

Modelación económico-ambiental para el desarrollo sostenible: el caso de Guatemala

Renato Vargas

Tabla de contenidos

1	Introducción	1
2	¿Qué son los modelos económico-ambientales integrados?	3
2.1	El Sistema de Contabilidad Económico-Ambiental (SEEA)	3
2.2	Integrando economía y ambiente en los modelos económicos	4
2.3	¿Cómo funcionan estos modelos en la práctica?	4
2.4	Ventajas y limitaciones del enfoque	5
3	Aplicaciones prácticas en Guatemala y Latinoamérica	6
3.1	Eficiencia energética y capital natural: el caso de la leña en Guatemala	6
3.2	Cuando las políticas públicas compiten entre sí: el caso de los ODS	7
3.3	Cambio climático, sequía y vulnerabilidad económica	8
3.4	Descarbonización en Costa Rica	8
3.5	Desarrollo sostenible y capital natural en Colombia	9
3.6	Valoración de servicios ecosistémicos: La experiencia mexicana	10
3.7	Puntos de inflexión ambientales: Lecciones de la Amazonía	11
4	Síntesis: ¿Qué hemos aprendido?	12
5	Implicaciones para las políticas de desarrollo sostenible	13
5.1	El costo económico de la degradación ambiental	13
5.2	Co-beneficios: Políticas que generan múltiples dividendos	14
6	Diseñando transiciones sostenibles: Escenarios para Guatemala	14
7	Consideraciones importantes	15
8	Conclusiones y direcciones futuras	16
9	Referencias	18
	Bibliografía	18

1 Introducción

Guatemala enfrenta un dilema crítico que es compartido con muchos países en desarrollo: ¿cómo reducir la pobreza y generar crecimiento económico sin destruir los bosques, contaminar el agua y degradar los suelos que sustentan la economía? Esta es una pregunta que tiene un impacto sobre cada decisión de política pública, pues acciones como invertir en carreteras y regular la expansión agrícola tienen consecuencias económicas y ambientales que están profundamente entrelazadas.

Por ejemplo, cuando el gobierno decide construir una nueva carretera en un área remota de Petén, esa inversión no solo reduce los costos de transporte y conecta comunidades. También hace más rentable la agricultura en tierras remotas, lo cual puede generar empleo y mejorar la

oferta de alimentos, pero también puede acelerar la deforestación. El bosque que se pierde no es simplemente un conjunto de árboles, pues es también un almacén de carbono, un regulador del clima local, un hábitat para especies, y una fuente de servicios ecosistémicos que sostienen la productividad de la agricultura misma. ¿Cómo es posible evaluar si los beneficios económicos de corto plazo justifican estos costos ambientales de largo plazo?

Las herramientas tradicionales de análisis económico no fueron diseñadas para responder esta pregunta. Los modelos convencionales de crecimiento económico tratan los recursos naturales como una disponibilidad que está afuera del sistema económico principal. Pero los bosques de Guatemala no son secundarios, pues representan aproximadamente el 33% del territorio nacional y proveen servicios ecosistémicos críticos para sectores que generan una porción significativa del producto interno bruto (PIB). La degradación ambiental no es un efecto colateral. Al contrario, es una amenaza directa al desarrollo económico sostenible.

En este capítulo se explora la modelación económico-ambiental integrada como un método que combina modelos económicos con datos ambientales para analizar cómo las decisiones económicas y las dinámicas ambientales se influyen mutuamente a través del tiempo. En términos sencillos, estos modelos permiten simular los efectos encadenados de las políticas públicas, como inversiones en infraestructura, programas de conservación, o cambios en precios agrícolas, sobre la economía (producción, empleo, ingresos) y el ambiente (cobertura forestal, emisiones de carbono, disponibilidad de agua) simultáneamente.

Particularmente se explora aquí un cuerpo de trabajo desarrollado por más de una década dedicado a la aplicación de estos modelos para analizar preguntas críticas de política pública, tanto en Guatemala, como en otros países de Latinoamérica. Esta serie de trabajos han explorado desde el impacto económico del uso ineficiente de leña y sus efectos sobre la salud y los bosques (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Vargas, et al., 2019), hasta las conexiones entre agua, saneamiento y productividad económica (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al., 2019), pasando por los efectos del cambio climático y la sequía sobre la agricultura (Vargas et al., 2018). También ha servido para analizar estrategias de descarbonización en Costa Rica (Banerjee et al., 2024), el impacto de las estrategias ambientales posconflicto en Colombia (Banerjee et al., 2021), y la valoración de servicios ecosistémicos en programas de conservación en México (Banerjee et al., 2025), así como preguntas más ambiciosas como los riesgos de puntos de inflexión ambiental en la Amazonía (Banerjee et al., 2022). Los resultados han revelado patrones no intuitivos entre opciones de política que no son evidentes con métodos convencionales.

