Artículo Científico

Modelo de planificación, evaluación y monitoreo ambiental mediante diagnóstico causal estructurado desde indicadores territoriales para El Salvador

A model for environmental planning, assessment and monitoring through a structured causal diagnosis based on territorial indicators for El salvador

Mtro. Saúl Campos Morán
Investigador
Universidad Tecnológica de El Salvador (UTEC)
saul.campos@utec.edu.sv
https://orcid.org/0000-0002-8884-5547

Presentado 02/07/2026

Aceptado 25/09/2026

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue desarrollar un modelo de planificación, evaluación y monitoreo ambiental mediante diagnóstico causal estructurado desde indicadores territoriales para El Salvador, a través de la aplicación del marco Fuerzas Motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta al período 2000-2024. La metodología adoptó un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo-correlacional; el universo fue el sistema ambiental nacional, representado por 89 indicadores obtenidos mediante análisis documental de bases de datos secundarias (Banco Mundial, FAOSTAT, OMS/UNICEF, CEPALSTAT y MARN) y registrados en una matriz de series temporales, validada por contraste con los reportes originales de cada fuente y por criterios de relevancia causal y viabilidad práctica. El procesamiento en R aplicó regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios, con el coeficiente de determinación como medida de robustez, la prueba t como criterio de significancia ($p < .05$) y la tasa de cambio relativa anual como medida de intensidad, para clasificar los indicadores en una matriz de cuadrantes. Entre los resultados, 19 de los 21 indicadores núcleo mostraron tendencias significativas; las fuerzas motrices y las respuestas de servicios básicos presentaron los cambios más robustos, mientras que el estado biofísico registró deterioro gradual y persistente en cobertura forestal y disponibilidad hídrica, y el saneamiento gestionado de forma segura descendió de 45,7 % a 36,0 %. Se concluye que el modelo articula la base empírica de indicadores, el núcleo analítico causal y el ciclo de gestión, y permite priorizar el tratamiento de aguas residuales, la restauración ecosistémica y la descarbonización del transporte como ejes de la política ambiental nacional.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Palabras clave: indicadores ambientales, planificación ambiental, monitoreo ambiental, evaluación ambiental, degradación del medio ambiente, política ambiental.

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a model for environmental planning, assessment and monitoring through a structured causal diagnosis based on territorial indicators for El Salvador, by applying the Driving Forces-Pressure-State-Impact-Response framework to the period 2000-2024. The methodology adopted a quantitative approach with a descriptive-correlational scope; the universe was the national environmental system, represented by 89 indicators obtained through documentary analysis of secondary databases (World Bank, FAOSTAT, WHO/UNICEF, CEPALSTAT and MARN) and recorded in a time-series matrix, validated by cross-checking against the original reports of each source and by criteria of causal relevance and practical feasibility. Data were processed in R through ordinary least squares linear regression, using the coefficient of determination as a measure of robustness, the t test as the significance criterion ($p < .05$) and the annual relative rate of change as a measure of intensity, which allowed the indicators to be classified in a quadrant matrix. Among the results, 19 of the 21 core indicators showed significant trends; driving forces and basic-service responses displayed the most robust changes, whereas the biophysical state showed gradual and persistent deterioration in forest cover and water availability, and safely managed sanitation declined from 45.7 % to 36.0 %. The study concludes that the model links the empirical indicator base, the causal analytical core and the management cycle, and makes it possible to prioritize wastewater treatment, ecosystem restoration and transport decarbonization as the main axes of national environmental policy.

Keywords: environmental indicators, environmental planning, environmental monitoring, environmental assessment, environmental degradation, environmental policy.

INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental contemporánea requiere marcos analíticos capaces de ordenar la complejidad de los sistemas socio ecológicos y, al mismo tiempo, de producir información sintética, comparable y orientada a la toma de decisiones. En respuesta a esta necesidad, el modelo Driving Forces-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR), desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, 1999) a partir del esquema Presión-Estado-Respuesta de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 1993), organiza la información ambiental en cinco categorías causalmente encadenadas. En su versión en español, el modelo Fuerzas Motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (FMPEIR) fue adoptado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe como referente metodológico para la evaluación ambiental integrada de la región (Quiroga Martínez, 2009). Desde entonces, la literatura científica ha ampliado el marco hacia aplicaciones de gestión de cuencas, suelos y zonas costeras (Agramont *et al*., 2022; Chowdhury *et al.*, 2025; Faseyi *et*

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

al., 2023) y ha propuesto una nueva generación de aplicaciones orientadas a la implementación de políticas, basada en la iteración, el uso de métodos cuantitativos y la integración flexible de fuentes (Carnohan *et al.*, 2023). Por ello, el marco FMPEIR constituye el andamiaje analítico de la presente investigación.

En este contexto, El Salvador representa un caso pertinente para desarrollar un modelo de este tipo. En primer lugar, el país combina la mayor densidad demográfica de América continental, una reducida extensión territorial y una cobertura forestal limitada, a lo que se añaden la exposición recurrente a eventos climáticos extremos y restricciones institucionales para la gestión ambiental. En segundo lugar, su ubicación en el Corredor Seco Centroamericano lo expone a sequías que, según las proyecciones climáticas, se alargarán e intensificarán a lo largo del siglo XXI (Depsky & Pons, 2021), con efectos ya documentados sobre los medios de vida de los pequeños productores de la región (Anderson *et al.*, 2023; Nakamura *et al.*, 2024; Patrick *et al.*, 2026). Además, la urbanización, la expansión del parque vehicular, la demanda de agua y la transformación del uso del suelo ejercen una presión creciente sobre los sistemas naturales (Guerra *et al.*, 2023; Patel & Argueta Platero, 2025). Por consiguiente, el diagnóstico ambiental salvadoreño no puede comprenderse únicamente desde indicadores sectoriales aislados, sino desde una lectura causal que muestre cómo los factores estructurales producen presiones, modifican el estado de los ecosistemas, generan impactos sobre la población y demandan respuestas institucionales.

Sin embargo, los estudios que han aplicado el modelo DPSIR/FMPEIR en contextos centroamericanos siguen siendo escasos en la literatura revisada por pares, y la mayoría de las evaluaciones ambientales de la región se apoya en diagnósticos sectoriales o en informes institucionales que no explicitan las cadenas causales entre dimensiones. Esta situación dificulta identificar retroalimentaciones, priorizar intervenciones y valorar si las respuestas implementadas actúan sobre las causas estructurales del deterioro o únicamente sobre sus efectos más visibles. A ello se suma que los procesos administrativos de la gestión pública se estructuran en las funciones de planificar, organizar, dirigir, controlar y evaluar; no obstante, los diagnósticos ambientales disponibles rara vez se articulan de manera explícita con ese ciclo, de modo que la evidencia generada no siempre se traduce en instrumentos de planificación ni en rutinas de monitoreo.

Con base en lo anterior, el presente artículo tiene como objetivo general desarrollar un modelo de planificación, evaluación y monitoreo ambiental mediante diagnóstico causal estructurado desde indicadores territoriales para El Salvador, a través de la aplicación del marco FMPEIR (Fuerzas Motrices-Presión-Estado-Impacto-Respuesta) al período 2000-2024. De este objetivo general se derivan tres objetivos específicos: (a) caracterizar la trayectoria 2000-2024 de un sistema de 89 indicadores territoriales mediante estadísticos de tendencia, robustez e intensidad; (b) identificar las cadenas causales y retroalimentaciones entre las cinco dimensiones del marco; y (c) integrar ambos componentes en un modelo que vincule el diagnóstico con el ciclo de planificación, evaluación y monitoreo de la política ambiental. Así, el propósito no es solo describir tendencias ambientales, sino ofrecer una herramienta de gestión que permita establecer prioridades de intervención verificables.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

BASES TEÓRICAS

Planificación ambiental estratégica

La planificación ambiental estratégica traduce la evidencia generada por los sistemas de evaluación y monitoreo en instrumentos normativos e institucionales orientados a anticipar, prevenir y corregir el deterioro ambiental. En El Salvador, este componente se articula mediante instrumentos como la Política Nacional de Medio Ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2022), que establece los lineamientos rectores de la gestión ambiental nacional. No obstante, la eficacia de la planificación no puede evaluarse únicamente por la existencia formal de estos instrumentos, sino por su capacidad de traducirse en respuestas efectivas que reviertan las trayectorias de deterioro, lo que exige incorporar criterios explícitos de equidad y distribución en la definición de prioridades (Schlosberg, 2007). En esta línea, Carnohan *et al.* (2023) sostienen que la aplicación del marco DPSIR a la implementación de políticas requiere cinco elementos: iteración entre diagnóstico y decisión, tratamiento explícito del riesgo y la incertidumbre, integración flexible de fuentes, uso de métodos cuantitativos y definiciones estandarizadas. De igual forma, Agramont *et al.* (2022) muestran, para la cuenca del río Katari en Bolivia, que la incorporación de características espaciales y sociales en el marco DPSIR mejora la pertinencia de las respuestas de planificación en contextos latinoamericanos con información fragmentada. Estos aportes fundamentan la decisión de situar el diagnóstico causal como insumo directo de un ciclo de gestión, y no como un producto descriptivo aislado.

