.f.). Hoja de Ruta de Hidrógeno en Colombia. Colombia.
- Gobierno de Costa Rica. (2018). Plan de Descarbonización . San José, Costa Rica.
- Gobierno de Costa Rica. (Septiembre de 2022). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Costa Rica.
- Green Climate Fund. (2023). *Project Portfolio*. Obtenido de https://www.greenclimate.fund/projects?f%5B0%5D=field_subtype%3A326&page=2
- H2 Lac Org. (27 de julio de 2023). *Panamá aprueba en consejo de gabinete la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y derivados*. Obtenido de <https://h2lac.org/noticias/panama-aprueba-en-consejo-de-gabinete-la-estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde-y-derivados/>
- H2Lac Org. (2022). *H2Lac Plataforma para el desarrollo del hidrógeno verde en Latinoamérica y el Caribe: Colombia*. Obtenido de <https://h2lac.org/paises/colombia/>
- H2Lac Org. (2022). *H2Lac Plataforma para el desarrollo del hidrógeno verde en Latinoamérica y el Caribe: Costa Rica*. Obtenido de <https://h2lac.org/paises/costa-rica/#:~:text=A%20fines%20de%202022%2C%20Costa,3%20USD%2Fkg%20para%202030>

- H2Lac Org. (21 de febrero de 2023). *Atome y Cavendish crean la National Ammonia Corporation en Costa Rica para desarrollar amoniaco verde*. Obtenido de <https://h2lac.org/noticias/atome-y-cavendish-crean-la-national-ammonia-corporation-en-costa-rica-para-desarrollar-amoniaco-verde/>
- Heimann, S. G. (17 de septiembre de 2023). Experiencia de la empresa Cavendish en proyectos de hidrógeno. (R. Chang-Díaz, entrevistador)
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2015). Costa Rica. Matriz Eléctrica. Un modelo sostenible único en el mundo. San José, Costa Rica. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=l8SK4gG#:~:text=En%20efecto%2C%20Costa%20Rica%20exhibe,la%20geoterminia%2C%20dependen%
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*; Volume 1. Abu Dhabi .
- Madriz, A. (10 de noviembre de 2022). *Hidrógeno verde podría ser clave para producción de combustibles y fertilizantes, según Colegio de Químicos*. Obtenido de <https://www.larepublica.net/noticia/hidrogeno-verde-podria-ser-clave-para-produccion-de-combustibles-y-fertilizantes-segun-colegio-de-quimicos>
- McKinsey and Company. (Diciembre de 2020). *Chilean Hydrogen Pathway*. Santiago, Chile.
- Ministerio de Ambiente y Energía, Gobierno de Costa Rica. (06 de enero de 2022). *Política para el aprovechamiento de los recursos excedentes en el Sistema Eléctrico Nacional para el desarrollo de una economía de hidrógeno verde*. Obtenido de <https://energia.minae.go.cr/?p=9413>
- Ministerio de Ambiente y Energía, Gobierno de Costa Rica. (06 de julio de 2023). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica*. Obtenido de <https://energia.minae.go.cr/?p=7699>
- Ministerio de Ambiente y Energía, Gobierno de Costa Rica. (2023). <https://energia.minae.go.cr/?p=9413>. Obtenido de <https://energia.minae.go.cr/?p=9466>
- Ministerio de Ambiente y Energía, Gobierno de Costa Rica. Dirección de Cambio Climático. (2020). *Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente y Energía, Gobierno de Costa Rica. Secretaría Planificación Subsector Energía. (28 de febrero de 2020). *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030. Actualización del Plan Periódico 2019-2030 (Matriz de acciones y metas)*. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente, Panamá. (2023). El Ministerio de Ambiente lanza la "Hoja de Ruta" para el Desarrollo del Futuro Mercado Nacional de Carbono (MNC). Panamá.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (Noviembre de 2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Santiago de Chile, Chile.
- Ministerio de Hacienda. (Abril de 2023). *Informe Gráfico del Ingreso Total Abril del 2023 del Gobierno Central*. Obtenido de <https://www.hacienda.go.cr/docs/RecaudacionContabilidadAbril2023.pdf>
- Montero, D. Z., & García, R. R. (Octubre de 2016). *Matriz Energética de Costa Rica. Renovabilidad de las fuentes y reversibilidad de los usos de energía*. Costa Rica.
- Nanne, K. E. (14 de septiembre de 2023). Experiencia de CINDE con proyectos de Hidrógeno Verde. (R. Chang-Díaz, Entrevistador)
- Newsweek. (2018). *16 Inspirational Stephen Hawking Quotes About Life, the Universe and More*. Obtenido de <https://www.newsweek.com/stephen-hawking-quote-life-universe-aliens-dead-843692>
- NRS NEWS. (26 de julio de 2023). *A gigantic hydrogen deposit in northeast France?* Obtenido de <https://news.cnrs.fr/articles/a-gigantic-hydrogen-deposit-in-northeast-france#:~:text=Researchers%20have%20discovered%20a%20potential,largest%20reserve%20of%20this%20gas>
- Pizarro, J. C. (27 de febrero de 2020). *Energía Estratégica*. Obtenido de *Hacia dónde va el Gobierno de Costa Rica en materia de energías renovables y movilidad eléctrica*: <https://www.energiaestrategica.com/hacia-donde-va-el-gobierno-de-costa-rica-en-materia-de-energias-renovables-y-movilidad-electrica/>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo . (19 de enero de 2022). *Transporte genera el 42% de las emisiones de gases de efecto invernadero en Costa Rica*. Obtenido de <https://www.undp.org/es/costa-rica/press-releases/transporte-genera-el-42-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-costa-rica>
- República de Panamá. (Abril de 2023). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y Derivados de Panamá*. Panamá.
- Rimsky Buitrago, G. G. (03 de octubre de 2023). *Futuro del Hidrógeno Verde en la Aviación de Costa Rica*. (R. Chang-Díaz, entrevistador)
- Seravalli, R. (03 de octubre de 2023). *Experiencias de CINDE con Hidrógeno Verde*. (R. Chang-Díaz, entrevistador)
- Sistema Costarricense de Información Jurídica. (03 de mayo de 2010). *Modificación del artículo 38 de la Ley N° 7447 Regulación del uso racional de la Energía, de 03/11/1994 y sus reformas, Ley para Incentivar el desarrollo y la utilización de Fuentes renovables de Energía*. Obtenido de https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68235&nValor3=81253&strTipM=TC#ddown
- Sistema Costarricense de Información Jurídica. (8 de mayo de 2018). *Establece acciones articuladas en las instituciones del sector ambiente y energía a efectos de desarrollar acciones para propiciar la investigación, la producción y la comercialización del hidrógeno como combustible*. Obtenido de https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=86729&nValor3=112681&strTipM=TC
- Taborelli, M. (11 de abril de 2023). *Portal Movilidad: En detalle cuatro ejes que H2 Colombia trabajará en 2023 para promover transporte a hidrógeno*. Obtenido de <https://portalmovilidad.com/cuatro-temas-h2-colombia-hidrogeno/>
- Umaña, I. M. (15 de septiembre de 2023). *Consulta de las políticas de RECOPE en la administración 2018-2022*. (R. Chang-Díaz, entrevistador)
- World Energy Council. (2022). *World Energy Trilemma Index*. Obtenido de <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index>
- World Health Organization. (2023). *Libya: "A disaster of epic proportions"*. Obtenido de <https://www.emro.who.int/libya-floods/index.html>
- World Wildlife Fund. (2023). Obtenido de <https://www.worldwildlife.org/>