Este capítulo está organizado en cuatro secciones principales. Primero, se explica qué son los modelos económico-ambientales integrados y por qué son necesarios para entender el desarrollo sostenible. Segundo, se presenta las principales aplicaciones de estos modelos en Guatemala y la región, con un enfoque en las preguntas de política investigadas y los hallazgos clave. Tercero, se discute las implicaciones para las políticas de desarrollo sostenible, destacando tanto las oportunidades como los desafíos. Finalmente, se reflexiona sobre las limitaciones de estos enfoques y las direcciones futuras de investigación.

El objetivo principal de este capítulo es demostrar cómo estas herramientas pueden informar decisiones de política más inteligentes, reconociendo las conexiones fundamentales entre economía y ambiente, entendiendo los posibles compromisos entre opciones, los cuales son inevitables en lo que refiere al desarrollo sostenible.

2 ¿Qué son los modelos económico-ambientales integrados?

Para entender qué hace diferente a la modelación económico-ambiental integrada es necesario empezar con un concepto fundamental denominado capital natural. Así como una economía necesita capital físico (carreteras, fábricas, maquinaria) y capital humano (educación, habilidades, capacitación), también depende del capital natural el cual se compone de los ecosistemas y recursos naturales que proveen servicios esenciales. Los bosques filtran agua, los humedales regulan inundaciones, los suelos fértiles sustentan la agricultura. Estos no son lujos ambientales o estética del paisaje; son activos productivos cuyo nivel tienen impactos importantes en el desempeño económico del país.

Sin embargo, el Sistema de Cuentas Nacionales (SCN), el estándar internacional para medir la actividad económica no toma en cuenta la degradación de los servicios ecosistémicos como una disminución del desempeño económico. Al contrario, dentro de la lógica del SCN, cuando Guatemala pierde 1,000 hectáreas de bosque, el PIB sube y, en el corto plazo, el país muestra un desempeño económico positivo por la venta de madera y la conversión a agricultura que puede resultar en una mayor cantidad de productos agrícolas vendidos, pero las cuentas nacionales no registran la pérdida del activo forestal ni la degradación de los servicios ecosistémicos, que pueden afectar la productividad agrícola misma, por ejemplo. Podría explicarse como un restaurante que vende su parrilla, congeladores, mesas y sillas, mostrando así un gran ingreso de ventas. Sin embargo, en el próximo periodo contable no podrá cocinar o vender una sola hamburguesa al no contar con activos de trabajo.

2.1 El Sistema de Contabilidad Económico-Ambiental (SEEA)

Esta brecha ha sido reconocida por la comunidad internacional. En 2012, la ONU adoptó el Sistema de Contabilidad Económico-Ambiental (SEEA por sus siglas en inglés), el primer estándar internacional que integra el capital natural en las cuentas nacionales (Commission et al., 2013). El SEEA amplía el SCN tradicional organizando los datos económicos, sociales y ambientales en un marco común que permite rastrear cómo las actividades económicas dependen de y afectan al capital natural.

Para Guatemala, esto ha significado poder responder preguntas como: ¿cuánto valor económico genera la agricultura, pero a qué costo en términos de degradación del suelo y agotamiento del agua? ¿Cuáles son las existencias de capital natural del país y cómo están cambiando? Estas preguntas requieren un marco conceptual que trate la economía y el ambiente como sistemas interconectados, no como compartimientos separados. Guatemala ha sido pionera en la implementación de este sistema desde 2009, incluso antes de su oficialización como estándar estadístico, produciendo cuentas de bosque, recursos hídricos, recursos del subsuelo, energía y emisiones, tierra y ecosistemas, recursos pesqueros y acuícolas, residuos, así como gastos y transacciones ambientales (URL, 2009).