Evaluación y monitoreo ambiental

La evaluación y el monitoreo ambiental constituyen el fundamento empírico de todo diagnóstico basado en evidencia. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2019) sostiene que la comprensión de los procesos de degradación exige marcos integrados que superen las visiones sectoriales, articulando en un mismo análisis los factores que generan presiones, las condiciones biofísicas resultantes, los impactos sobre el bienestar humano y las respuestas institucionales. Esta perspectiva orientó, en el ámbito europeo, el tránsito del esquema Presión-Estado-Respuesta (OCDE, 1993) hacia el modelo DPSIR (AEMA, 1999), cuya trayectoria de dos décadas fue revisada críticamente por Patrício *et al.* (2016), quienes destacan su valor para vincular ciencia y política, pero también la necesidad de precisar las definiciones de cada categoría. Investigaciones recientes han fortalecido la dimensión de monitoreo del marco: Mosaffaie *et al.* (2021) evaluaron la tendencia de la salud de una cuenca mediante indicadores DPSIR en series temporales; Zhao *et al.* (2023) propusieron un método para depurar las variables esenciales de los Objetivos de Desarrollo Sostenible destinadas al monitoreo de la degradación de tierras; y Yousafzai *et al.* (2022) vincularon la dinámica del uso del suelo y la urbanización con el marco DPSIR mediante análisis espacio-temporal. En conjunto, estos trabajos respaldan la utilización de estadísticos de tendencia como base del monitoreo, procedimiento que la presente investigación adopta.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Indicadores ambientales y territoriales

Los indicadores ambientales constituyen la unidad básica de observación de los marcos de evaluación y planificación descritos. Niemeijer y de Groot (2008) proponen que su selección debe responder simultáneamente a criterios de relevancia causal —situar el indicador dentro de la cadena de relaciones que explica un fenómeno ambiental— y de viabilidad práctica —disponibilidad, consistencia temporal y comparabilidad de las fuentes—. A esta doble exigencia se añaden las advertencias de la literatura reciente sobre índices compuestos: Kwatra *et al.* (2020) identifican, en una revisión crítica, que las decisiones de normalización, ponderación y agregación condicionan fuertemente los resultados; Gómez-Limón *et al.* (2020) comparan métodos alternativos de ponderación para un indicador compuesto de sostenibilidad ambiental; y Kelemen *et al.* (2024) demuestran la sensibilidad de los índices a los umbrales mínimo y máximo utilizados en la normalización. Por esta razón, la presente investigación privilegia el análisis de tendencia de cada indicador individual antes que su agregación en un índice único. Asimismo, el calificativo de territorial subraya que los indicadores describen la condición de un territorio concreto y sus fuentes nacionales, en coherencia con propuestas recientes de diseño de indicadores para cuencas y áreas protegidas de la región (Jiménez-Moreno *et al.*, 2025).

El modelo FMPEIR/DPSIR como marco analítico integrador

El modelo FMPEIR organiza la información ambiental en cinco categorías causalmente relacionadas. Las fuerzas motrices corresponden a los factores socioeconómicos, demográficos y tecnológicos que generan demanda de recursos naturales o flujos de contaminación. Las presiones son las consecuencias directas de esas fuerzas sobre el sistema natural, como la extracción de recursos, la emisión de contaminantes o la ocupación del territorio. El estado describe la condición biofísica de los sistemas naturales, incluyendo calidad del agua, cobertura forestal, suelo y biodiversidad. Los impactos expresan las consecuencias del deterioro sobre el bienestar humano, la salud, la producción, la vulnerabilidad climática y el capital natural. Las respuestas, por último, son las acciones institucionales, normativas, tecnológicas o sociales orientadas a mitigar presiones, restaurar ecosistemas o adaptarse a los impactos. Aplicaciones recientes en contextos de países en desarrollo confirman la utilidad del marco para ordenar evidencia heterogénea: Faseyi *et al.* (2023) lo emplearon para evaluar la degradación de comunidades costeras en Ghana, y Chowdhury *et al.* (2025) lo generalizaron para la gestión del uso del suelo con un enfoque de sistemas. En consecuencia, el modelo integra en una sola estructura los tres componentes reseñados: constituye simultáneamente el instrumento de evaluación y monitoreo, el criterio organizador de la planificación y la matriz de clasificación de los indicadores territoriales que sustentan la presente investigación.

Antecedentes empíricos sobre el sistema ambiental centroamericano

Los antecedentes científicos recientes sobre la región permiten anticipar los patrones que un diagnóstico causal debería detectar. En materia climática, Depsky y Pons (2021) proyectan que las

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

sequías estacionales del Corredor Seco se alargarán entre 12 % y 30 % y se intensificarán entre 17 % y 42 % hacia fin de siglo; Anderson *et al.* (2023) muestran que la sequía de 2015-2019 fue excepcional en el registro instrumental; Nakamura *et al.* (2024) documentan tendencias recientes adversas en el clima agrícolamente relevante de Centroamérica; y Patrick *et al.* (2026) evidencian que la vulnerabilidad de los pequeños agricultores del Corredor Seco depende tanto del déficit hídrico como de la pérdida de bosque y de la escasa diversificación de medios de vida. En cuanto al uso del suelo, Patel y Argueta Platero (2025) vinculan la urbanización turística y la expansión de la caña de azúcar con la pérdida de bosque en la costa salvadoreña. En el ámbito hídrico-sanitario, Guzmán Sánchez *et al.* (2024) identifican, mediante revisión sistemática, que las periferias urbanas latinoamericanas concentran las brechas de tratamiento de aguas residuales, mientras que Álvarez *et al.* (2024) proponen prioridades regulatorias para los servicios rurales de agua y saneamiento de la región. En el ámbito energético y de transporte, Benfica y Marques (2024) y Hampl (2022) analizan los motores y las condiciones de equidad de la transición energética latinoamericana, mientras que Guerra *et al.* (2023) y Mangones *et al.* (2025) documentan que el transporte urbano constituye la principal fuente de emisiones y de contaminación atmosférica en las ciudades de la región. Estos antecedentes se retoman en la discusión para contrastar los hallazgos del estudio.

METODOLOGÍA

Enfoque y alcance de la investigación

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, complementado con la interpretación causal de los resultados a la luz del modelo FMPEIR, dentro de un diseño mixto secuencial explicativo (Teddlie & Tashakkori, 2009). El alcance es descriptivo-correlacional: describe la trayectoria 2000-2024 de 89 indicadores ambientales y explora las relaciones entre las cinco dimensiones del modelo para el caso de El Salvador, a escala nacional. Se trata, además, de un estudio longitudinal retrospectivo basado en fuentes secundarias, no experimental.

Proceso analítico y universo de estudio

El universo de estudio corresponde al sistema ambiental salvadoreño en su conjunto durante el período 2000-2024, y la unidad de análisis es el indicador ambiental. El sistema se estructuró con 89 indicadores cuantitativos provenientes de fuentes secundarias nacionales e internacionales, con cobertura temporal principal entre 2000 y 2023 y actualización a 2024 cuando la disponibilidad de datos lo permitió. Las fuentes principales fueron el Banco Mundial (Indicadores del Desarrollo Mundial), FAOSTAT, Climate Watch, CEPALSTAT, el Programa Conjunto de Monitoreo de la OMS/UNICEF, el MARN, el Viceministerio de Transporte, la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados y la Unidad de Transacciones del mercado eléctrico. Dado que se trabajó con el universo completo de series disponibles que cumplían los criterios de inclusión, no se aplicó un procedimiento de muestreo probabilístico; la selección fue censal e intencional con criterios

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

explícitos. Los indicadores se organizaron en dos grupos: 21 indicadores núcleo, con series anuales continuas de al menos 12 observaciones y relevancia causal directa, que constituyen la base del análisis estadístico inferencial; y 68 indicadores complementarios, con series más cortas o datos puntuales, que refuerzan la interpretación de dimensiones específicas.

Recorrido metodológico: fases del estudio

El estudio se desarrolló en cuatro fases. En la primera fase (delimitación) se definieron las fuentes, las variables, los códigos de indicador, el período de análisis y el formato de salida. En la segunda fase (construcción de la base de datos) se descargaron, depuraron y unificaron las series en una matriz única. En la tercera fase (clasificación) cada indicador se asignó a una dimensión del modelo según su ubicación en la cadena causal, no únicamente por el fenómeno que mide; así, la generación eléctrica renovable se clasificó como respuesta, porque expresa una acción de política o transformación tecnológica, aunque su efecto posterior incida en la reducción de presiones. En la cuarta fase (análisis e integración) se calcularon los estadísticos de tendencia, se sintetizaron los patrones dimensionales, se identificaron las cadenas causales y se construyó el modelo integrador.