2.2 Integrando economía y ambiente en los modelos económicos

Alrededor de 2015, la existencia de un importante cúmulo de datos de cuentas ambientales para Guatemala, hizo posible hacer extensiones a un modelo de equilibrio general para tomar en cuenta la calidad ambiental como un factor de producción dentro de un marco armonizado, consistente con el Sistema de Cuentas Nacionales mismo. La **Plataforma de Modelación Económico-Ambiental Integrada (IEEM)**, por ejemplo, surgió como una herramienta analítica que hizo operativo el marco SEEA para el análisis de políticas haciendo uso de su estructura de datos (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Vargas, et al., 2019). Muchos otros modelos han añadido extensiones ambientales a sus modelos desde entonces. IEEM combinó desde su concepción tres componentes principales.

1. **Modelos de equilibrio general computable (CGE):** Estos modelos representan toda la economía como una serie de ecuaciones que explican el comportamiento de agentes dentro de un sistema interconectado de mercados en el que se relacionan a través de transacciones económicas. Capturan cómo un shock en un sector; por ejemplo, un aumento en los costos de combustible; se propaga a través de la economía afectando precios, producción, empleo e ingresos en otros sectores. Los modelos CGE son especialmente útiles para analizar políticas que afectan múltiples sectores simultáneamente.
2. **Módulos biofísicos y de servicios ecosistémicos:** Estas importantes adiciones modelan procesos ecológicos específicos y los servicios que proveen. Por ejemplo, modelos hidrológicos que calculan cómo los cambios en cobertura forestal afectan la disponibilidad de agua; modelos de carbono que estiman emisiones y secuestro de este gas; modelos de polinización que evalúan los impactos sobre la productividad agrícola.
3. **Modelos espacialmente explícitos de cambio de uso de suelo:** Estos modelos predicen dónde y cuándo ocurrirán cambios en el uso del suelo (deforestación, expansión agrícola, urbanización) en respuesta a cambios económicos. La dimensión espacial es crítica porque los servicios ecosistémicos dependen no solo de cuánto bosque hay, sino de dónde está ubicado.

2.3 ¿Cómo funcionan estos modelos en la práctica?

Para entender cómo se lleva a cabo un proceso de modelación de política pública con estos modelos, es posible ejemplificarlo con una evaluación hipotética de una política para duplicar la producción de café en Guatemala mediante subsidios e inversión en infraestructura rural. Un análisis económico tradicional calcularía los beneficios en términos de exportaciones, empleo e ingresos. Pero ¿qué costos ambientales podría tener esta expansión?

Con la modelación económica-ambiental integrada es posible simular esta política paso por paso. Primeramente, se explora los cambios económicos iniciales dentro del modelo económico. Los subsidios reducen los costos de producción de café y se calcula cómo esto afecta los precios relativos, la rentabilidad del café versus otros cultivos, y la demanda de tierra agrícola. Este último módulo es importante porque ofrece el vínculo con el modelo de cambio de uso del suelo. Indica la cantidad de tierra agrícola adicional que la economía necesita en unidades físicas (hectáreas, por ejemplo).

Con esta información, el modelo espacial predice dónde es más probable que se expanda el café, informándose de dónde se ha ubicado el café en el pasado, típicamente en tierras forestales en las zonas montañosas del occidente y áreas adyacentes a plantaciones existentes. Esta expansión implica deforestación y esto produce un nuevo mapa de uso del suelo hipotético. Este nuevo mapa se provee como insumo a los módulos biofísicos, los cuales calculan las consecuencias que se materializan como una pérdida de almacenamiento de carbono, una reducción en la regulación hídrica (que puede afectar el suministro de agua para ciudades y agricultura río abajo) y una disminución en hábitat para especies polinizadoras, por ejemplo.

Estos cambios ambientales tienen efectos económicos. La reducción en regulación hídrica puede aumentar los costos de tratamiento de agua potable o reducir la productividad en cultivos de riego. La disminución en la polinización tiene un impacto directo en la productividad agrícola o un aumento en los costos de fertilización. El modelo CGE incorpora estos efectos.

Finalmente, se compara varios escenarios. ¿Los beneficios económicos de la expansión cafetalera superan los costos cuando se contabiliza la degradación del capital natural y la pérdida de servicios ecosistémicos? ¿Existen estrategias alternativas, como intensificar la producción en tierras ya cultivadas en lugar de expandir la frontera agrícola, que generen beneficios económicos similares con menores costos ambientales?

La esencia de la modelación económico-ambiental integrada es hacer explícitas las conexiones entre economía y ambiente, así como evaluar políticas desde una perspectiva multidimensional que reconoce que el desarrollo sostenible requiere balancear objetivos económicos, sociales y ambientales.

2.4 Ventajas y limitaciones del enfoque

Las ventajas principales de modelos económicos y ambientales integrados como IEEM son su capacidad de evaluar múltiples objetivos de política simultáneamente, como el crecimiento económico, la reducción de pobreza y la conservación ambiental; identificar sinergias y compromisos entre objetivos; cuantificar impactos en unidades económicas familiares (dinero, número de empleos) y biofísicas (hectáreas, toneladas de carbono, metros cúbicos de agua); y evaluar políticas en horizontes de tiempo largo donde los efectos ambientales se vuelven económicamente significativos.

Sin embargo, estos modelos tienen limitaciones importantes que hay que reconocer. Primero, requieren datos extensos y de alta calidad sobre la economía, los recursos naturales y las relaciones entre ambos. Segundo, siempre simplifican la realidad compleja, pues no pueden capturar todos los procesos ecológicos o todas las decisiones individuales. Tercero, sus predicciones dependen de supuestos de racionalidad sobre cómo las personas y las empresas responderán a cambios de política; supuestos que pueden ser incorrectos. Finalmente, no capturan valores no económicos como la importancia cultural o espiritual de ciertos paisajes o especies.

A pesar de estas limitaciones, estos modelos representan un avance significativo sobre métodos que ignoran completamente las conexiones entre economía y ambiente. A continuación, se mostrará cómo han sido aplicado estos modelos en Guatemala y en otros países latinoamericanos y qué se ha aprendido sobre las políticas de desarrollo sostenible.

3 Aplicaciones prácticas en Guatemala y Latinoamérica

3.1 Eficiencia energética y capital natural: el caso de la leña en Guatemala

Uno de nuestros primeros análisis aplicó la plataforma IEEM para estudiar el sector de leña en Guatemala (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Vargas, et al., 2019) cuyo extenso uso culturalmente arraigado tiene implicaciones profundas para la economía, la salud pública y los bosques. La leña es la principal fuente de energía para cocinar en los hogares rurales guatemaltecos, representando aproximadamente el 60% del consumo energético residencial. Pero su uso ineficiente en fogones abiertos o estufas tradicionales tiene múltiples costos ocultos con una naturaleza claramente multidimensional.

Primero, el uso ineficiente acelera la deforestación, pues como han revelado las cuentas ambientales (URL, 2009) Guatemala pierde decenas de miles de hectáreas de bosque anualmente, en parte para satisfacer la demanda de leña. Segundo, la combustión incompleta genera contaminación intradomiciliar severa, causando enfermedades respiratorias que afectan especialmente a mujeres y niños. Tercero, estos problemas de salud reducen la productividad laboral y aumentan los gastos médicos de los hogares, contribuyendo a la perpetuación de la pobreza.

Por esa razón se aplicó el modelo de equilibrio general computable integrado IEEM descrito anteriormente, alimentado con los datos de las cuentas ambientales de Guatemala para evaluar una política de promoción de estufas mejoradas con mayor eficiencia energética (40-50% de reducción en consumo de leña). El modelo captura tanto los efectos directos (menor consumo de leña, menor deforestación) como los efectos indirectos a través de toda la economía (mejoras en salud que aumentan productividad laboral, cambios en precios relativos, reubicación de recursos entre sectores).

Los resultados demostraron que esta política genera múltiples dividendos económicos, pues en la simulación la reducción en enfermedades respiratorias aumentó la productividad laboral, especialmente en hogares pobres. El modelo proyectó aumentos en el bienestar de los hogares, medido a través de sus niveles de consumo, de aproximadamente 0.20% en el escenario de mayor eficiencia. Sectores económicos críticos como el de cereales y ganadería vieron aumentos en su valor de producción del orden de 0.28% y 0.19% respectivamente. Y la política ayudó a mitigar la pérdida del activo forestal, con el potencial de evitar la pérdida de hasta 500,000 hectáreas durante el período de análisis.