Instrumentos y técnicas de recolección

La técnica de recolección fue el análisis documental de bases de datos estadísticas oficiales, y el instrumento fue una matriz de registro de series temporales con los campos código, nombre, dimensión FMPEIR, unidad, fuente, año y valor. La validación del instrumento se realizó en dos niveles. Primero, la validez de contenido se aseguró contrastando cada indicador con los criterios de relevancia causal y viabilidad práctica de Niemeijer y de Groot (2008) y con la Guía metodológica de la CEPAL (Quiroga Martínez, 2009). Segundo, la confiabilidad de los datos se verificó mediante contraste de los valores descargados con los reportes técnicos originales de cada fuente y mediante la comprobación de consistencia entre fuentes que miden el mismo fenómeno.

Como parte de la transparencia metodológica, se declara que la construcción de las bases de datos contó con apoyo de inteligencia artificial generativa como herramienta auxiliar de programación: se empleó un modelo de lenguaje de gran escala para elaborar borradores de scripts de extracción, limpieza y estructuración de datos, posteriormente revisados, ajustados y ejecutados por el investigador en R, versión 4.3, mediante RStudio. El uso de esta herramienta no sustituyó el criterio metodológico ni la interpretación de resultados; las decisiones sustantivas —selección de indicadores, criterios de inclusión, clasificación dimensional y análisis causal— fueron adoptadas por el investigador, de acuerdo con las recomendaciones sobre transparencia y responsabilidad intelectual en el uso de estas tecnologías (COPE, 2023; Hosseini *et al.*, 2023; Lund & Wang, 2023).

Técnicas de análisis y procesamiento de la información

Para cada indicador núcleo se ajustó una tendencia lineal mediante regresión por mínimos cuadrados ordinarios, con el año como variable independiente y el valor del indicador como variable

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

dependiente. Se obtuvieron cuatro estadísticos: la pendiente (b), que expresa el cambio anual en las unidades del indicador; el coeficiente de determinación (R^2), utilizado como medida de robustez de la tendencia; el valor p de la prueba t de Student sobre la pendiente, con un criterio de significancia de $p < .05$; y la tasa de cambio relativa anual (b dividido entre la media de la serie, multiplicado por 100), utilizada como medida estandarizada de intensidad que permite comparar indicadores con unidades heterogéneas. Con estos estadísticos se construyó una matriz de cuadrantes que cruza la robustez ($R^2 \geq 0{,}50$ frente a $R^2 < 0{,}50$) con la intensidad (|tasa relativa| ≥ 1 % anual frente a < 1 % anual): el cuadrante I agrupa transformaciones estructurales consolidadas (alta intensidad y alta robustez); el cuadrante II, cambios intensos pero inestables; el cuadrante III, áreas de incertidumbre estructural (baja intensidad y baja robustez); y el cuadrante IV, evoluciones graduales y estables. Para el conjunto de los 89 indicadores, la clasificación en cuadrantes se realizó con los mismos criterios de robustez y con la pendiente estandarizada mediante puntaje Z.

El análisis se desarrolló, además, en tres niveles. En el nivel de indicador se identificaron dirección, significancia, robustez e intensidad de cada tendencia. En el nivel dimensional se sintetizaron los patrones correspondientes a cada componente FMPEIR. En el nivel sistémico se analizaron las interrelaciones entre dimensiones, con énfasis en cadenas causales, circuitos de retroalimentación y asimetrías entre respuestas institucionales y estado de los ecosistemas. Este tercer nivel constituye el aporte central del modelo, pues permite pasar de una lectura descriptiva de indicadores a una interpretación causal del sistema ambiental que alimenta el ciclo de planificación, evaluación y monitoreo.

Aspectos éticos

La investigación utilizó exclusivamente datos secundarios de acceso público, agregados a escala nacional, por lo que no involucró participantes humanos ni información personal. Se respetaron los términos de uso de cada fuente, se citan íntegramente los organismos productores de los datos y se declara el uso de herramientas de inteligencia artificial en los términos descritos.

RESULTADOS

Evidencia estadística del sistema de indicadores (2000-2024)

La Tabla 1 presenta la evidencia estadística de los 21 indicadores núcleo, con el valor inicial y final de cada serie en el período 2000-2024, el cambio acumulado, los estadísticos de tendencia y el cuadrante resultante. De los 21 indicadores, 19 (90,5 %) presentaron tendencias estadísticamente significativas ($p < .05$) y 15 alcanzaron valores de R^2 superiores a 0,75, lo que confirma que los cambios observados en el período corresponden a dinámicas estructurales y no a fluctuaciones coyunturales. Los dos indicadores sin significancia —el consumo de fertilizantes y la superficie de áreas protegidas— corresponden, respectivamente, a una serie de alta volatilidad interanual y a una serie corta prácticamente estancada.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Tabla 1

Evidencia estadística de los indicadores núcleo por dimensión FMPEIR — El Salvador, 2000-2024

Dim.	Indicador (unidad)	Valor inicial (año)	Valor final (año)	Δ (%)	b (anual)	R^2	p	Intens. (%/año)	Cuad.
F	Densidad demográfica (hab./km^2)	287 (2000)	305 (2023)	+6,2	+0,757	,977	< .001	+0,26	IV
F	Población urbana (% del total)	56,6 (2000)	75,1 (2024)	+32,7	+0,795	,993	< .001	+1,19	I
F	Tierra agrícola (% del área terrestre)	62,1 (2000)	57,7 (2023)	-7,1	-0,174	,809	< .001	-0,29	IV
F	PIB per cápita (USD corrientes)	1983 (2000)	5503 (2024)	+177,5	+137,9	,968	< .001	+3,99	I
P	Extracción de agua dulce (% de recursos internos)	8,80 (2000)	12,40 (2022)	+40,9	+0,078	,197	= .034	+0,63	III
P	Emisiones de CO_2 (excl. UTCUTS) (Mt CO_2e)	5,80 (2000)	9,54 (2024)	+64,5	+0,087	,513	< .001	+1,21	I
P	Emisiones de CO_2 per cápita (t CO_2e/hab.)	0,98 (2000)	1,51 (2024)	+54,3	+0,011	,397	< .001	+0,95	III
P	Consumo de fertilizantes (kg/ha de tierra arable)	124 (2000)	75 (2023)	-39,9	-2,087	,153	= .059	-1,84	II
P	Saneamiento gestionado de forma segura (% de la población)	45,7 (2000)	36,0 (2024)	-21,3	-0,426	,998	< .001	-1,04	I
E	Cobertura forestal (% del área terrestre)	32,5 (2000)	27,5 (2023)	-15,3	-0,217	1,000	< .001	-0,72	IV
E	Recursos hídricos internos renovables per cápita (m^3/hab./año)	2630 (2000)	2489 (2022)	-5,4	-6,489	,975	< .001	-0,25	IV
E	Exposición media anual a PM2,5 (µg/m^3)	39,8 (2000)	29,6 (2023)	-25,6	-0,281	,441	< .001	-0,90	III
R	Áreas terrestres protegidas (% del área terrestre)	8,40 (2013)	8,30 (2024)	-1,2	-0,008	,026	= .620	-0,09	III
R	Electricidad renovable no hidroeléctrica (% de la generación)	25,2 (2000)	66,9 (2021)	+165,6	+1,479	,757	< .001	+4,29	I
R	Acceso a electricidad (% de la población)	84,5 (2000)	98,7 (2024)	+16,8	+0,617	,962	< .001	+0,66	IV
R	Acceso a combustibles limpios para cocinar (total) (% de la población)	58,4 (2000)	94,4 (2023)	+61,6	+1,627	,991	< .001	+2,07	I

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

R	Acceso a combustibles limpios para cocinar (rural) (% de la población rural)	24,5 (2000)	87,7 (2023)	+258,0	+2,923	,994	< .001	+5,33	I
R	Acceso a combustibles limpios para cocinar (urbano) (% de la población urbana)	82,6 (2000)	97,8 (2023)	+18,4	+0,617	,916	< .001	+0,66	IV
R	Saneamiento al menos básico (% de la población)	80,6 (2000)	88,0 (2024)	+9,2	+0,334	,997	< .001	+0,40	IV
R	Agua potable al menos básica (% de la población)	85,7 (2000)	91,6 (2024)	+6,9	+0,223	,352	= .002	+0,26	III
R	Instalaciones básicas de lavado de manos (% de la población)	90,6 (2008)	88,2 (2024)	-2,6	-0,180	,908	< .001	-0,20	IV

Nota. Dim. = dimensión FMPEIR (F = fuerzas motrices; P = presiones; E = estado; R = respuestas). Δ = cambio acumulado entre el valor inicial y el final (%); b = pendiente de la regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios en unidades del indicador por año; R^2 = coeficiente de determinación; p = valor de la prueba t sobre la pendiente; Intensidad = tasa de cambio relativa anual (b / media de la serie × 100); Cuad. = cuadrante (I: alta intensidad-alta robustez; II: alta intensidad-baja robustez; III: baja intensidad-baja robustez; IV: baja intensidad-alta robustez). Los indicadores de impacto se presentan en la Tabla 5 por tratarse de datos puntuales. Fuente: elaboración propia a partir de Banco Mundial (2025), con datos de origen de FAO, OMS/UNICEF, AIE, EDGAR y UNEP-WCMC.

La distribución por cuadrantes de los 21 indicadores núcleo muestra siete transformaciones estructurales consolidadas (cuadrante I), una señal de alerta inestable (cuadrante II), cinco áreas de incertidumbre estructural (cuadrante III) y ocho evoluciones graduales y estables (cuadrante IV). Cuando el mismo procedimiento se extiende al conjunto de los 89 indicadores, el patrón se acentúa: el cuadrante IV concentra el 73 % de los indicadores, el cuadrante III el 18 %, el cuadrante I el 5,6 % y el cuadrante II el 3,3 %. En términos sistémicos, ello significa que el perfil dominante del sistema ambiental salvadoreño es el de cambios graduales estadísticamente robustos y no el de transformaciones disruptivas generalizadas. Este hallazgo tiene una implicación directa para el monitoreo: un sistema calibrado únicamente para detectar cambios abruptos no captaría la señal más relevante del país, que es la acumulación lenta y persistente de presiones sobre los componentes de estado. Las secciones siguientes desarrollan los resultados por dimensión, con las tablas de indicadores organizadas en el rango 2000-2024.

Fuerzas motrices: factores estructurales de presión ambiental

Las fuerzas motrices identificadas configuran un escenario de presión estructural sobre los ecosistemas, con tendencias de alta robustez estadística. En primer lugar, la densidad demográfica pasó de 287 a 305 habitantes por kilómetro cuadrado entre 2000 y 2023 (R^2 = ,977; p < .001), un incremento moderado (+6,2 %) que, sin embargo, se aplica sobre un territorio ya saturado: el Área Metropolitana de San Salvador concentra cerca del 30 % de la población nacional en menos del 5 % del territorio, lo que intensifica la presión sobre fuentes de agua, sistemas de residuos, infraestructura

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

vial y suelos urbanos. En segundo lugar, la población urbana creció de 56,6 % a 75,1 % del total entre 2000 y 2024 (+18,5 puntos porcentuales; R^2 = ,993), la transformación estructural más consistente del período (cuadrante I). En tercer lugar, el producto interno bruto per cápita casi se triplicó en dólares corrientes (de USD 1 983 a USD 5 503; R^2 = ,968), lo que expresa un aumento sostenido de la capacidad de consumo y de la demanda de energía, transporte y bienes. Por el contrario, la superficie agrícola descendió de 62,1 % a 57,7 % del área terrestre (R^2 = ,809), un retroceso gradual asociado a la urbanización y al abandono de tierras marginales, que combina cultivos intensivos en agua y agroquímicos con producción de subsistencia en laderas expuestas a erosión. Finalmente, el crecimiento del parque vehicular, que superó las 950 000 unidades registradas en 2023 (+60 % respecto al año 2000), representa una fuerza motriz de alto dinamismo, particularmente por su relación con emisiones atmosféricas, congestión urbana y demanda energética (Tabla 2). En conjunto, estos factores estructurales permiten explicar la persistencia de presiones ambientales aun cuando existan avances institucionales en algunas respuestas.

Tabla 2

Indicadores núcleo y complementarios de la dimensión Fuerzas Motrices (F) — El Salvador, 2000-2024

Indicador	Valor 2000 (o inicial)	Valor final (año)	Cambio 2000-2024	Tendencia y robustez
Densidad demográfica (hab./km²)	286,8 (2000)	304,5 (2023)	+6,2 %	Ascendente gradual; R^2 = ,977; cuadrante IV
Población urbana (% del total)	56,6 % (2000)	75,1 % (2024)	+18,5 pp	Ascendente sostenida; R^2 = ,993; cuadrante I
Tierra agrícola (% del área terrestre)	62,1 % (2000)	57,7 % (2023)	-4,4 pp	Descendente gradual; R^2 = ,809; cuadrante IV
PIB per cápita (USD corrientes)	1 983 (2000)	5 503 (2024)	+177,5 %	Ascendente sostenida; R^2 = ,968; cuadrante I
Parque vehicular registrado (unidades)	≈ 590 000 (2000)	> 950 000 (2023)	≈ +60 %	Ascendente sostenida (complementario)

Nota. pp = puntos porcentuales; s. d. = sin dato. Fuentes: Banco Mundial (2025), VMT (2023), CEPAL (2023b). El valor del parque vehicular proviene de fuentes nacionales y se considera complementario. Elaboración propia.

Presiones: flujos extractivos y contaminantes sobre el sistema natural

Las presiones derivadas de las fuerzas motrices se expresan en cuatro flujos principales: extracción hídrica, contaminación atmosférica, contaminación hídrica y cambio de uso del suelo. En cuanto al recurso hídrico, la extracción de agua dulce pasó de 8,8 % a 12,4 % de los recursos hídricos internos renovables entre 2000 y 2022 (+40,9 %); la tendencia es significativa (p = .034) pero de baja robustez (R^2 = ,197), porque el incremento se concentró en el primer quinquenio y luego se estabilizó (cuadrante III). Aunque este valor puede parecer moderado en términos nacionales, oculta

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

diferencias territoriales importantes, especialmente en las cuencas del Área Metropolitana de San Salvador, donde la demanda se incrementa durante los meses de estiaje. Por su parte, las emisiones de dióxido de carbono aumentaron de 5,8 a 9,5 millones de toneladas entre 2000 y 2024 (+64,5 %; R^2 = ,513; p < .001), con una aceleración marcada desde 2021, y las emisiones per cápita crecieron de 0,98 a 1,51 toneladas por habitante (+54,3 %). El parque vehicular, caracterizado por unidades de antigüedad elevada y motores de baja eficiencia, aparece como el componente de intervención más complejo en el corto plazo.

La presión contaminante sobre los cuerpos de agua se mantiene, además, como una de las principales brechas ambientales. El indicador más revelador es la proporción de población con saneamiento gestionado de forma segura, que descendió de 45,7 % en 2000 a 36,0 % en 2024 (-9,7 puntos porcentuales; R^2 = ,998; p < .001), la única tendencia negativa de alta intensidad y alta robustez del sistema (cuadrante I). Este resultado indica que el crecimiento de la recolección de aguas residuales no ha sido acompañado de tratamiento, por lo que más del 80 % de las aguas residuales domésticas se descarga sin tratamiento adecuado, lo que convierte a los ríos receptores en canales de acumulación de efluentes. En contraste, el consumo de fertilizantes mostró una tendencia descendente (de 124 a 75 kg por hectárea) pero de alta volatilidad y sin significancia estadística (p = .059), por lo que se clasifica como una señal inestable (cuadrante II). Finalmente, la deforestación, aunque con tasas menores que en décadas anteriores, continúa ejerciendo presión directa sobre los ecosistemas terrestres y sobre la capacidad de regulación hídrica de las cuencas (Tabla 3).

Tabla 3

Indicadores núcleo y complementarios de la dimensión Presiones (P) — El Salvador, 2000-2024

Indicador	Valor 2000 (o inicial)	Valor final (año)	Cambio 2000-2024	Tendencia y robustez
Extracción de agua dulce (% de recursos internos)	8,8 % (2000)	12,4 % (2022)	+3,6 pp	Creciente, estabilizada desde 2005; R^2 = ,197; cuadrante III
Emisiones de CO_2 totales (Mt CO_2e)	5,8 (2000)	9,5 (2024)	+64,5 %	Ascendente, acelerada desde 2021; R^2 = ,513; cuadrante I
Emisiones de CO_2 per cápita (t/hab.)	0,98 (2000)	1,51 (2024)	+54,3 %	Ascendente moderada; R^2 = ,397; cuadrante III
Saneamiento gestionado de forma segura (% población)	45,7 % (2000)	36,0 % (2024)	-9,7 pp	Descendente sostenida; R^2 = ,998; cuadrante I
Consumo de fertilizantes (kg/ha arable)	124,0 (2000)	74,6 (2023)	-39,9 %	Descendente volátil; R^2 = ,153; n. s.; cuadrante II
Pérdida neta forestal anual (ha/año)	s. d.	-21 700 (promedio 2000-2020)	Persistente	Descenso lento de la tasa (complementario)

Nota. n. s. = no significativo (p ≥ .05). Fuentes: Banco Mundial (2025), con datos de FAO AQUASTAT, EDGAR y OMS/UNICEF (2023); FAO (2020); MARN (2020). Elaboración propia.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Estado: condición biofísica de los ecosistemas

El componente de estado expresa el resultado acumulado de las presiones sobre los sistemas naturales y presenta el patrón más homogéneo del sistema: deterioro gradual, de baja intensidad, pero de altísima robustez. La cobertura forestal descendió de 32,5 % a 27,5 % del área terrestre entre 2000 y 2023 (R^2 = 1,000; p < .001), una pérdida de cinco puntos porcentuales equivalente a cerca de 100 000 hectáreas en poco más de dos décadas, que sitúa a El Salvador muy por debajo de países vecinos como Costa Rica, cuya cobertura aumentó de 56,0 % a 60,4 % en el mismo período. De manera paralela, los recursos hídricos internos renovables per cápita se redujeron de 2 630 a 2 489 metros cúbicos por habitante y año (R^2 = ,975), un descenso explicado por el crecimiento demográfico sobre una oferta hídrica constante. La única mejora de estado con significancia estadística corresponde a la exposición media anual a partículas finas (PM2,5), que bajó de 39,8 a 29,6 microgramos por metro cúbico (R^2 = ,441; p < .001), aunque permanece muy por encima del valor guía de la Organización Mundial de la Salud (5 µg/m^3) y la mejora se concentró en la primera década del período.

La calidad hídrica constituye, por otra parte, uno de los indicadores de estado más sensibles. El programa de monitoreo del MARN (2020) reporta 122 sitios en 55 ríos del territorio nacional, sin que ninguno alcance categoría buena o excelente; los ríos Acelhuate, Sucio, Suquiapa y Grande de San Miguel aparecen entre los cuerpos de agua con condiciones más deterioradas, y la presencia de contaminantes emergentes —plaguicidas, productos farmacéuticos y microplásticos— añade una dimensión de riesgo sanitario que los instrumentos regulatorios tradicionales no siempre abordan con suficiencia. La degradación del suelo completa el perfil de deterioro: más del 50 % del territorio presenta algún grado de erosión y la pérdida anual por erosión hídrica se estima en 59 millones de toneladas métricas, condición que afecta la productividad agrícola, incrementa la sedimentación de embalses, reduce la capacidad de infiltración y aumenta la vulnerabilidad ante sequías e inundaciones (Tabla 4). De tal forma, el estado de los ecosistemas muestra una acumulación de deterioro que las respuestas actuales no han logrado revertir.

Tabla 4

Indicadores núcleo y complementarios de la dimensión Estado (E) — El Salvador, 2000-2024

Indicador	Valor 2000 (o inicial)	Valor final (año)	Cambio 2000-2024	Tendencia y robustez
Cobertura forestal (% del área terrestre)	32,5 % (2000)	27,5 % (2023)	-5,0 pp	Descendente lineal; R^2 = 1,000; cuadrante IV
Recursos hídricos internos per cápita (m^3/hab./año)	2 630 (2000)	2 489 (2022)	-5,4 %	Descendente gradual; R^2 = ,975; cuadrante IV

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Exposición media a PM2,5 (µg/m^3)	39,8 (2000)	29,6 (2023)	-25,6 %	Descendente, estabilizada desde 2006; R^2 = ,441; cuadrante III
Ríos con calidad buena o excelente (monitoreo en 55 ríos)	s. d.	0 de 55 (2020)	Sin mejora observada	Persistente (complementario)
Territorio con algún grado de erosión (%)	s. d.	> 50 % (2021)	Deterioro acumulado	Persistente (complementario)
Pérdida anual de suelo por erosión hídrica (millones de t)	s. d.	59 (2020)	Persistente	Sin reversión (complementario)
Cobertura forestal de Costa Rica, referencia (%)	56,0 % (2000)	60,4 % (2023)	+4,4 pp	Ascendente (referencia regional)

Nota. s. d. = sin dato. Fuentes: Banco Mundial (2025), con datos de FAO y AQUASTAT; FAO (2020); MARN (2020). El valor de PM2,5 corresponde a la exposición media ponderada por población. Elaboración propia.

Impactos: consecuencias sobre bienestar, economía y vulnerabilidad

Los impactos del deterioro ecosistémico sobre la población salvadoreña pueden agruparse en tres dimensiones: sanitaria, económica y climática. Dado que la mayoría de los indicadores de impacto disponibles corresponde a estimaciones puntuales y no a series anuales continuas, esta dimensión se presenta con datos de referencia (Tabla 5) y se interpreta en relación con las tendencias de las dimensiones precedentes. En la dimensión sanitaria, la contaminación de fuentes superficiales y subterráneas se relaciona con la persistencia de enfermedades de transmisión hídrica: la mortalidad atribuida a agua insegura, saneamiento deficiente y falta de higiene se situó en 6,1 por 100 000 habitantes en 2019, lo que refleja avances en cobertura de agua potable, pero también las brechas persistentes en calidad, saneamiento y tratamiento documentadas en la dimensión de presiones. En la dimensión económica, se estiman pérdidas promedio de USD 215 millones anuales atribuibles a la degradación de servicios forestales, incluyendo daños asociados a eventos extremos, sedimentación, pérdida de productividad hidroeléctrica y afectación de la pesca artesanal; estos costos muestran que el deterioro ambiental no constituye solamente un problema ecológico, sino un factor que incide sobre la productividad, el gasto público y los medios de vida.

La vulnerabilidad climática añade, por último, una dimensión de desigualdad al diagnóstico. Los hogares rurales del oriente y centro del país presentan mayor exposición a inseguridad alimentaria durante años de sequía, mientras que comunidades periurbanas de bajos ingresos soportan de manera desproporcionada los efectos de inundaciones y deslizamientos. En este sentido, los impactos ambientales reproducen y amplifican desigualdades socioeconómicas previas, lo que vuelve necesario articular la política ambiental con estrategias de protección social, ordenamiento territorial y adaptación climática.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Tabla 5

Indicadores seleccionados de la dimensión Impactos (I) — El Salvador, 2000-2024

Indicador	Valor de referencia (año)	Lectura en el período 2000-2024	Fuente
Mortalidad atribuida a agua, saneamiento e higiene deficientes (por 100 000 hab.)	6,1 (2019)	Descenso respecto a inicios del período por expansión de cobertura; brecha persistente en calidad	OMS, en Banco Mundial (2025)
Pérdidas económicas anuales por degradación forestal	USD 215 millones/año, ≈ 1 % del PIB (2021)	Costo recurrente asociado a la pérdida acumulada de 5 pp de cobertura forestal	Banco Mundial (2021)
Hogares rurales con inseguridad alimentaria moderada o severa en año de sequía	26 % (2023)	Exposición creciente por sequías de 2014-2019 y 2023	FAO (2023)
Costo proyectado del cambio climático 2025-2050	7-12 % del PIB acumulado (2023)	Proyección basada en escenarios de estrés hídrico y climático	CEPAL (2023a)
Reducción de capturas en pesca artesanal costera	-15 a -25 % (2023)	Vinculada a sedimentación y contaminación de estuarios	FAO (2023)
Incremento de enfermedades vectoriales tras inundaciones	+35 a +50 % en consultas (2022)	Impacto episódico asociado a eventos extremos	MINSAL (2022)

Nota. Elaboración propia con base en las fuentes citadas. Los valores corresponden a estimaciones puntuales; por ello no se reportan estadísticos de tendencia.

Respuestas: avances institucionales y brechas persistentes

La dimensión de respuestas concentra las transformaciones positivas más intensas y robustas del sistema, aunque con brechas estructurales. En primer lugar, el acceso a electricidad pasó de 84,5 % a 98,7 % de la población entre 2000 y 2024 (R^2 = ,962), y el acceso a combustibles y tecnologías limpias para cocinar creció de 58,4 % a 94,4 % (R^2 = ,991), con un avance excepcional en el ámbito rural, donde la cobertura pasó de 24,5 % a 87,7 % (+63 puntos porcentuales; intensidad de +5,3 % anual), la tendencia de mayor intensidad de todo el sistema. En segundo lugar, la transición de la matriz eléctrica constituye el otro cambio de alta intensidad y alta robustez: la generación renovable no hidroeléctrica pasó de 25,2 % a 66,9 % de la producción entre 2000 y 2021 (R^2 = ,757; intensidad de +4,3 % anual), impulsada por la expansión geotérmica, solar y de biomasa; la capacidad solar fotovoltaica instalada alcanzó 633,1 MW en 2023 (UT, 2024). Estos indicadores evidencian mejoras en condiciones de vida y reducción de algunas causas ambientales de mortalidad, especialmente en espacios urbanos.

No obstante, las respuestas presentan tres brechas. Primero, el saneamiento básico avanzó de 80,6 % a 88,0 % (R^2 = ,997), pero, como se mostró en la dimensión de presiones, el saneamiento gestionado de forma segura retrocedió, lo que produce una paradoja dentro del modelo FMPEIR: el aumento del acceso mejora un indicador de respuesta y, al mismo tiempo, si no se acompaña de

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

infraestructura de tratamiento, incrementa el volumen de aguas residuales descargadas en cuerpos receptores. Segundo, el acceso a agua potable básica creció de 85,7 % a 91,6 %, pero con una caída entre 2007 y 2010 que reduce la robustez de la tendencia (R^2 = ,352), y las instalaciones básicas de lavado de manos descendieron levemente de 90,6 % a 88,2 % entre 2008 y 2024. Tercero, la superficie de áreas terrestres protegidas permaneció estancada en torno al 8,3-8,8 % del territorio entre 2013 y 2024, sin tendencia significativa, y muy por debajo de la meta global del 30 % para 2030, mientras que la inversión ejecutada en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (USD 30,4 millones anuales en 2022) se mantiene muy por debajo de lo requerido (Tabla 6). De igual forma, los programas de restauración ecosistémica, aunque existentes, operan a una escala insuficiente frente a la pérdida acumulada de cobertura forestal.

Tabla 6

Indicadores núcleo y complementarios de la dimensión Respuestas (R) — El Salvador, 2000-2024

Indicador	Valor 2000 (o inicial)	Valor final (año)	Cambio 2000-2024	Tendencia y robustez
Electricidad renovable no hidroeléctrica (% de la generación)	25,2 % (2000)	66,9 % (2021)	+41,7 pp	Ascendente acelerada; R^2 = ,757; cuadrante I
Capacidad solar fotovoltaica instalada (MW)	≈ 0 (2000)	633,1 (2023)	Expansión desde 2017	Acelerada (complementario)
Acceso a electricidad (% población)	84,5 % (2000)	98,7 % (2024)	+14,2 pp	Ascendente, próxima a universal; R^2 = ,962; cuadrante IV
Combustibles limpios para cocinar, total (% población)	58,4 % (2000)	94,4 % (2023)	+36,0 pp	Ascendente sostenido; R^2 = ,991; cuadrante I
Combustibles limpios para cocinar, rural (% población rural)	24,5 % (2000)	87,7 % (2023)	+63,2 pp	Ascendente de máxima intensidad; R^2 = ,994; cuadrante I
Combustibles limpios para cocinar, urbano (% población urbana)	82,6 % (2000)	97,8 % (2023)	+15,2 pp	Ascendente con efecto techo; R^2 = ,916; cuadrante IV
Saneamiento al menos básico (% población)	80,6 % (2000)	88,0 % (2024)	+7,4 pp	Ascendente gradual; R^2 = ,997; cuadrante IV
Agua potable al menos básica (% población)	85,7 % (2000)	91,6 % (2024)	+5,9 pp	Ascendente con retroceso 2007-2010; R^2 = ,352; cuadrante III
Instalaciones básicas de lavado de manos (% población)	90,6 % (2008)	88,2 % (2024)	-2,4 pp	Descendente leve; R^2 = ,908; cuadrante IV
Áreas terrestres protegidas (% del territorio)	8,4 % (2013)	8,3 % (2024)	-0,1 pp	Estancada; n. s.; cuadrante III
Tratamiento de aguas residuales (%)	s. d.	< 20 % (2020)	Escaso avance	Brecha crítica (complementario)
Inversión anual ejecutada en ODS 6 (USD millones)	s. d.	30,4 (2022)	—	Muy por debajo de lo requerido (complementario)

Nota. s. d. = sin dato. Fuentes: Banco Mundial (2025), con datos de AIE, OMS y OMS/UNICEF (2023); UT (2024); MARN (2020); CEPAL (2023a). Elaboración propia.

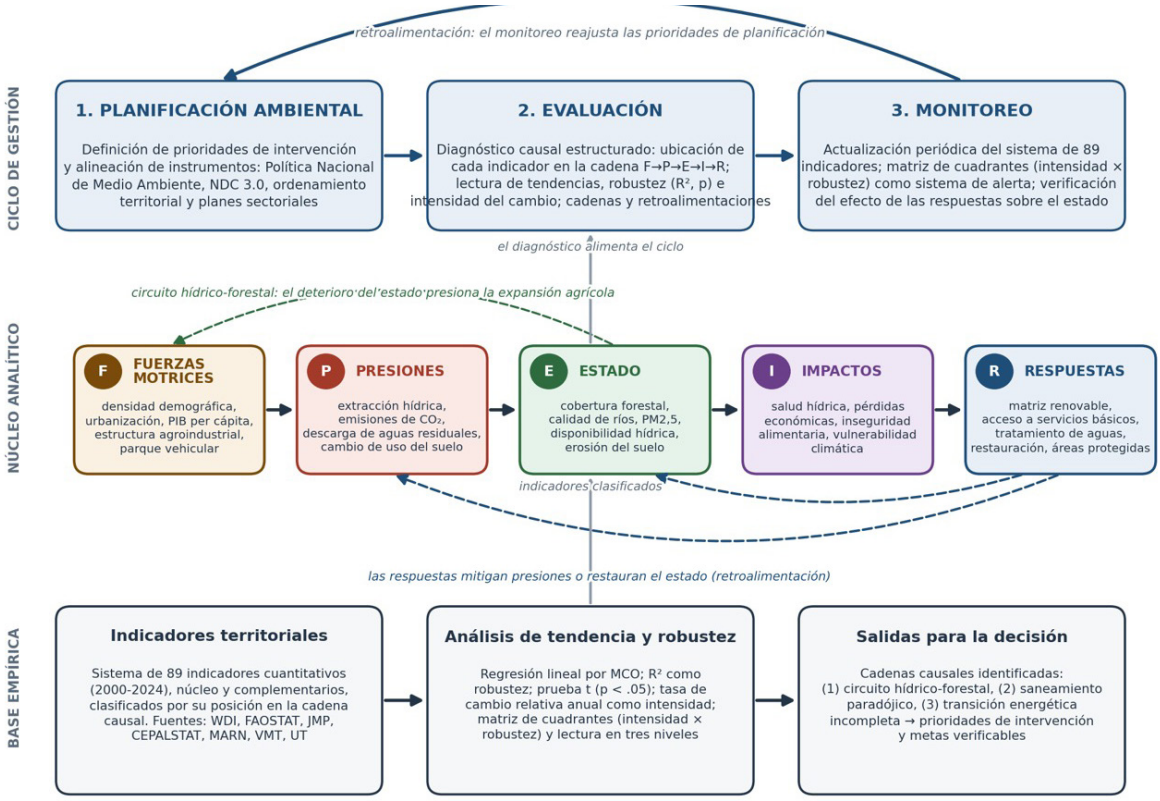
https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Modelo de planificación, evaluación y monitoreo ambiental

La integración de los resultados anteriores permite formular el modelo que da respuesta al objetivo general (Figura 1). El modelo se organiza en tres niveles articulados. El primer nivel, la base empírica, está constituido por el sistema de 89 indicadores territoriales clasificados según su posición en la cadena causal, por el procedimiento de análisis de tendencia y robustez, y por las salidas para la decisión (cadenas causales y prioridades). El segundo nivel, el núcleo analítico, corresponde a la cadena FMPEIR con sus retroalimentaciones: las respuestas que mitigan presiones o restauran el estado, y los circuitos en que el deterioro del estado realimenta nuevas presiones. El tercer nivel, el ciclo de gestión, vincula el diagnóstico con las funciones administrativas de planificación —definición de prioridades y alineación con la Política Nacional de Medio Ambiente y la Contribución Determinada a Nivel Nacional—, evaluación —diagnóstico causal estructurado— y monitoreo —actualización periódica de los indicadores y uso de la matriz de cuadrantes como sistema de alerta—, con una retroalimentación explícita del monitoreo hacia la planificación. De este modo, el modelo no se limita a describir el estado del ambiente, sino que establece el mecanismo mediante el cual la evidencia estadística se convierte en decisiones verificables y se actualiza en cada ciclo.

Figura 1

Modelo de planificación, evaluación y monitoreo ambiental mediante diagnóstico causal estructurado desde indicadores territoriales para El Salvador



Nota. Elaboración propia. F = fuerzas motrices; P = presiones; E = estado; I = impactos; R = respuestas. Las flechas continuas representan la cadena causal y el flujo del ciclo de gestión; las flechas discontinuas representan retroalimentaciones.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

La aplicación del modelo al caso salvadoreño permitió reconocer tres cadenas causales principales que explican la persistencia del deterioro ambiental pese a la existencia de respuestas institucionales. La primera es el circuito hídrico-forestal: la pérdida de cobertura forestal reduce la capacidad de recarga hídrica, afecta la regulación del ciclo del agua y amplifica inundaciones y sequías; estos impactos presionan la expansión agrícola y el uso intensivo del suelo, lo que vuelve a afectar los remanentes forestales, mientras que las respuestas de reforestación y áreas protegidas —estancadas en torno al 8,5 % del territorio— no alcanzan la escala necesaria para romper el circuito. La segunda es el saneamiento paradójico: la ampliación del acceso a saneamiento básico (+7,4 puntos porcentuales) coexiste con el retroceso del saneamiento gestionado de forma segura (-9,7 puntos porcentuales), de modo que una mejora en la dimensión de respuesta genera deterioro adicional en la dimensión de presión y, posteriormente, en el estado del sistema hídrico. La tercera es la transición energética incompleta: los avances en generación renovable reducen la presión asociada a la matriz eléctrica, pero no compensan el crecimiento de las emisiones totales de dióxido de carbono (+64,5 %), impulsadas por el transporte; ello indica que la transición no puede evaluarse únicamente desde la oferta eléctrica, sino que requiere incorporar movilidad, renovación vehicular, transporte colectivo y planificación urbana.

DISCUSIÓN

Resumen del hallazgo principal

El hallazgo central de la investigación es que el sistema ambiental salvadoreño se encuentra en una transición asimétrica: las respuestas institucionales vinculadas con servicios básicos y con la matriz eléctrica exhiben las transformaciones más intensas y robustas del período, mientras que los componentes biofísicos de estado —bosque, agua y suelo— registran un deterioro gradual, de baja intensidad, pero de robustez casi perfecta, que las respuestas no han logrado revertir. Esta disociación entre el bienestar humano inmediato y la salud ecosistémica de largo plazo, junto con las tres cadenas causales identificadas, constituye el núcleo del diagnóstico y justifica el modelo propuesto, cuyo aporte consiste en convertir esa evidencia en un ciclo de planificación, evaluación y monitoreo.

Comparación con la literatura

Los resultados coinciden, en primer lugar, con la advertencia de Niemeijer y de Groot (2008) y de Patrício *et al.* (2016) sobre la tendencia de los marcos tipo DPSIR a subestimar las interacciones no lineales entre dimensiones cuando el análisis se limita a una lectura sectorial; el análisis causal explícito desarrollado aquí —mediante la identificación de tres circuitos de retroalimentación— responde directamente a esa limitación, en la línea de la nueva generación de aplicaciones del marco propuesta por Carnohan *et al.* (2023), que reclama iteración y métodos cuantitativos. En segundo lugar, el hallazgo de que los indicadores de estado cambian de forma gradual y robusta

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

converge con Mosaffaie *et al.* (2021), quienes, al evaluar la tendencia de la salud de una cuenca con indicadores DPSIR, encontraron que el deterioro se manifiesta como acumulación lenta y no como rupturas abruptas; de igual manera, la propuesta de depurar variables esenciales para el monitoreo de la degradación de tierras (Zhao *et al.*, 2023) respalda la decisión de concentrar la inferencia estadística en un subconjunto de indicadores núcleo. En tercer lugar, la paradoja del saneamiento es consistente con la revisión sistemática de Guzmán Sánchez *et al.* (2024), que documenta la concentración de las brechas de tratamiento en las periferias urbanas latinoamericanas, y con las prioridades regulatorias identificadas por Álvarez *et al.* (2024) para los servicios rurales; nuestro aporte consiste en cuantificar esa brecha como una tendencia negativa robusta (R^2 = ,998) que contradice la lectura optimista basada únicamente en la cobertura básica.

Asimismo, la transición energética incompleta coincide con lo señalado por Benfica y Marques (2024) sobre los motores tecnológicos y financieros de la transición latinoamericana y con la advertencia de Hampl (2022) sobre sus condiciones de equidad; sin embargo, nuestros resultados muestran que el avance de la matriz eléctrica convive con un aumento del 64,5 % en las emisiones totales, lo que respalda la conclusión de Guerra *et al.* (2023) y de Mangones *et al.* (2025) de que el transporte urbano es el principal vector de emisiones y de contaminación atmosférica en la región y el área de política menos resuelta. En el ámbito climático, la evidencia de vulnerabilidad de los hogares rurales durante años de sequía es coherente con los antecedentes de Depsky y Pons (2021), Anderson *et al.* (2023) y Nakamura *et al.* (2024) sobre la intensificación de la sequía en el Corredor Seco, y con la conclusión de Patrick *et al.* (2026) de que la pérdida de bosque amplifica el daño de la sequía sobre los medios de vida, lo que refuerza la pertinencia del circuito hídrico-forestal identificado. Por último, el vínculo entre urbanización, expansión agroindustrial y pérdida de bosque coincide con Patel y Argueta Platero (2025) para la costa salvadoreña y con Yousafzai *et al*. (2022) en otros contextos de urbanización acelerada; en contraste con Faseyi *et al.* (2023), cuyo diagnóstico DPSIR en Ghana se basó principalmente en percepciones comunitarias, el presente estudio aporta una base estadística de series temporales, aunque a costa de una menor sensibilidad a la escala local.

Explicación de los resultados

Tres factores explican el patrón observado. El primero es de naturaleza económico-institucional: las respuestas que avanzaron con mayor intensidad —electrificación, combustibles limpios, energía renovable— son intervenciones de oferta con retornos privados y políticos rápidos, financiables mediante inversión multilateral y privada, mientras que el tratamiento de aguas residuales y la restauración ecosistémica son bienes públicos con costos concentrados y beneficios difusos, lo que explica su rezago pese a los instrumentos formales de planificación (MARN, 2022; Schlosberg, 2007). El segundo es de naturaleza biofísica: los componentes de estado responden con retardos de décadas a las presiones acumuladas, de modo que las series lineales de alta robustez que aquí se documentan reflejan inercias que las respuestas de la última década aún no pueden revertir, tal como anticipan los modelos de acumulación gradual (Mosaffaie *et al.*, 2021). El tercero es

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

metodológico: la clasificación causal de cada indicador según su posición en la cadena, y no según el sector que lo produce, permitió visibilizar la paradoja del saneamiento y la transición incompleta, que un diagnóstico sectorial habría registrado como avances sin matices.

Limitaciones del estudio

El estudio presenta cuatro limitaciones. Primera, la dependencia de fuentes secundarias implica heterogeneidad en las definiciones y en la cobertura temporal de las series; por ejemplo, la cobertura forestal reportada por la serie armonizada del Banco Mundial difiere de la estimación nacional del inventario forestal, y varias series de impacto solo disponen de datos puntuales. Segunda, el ajuste lineal, aunque adecuado para caracterizar tendencias de largo plazo, no captura quiebres estructurales ni comportamientos no lineales, que en algunos indicadores —como las emisiones desde 2021 o la extracción hídrica antes de 2005— son evidentes. Tercera, el análisis se realizó a escala nacional, por lo que no refleja las diferencias territoriales entre cuencas, departamentos o el área metropolitana, que la literatura señala como determinantes (Agramont et *al.*, 2022; Patel & Argueta Platero, 2025). Cuarta, la clasificación de un indicador en una dimensión del modelo implica un juicio analítico que, aunque se realizó con criterios explícitos, admite alternativas; la sensibilidad de los resultados a decisiones de este tipo, advertida por Kwatra *et al.* (2020) y Kelemen *et al.* (2024), se atenuó al privilegiar el análisis por indicador sobre la agregación en índices.

Proyección y líneas futuras de investigación

Se proponen cuatro líneas de investigación. Primera, desagregar el modelo a escala de cuenca y de municipio, incorporando la dimensión espacial y social del marco DPSIR, para identificar las cadenas causales con mayor especificidad territorial. Segunda, incorporar modelos de series temporales con detección de puntos de cambio y proyecciones a 2030 y 2050, coherentes con los escenarios climáticos regionales, que permitan evaluar la trayectoria esperada de los indicadores de estado bajo distintas combinaciones de respuestas. Tercera, complementar la evidencia estadística con métodos cualitativos —entrevistas a decisores y talleres participativos— para validar la clasificación causal y las prioridades con los actores del ciclo de planificación. Cuarta, aplicar el modelo de manera comparativa en los países del Corredor Seco Centroamericano, con el fin de determinar si la transición asimétrica identificada en El Salvador constituye un patrón regional.

CONCLUSIONES

En respuesta al objetivo general, la investigación desarrolló un modelo de planificación, evaluación y monitoreo ambiental que articula tres niveles: una base empírica de 89 indicadores territoriales con sus estadísticos de tendencia, un núcleo analítico causal basado en el marco FMPEIR y un ciclo de gestión con retroalimentación explícita entre monitoreo y planificación. Su aplicación al período 2000-2024 permitió estructurar un diagnóstico causal sustentado en evidencia estadística: 19 de los

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

21 indicadores núcleo presentaron tendencias significativas, con predominio de cambios graduales y robustos.

En primer lugar, los resultados muestran que las fuerzas motrices del deterioro ambiental se encuentran asociadas con factores estructurales de difícil reversión inmediata —urbanización, crecimiento del ingreso, uso agrícola intensivo del territorio y expansión del parque vehicular—, que generan presiones acumulativas superiores a la capacidad actual de respuesta en recurso hídrico, tratamiento de aguas residuales, restauración forestal y emisiones del transporte. En segundo lugar, el estudio evidencia que el modelo FMPEIR es útil para contextos con información heterogénea, siempre que se combine la validación de fuentes con criterios explícitos de clasificación causal y con estadísticos de robustez e intensidad; su principal aporte consiste en mostrar que algunas respuestas, aunque positivas en términos sectoriales, resultan insuficientes o incluso generan efectos no deseados cuando no se articulan con los demás eslabones de la cadena, como ilustran la paradoja del saneamiento y la transición energética incompleta.

En tercer lugar, el diagnóstico permite identificar tres prioridades de intervención verificables mediante los propios indicadores del modelo: cerrar la brecha de tratamiento de aguas residuales, de modo que el saneamiento gestionado de forma segura recupere y supere el nivel del año 2000; ampliar la restauración ecosistémica y las áreas protegidas a una escala capaz de detener la pérdida de cobertura forestal; y avanzar hacia la descarbonización del transporte, que constituye la presión de mayor crecimiento y el área menos resuelta de la política ambiental reciente.

Se concluye que el modelo propuesto ofrece una base metodológica pertinente para orientar la política ambiental salvadoreña hacia decisiones más integradas, basadas en evidencia y conectadas con las cadenas causales que explican el deterioro ambiental. Su aplicación periódica permitiría monitorear avances, actualizar prioridades y vincular los instrumentos nacionales de adaptación y mitigación —incluida la Contribución Determinada a Nivel Nacional en su tercera versión (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD] y MARN, 2022)— con indicadores verificables de fuerzas motrices, presión, estado, impacto y respuesta.

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

REFERENCIAS

Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). (1999). *Environmental indicators: Typology and overview.* European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25

Agramont, A., van Cauwenbergh, N., van Griesven, A. y Craps, M. (2022). Integrating spatial and social characteristics in the DPSIR framework for the sustainable management of river basins: Case study of the Katari River Basin, Bolivia. *Water International,* 47(1), 8-29. https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1997021

Álvarez, L., Vargas, L. y Jiménez, A. (2024). Priorities for the rural water and sanitation services regulation in Latin America. *Frontiers in Water,* 6, 1406301. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1406301

Anderson, T. G., McKinnon, K. A., Pons, D. y Anchukaitis, K. J. (2023). How exceptional was the 2015 2019 Central American drought? *Geophysical Research Letters, 50*(21), e2023GL105391. https://doi.org/10.1029/2023GL105391

Banco Mundial. (2021). *El Salvador: Forest Investment Program — Forest governance and finance.* World Bank Group. https://www.worldbank.org/en/country/elsalvador/overview

Banco Mundial. (2025). *World Development Indicators* [base de datos]. https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators

Benfica, V. y Marques, A. C. (2024). Technological and financial development as drivers of Latin America's energy transition. *Renewable Energy, 237,* 121664. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121664

Carnohan, S. A., Trier, X., Liu, S., Clausen, L. P. W., Clifford-Holmes, J. K., Hansen, S. F., Benini, L. y McKnight, U. S. (2023). Next generation application of DPSIR for sustainable policy implementation. *Current Research in Environmental Sustainability, 5,* 100201. https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100201

Chowdhury, S., Paul, C., Hamidov, A., Bayer, L., Arndt, M., McPherson, J. y Helming, K. (2025 Developing a generic DPSIR framework for land use and soil management: A systems approach to maximise soil health. *European Journal of Soil Science, 76*(6), e70230. https://doi.org/10.1111/ejss.70230

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023a). *La emergencia del cambio climático y el estado del agua en América Latina y el Caribe.* CEPAL. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/45677

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023b). *CEPALSTAT: Bases de datos y publicaciones estadísticas* [base de datos]. https://statistics.cepal.org/

Committee on Publication Ethics (COPE). (2023). *Authorship and AI tools: COPE position statement.* https://publicationethics.org/guidance/cope-position/authorship-and-ai-tools

Depsky, N. y Pons, D. (2021). Meteorological droughts are projected to worsen in Central America's dry corridor throughout the 21st century. *Environmental Research Letters,* 16(1), 014001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc5e2

Faseyi, C. A., Miyittah, M. K. y Yafetto, L. (2023). Assessment of environmental degradation in two coastal communities of Ghana using Driver Pressure State Impact Response (DPSIR) framework. J*ournal of Environmental Management, 342,* 118224. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118224

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.* FAO. https://doi.org/10.4060/ca9825en

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). ***FAOSTAT*** [base de datos]. https://www.fao.org/faostat/en/

Gómez-Limón, J. A., Arriaza, M. y Guerrero-Baena, M. D. (2020). Building a composite indicator to measure environmental sustainability using alternative weighting methods. Sustainability, 12(11), 4398. https://doi.org/10.3390/su12114398

Guerra, E., Montejano, J., Reyes, A. y Vergel-Tovar, E. (2023). Transportation and emissions in Latin American cities. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 123, 103925. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103925

Guzmán Sánchez, J., Perevochtchikova, M. y Kolb, M. (2024). Wastewater in Latin American urban peripheries: Identifying research trends and challenges through a systematic literature review. *Science of The Total Environment,* 931, 173019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173019

Hampl, N. (2022). Equitable energy transition in Latin America and the Caribbean: Reducing inequity by building capacity. *Renewable and Sustainable Energy Transition, 2,* 100035. https://doi.org/10.1016/j.rset.2022.100035

Hosseini, M., Rasmussen, L. M. y Resnik, D. B. (2023). Using AI to write scholarly publications. *Accountability in Research, 30*(6), 1-9. https://doi.org/10.1080/08989621.2023.2168535

Jiménez-Moreno, M. J., Rodríguez-Laguna, R. y Escalona-Maurice, M. J. (2025). Modelo ambiental para el diseño de indicadores ambientales en la subcuenca del río Metztitlán. *Áreas Naturales Protegidas Scripta,* 11(1), 21-38. https://doi.org/10.18242/anpscripta.2025.11.11.01.0002

Kelemen, A., Szabó, Z. K., Bozóki, S., Szádoczki, Z. y Hartvig, Á. D. (2024). A sensitivity analysis of composite indicators: Min/max thresholds. *Environmental and Sustainability Indicators, 23,* 100453. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100453

Kwatra, S., Kumar, A. y Sharma, P. (2020). A critical review of studies related to construction and computation of Sustainable Development Indices. *Ecological Indicators, 112,* 106061. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106061

Lund, B. D. y Wang, T. (2023). Chatting about ChatGPT: How may AI and GPT impact academia and libraries? *Library Hi Tech News, 40*(3), 26-29. https://doi.org/10.1108/LHTN-01-2023-0009

Mangones, S. C., Cuéllar-Álvarez, Y., Rojas-Roa, N. Y. y Osses, M. (2025). Addressing urban transport related air pollution in Latin America: Insights and policy directions. *Latin American Transport Studies, 3,* 100033. https://doi.org/10.1016/j.latran.2025.100033

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2020). Informe de la calidad del agua de los ríos de El Salvador. MARN. https://observatoriogeneroyjusticiaambiental.org/informe-de-la-calidad-de-agua-de-los-rios-de-el-salvador-ano-2020/

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2022). Política Nacional de Medio Ambiente. MARN. https://cidoc.ambiente.gob.sv/documento/politica-nacional-de-medio-ambiente/

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Ministerio de Salud (MINSAL). (2022). Boletín epidemiológico 2022. MINSAL. https://www.salud.gob.sv/

Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M. R. y Kousari, M. R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land Use Policy, 100,* 104911. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911

Nakamura, J., Seager, R., Liu, H., Cottier, F., Puma, M. J., Wrathall, D. J., Katz, B., de Sherbinin, A. y Adamo, S. B. (2024). Recent trends in agriculturally relevant climate in Central America. *International Journal of Climatology, 44*(8), 2701-2724. https://doi.org/10.1002/joc.8476

Niemeijer, D. y de Groot, R. S. (2008). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators, 8*(1), 14-25. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.11.012

Organización Mundial de la Salud (OMS) y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022.* WHO/UNICEF JMP. https://www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water--sanitation-and-hygiene-2000-2022---special-focus-on-gender

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (1993). *OECD core set of indicators for environmental performance reviews.* OECD. https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/

Patel, R. y Argueta Platero, A. A. (2025). Social-ecological implications of land use change on the Balsamo Coast of El Salvador. *Regional Environmental Change, 25*(3), 85. https://doi.org/10.1007/s10113-025-02397-7

Patrício, J., Elliott, M., Mazik, K., Papadopoulou, K.-N. y Smith, C. J. (2016). DPSIR—Two decades of trying to develop a unifying framework for marine environmental management? *Frontiers in Marine Science, 3,* 177. https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00177

Patrick, E., Girón Palacios, F. y Potts, M. D. (2026). Social-ecological drought and smallholder vulnerability in the Central American Dry Corridor. *Ecology and Society, 31*(1), 23. https://doi.org/10.5751/ES-16880-310123

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2022). *El Salvador actualiza sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas.* PNUD. https://www.undp.org/es/el-salvador/comunicados-de-prensa/el-salvador-presenta-actualizacion-de-su-compromiso-climatico-en-cumplimiento-del-acuerdo-de-paris

Quiroga Martínez, R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe.* CEPAL. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5502

Schlosberg, D. (2007). *Defining environmental justice: Theories, movements, and nature.* Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199286294.001.0001

Teddlie, C. y Tashakkori, A. (2009). *Foundations of mixed methods research: Integrating quantitative and qualitative approaches in the social and behavioral sciences.* SAGE Publications.

Unidad de Transacciones (UT). (2024). *Estadísticas del mercado eléctrico de El Salvador 2023.* UT ElSalvador. https://www.ut.com.sv/informes-de-mercado

United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Global Environment Outlook 6: Healthy planet, healthy people.* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108627146

Viceministerio de Transporte (VMT). (2023). E*stadísticas del parque vehicular registrado en El Salvador 2023.* Ministerio de Obras Públicas, Infraestructura, Vivienda y Desarrollo Urbano. https://observatoriovial.fonat.gob.sv/datos-estadisticos/

Yousafzai, S., Saeed, R., Rahman, G. y Farish, S. (2022). Spatio-temporal assessment of land use dynamics and urbanization: Linking with environmental aspects and DPSIR framework approach. *Environmental Science and Pollution Research,* 29(54), 81337-81350. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21393-6

Zhao, Y., Zhao, X., Fan, D. y Qiu, Y. (2023). A comprehensive method for refining essential SDGs variables for land degradation monitoring based on the DPSIR framework. *International Journal of Digital Earth, 16*(1), 741-761. https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2182375

https://doi.org/10.64385/JZTV4564
ISSN: 3007-9500 E-ISSN: 3007-9497