Estos números pueden parecer pequeños en términos porcentuales, pero traducidos a la economía real de Guatemala representan cientos de millones de quetzales en valor presente neto (es decir la capacidad descontada al presente del activo forestal de seguir generando ingresos en el futuro). Más importante aún, el análisis demostró que las inversiones en eficiencia energética y salud no son simples acciones “cosméticas” que compiten con el desarrollo económico. Al contrario, son inversiones productivas que generan retornos económicos directos además de beneficios ambientales.

3.2 Cuando las políticas públicas compiten entre sí: el caso de los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por Naciones Unidas en 2015 establecen 17 objetivos interconectados que van desde erradicar la pobreza hasta combatir el cambio climático (Nations, 2015). Los objetivos muestran metas claras y deseables para la humanidad, pero es importante entender cómo interactúan estos objetivos en la práctica, pues dado su extenso alcance, es posible que existan sinergias donde el progreso en un objetivo facilita el avance de otros, pero al mismo tiempo pueden existir tensiones en que perseguir un objetivo dificulte alcanzar otros.

En Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al. (2019) se aplicó un modelo económico y ambiental integrado para analizar las conexiones entre el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento), el ODS 2 (Hambre Cero), y el ODS 8 (Trabajo Decente y Crecimiento Económico) en Guatemala. Este análisis fue particularmente relevante porque estos tres objetivos compiten por recursos fiscales e hídricos escasos, pero también pueden reforzarse mutuamente si se gestionan inteligentemente.

Para hacer esta evaluación se construyó una serie de escenarios de política que representaban diferentes estrategias para alcanzar estos ODS. Un escenario enfatizaba la expansión agrícola para mejorar la seguridad alimentaria (ODS 2), lo que generaba crecimiento económico (ODS 8) pero aumentaba la extracción de agua y potencialmente degradaba la calidad del agua (tensión con ODS 6). Otro escenario priorizaba inversiones en agua potable y saneamiento (ODS 6), lo que mejoraba la salud y la productividad laboral, generando co-beneficios para el crecimiento económico (ODS 8).

Los resultados revelaron tanto sinergias como tensiones importantes. Mejorar el acceso a agua segura y saneamiento básico generó beneficios simultáneos significativos en las simulaciones, pues los hogares más sanos dedicaron más tiempo al trabajo productivo y menos a cuidar enfermos, aumentando los ingresos y reduciendo la pobreza. Los niños con menos enfermedades diarreicas asistieron más a la escuela, mejorando el capital humano futuro. Estos efectos se propagaron a través de la economía, generando un crecimiento adicional.

Sin embargo, también se identificaron tensiones reales, pues la expansión agrícola agresiva, relacionada especialmente con agricultura de riego, puede mejorar la seguridad alimentaria en el corto plazo pero degradar los recursos hídricos si no se gestiona cuidadosamente en el largo plazo. En cuencas bajo estrés hídrico existente en el presente, la competencia entre usos agrícolas, industriales y domésticos del agua puede intensificarse, potencialmente comprometiendo el ODS 6.

El mensaje clave es que alcanzar los ODS requiere planificación integrada, no esfuerzos sectoriales aislados. Por ejemplo, las políticas para mejorar la seguridad alimentaria (ODS 2) deben diseñarse considerando sus impactos sobre recursos hídricos. Priorizar cultivos con menor requerimiento hídrico, mejorar la eficiencia del riego, y proteger cuencas críticas puede permitir avanzar en seguridad alimentaria sin comprometer el agua. Similarmente, las inversiones en agua y saneamiento (ODS 6) deben reconocerse como inversiones productivas que generan beneficios económicos amplios, no solo como gastos sociales.

3.3 Cambio climático, sequía y vulnerabilidad económica

Guatemala es altamente vulnerable al cambio climático. Su economía depende significativamente de la agricultura, la cual representa aproximadamente el 13% del PIB y emplea cerca del 30% de la fuerza laboral, y este sector es extremadamente sensible a cambios en temperatura y precipitación. En Vargas et al. (2018), se usó un modelo económico extendido ambientalmente para entender cómo las sequías proyectadas bajo diferentes escenarios de cambio climático afectarían la economía guatemalteca.

Tomando como base los resultados de modelos climáticos regionalizados se tradujo los posibles cambios en precipitación y temperatura en impactos sobre la productividad agrícola por cultivo y región geográfica. Estos shocks de productividad se alimentaron al modelo CGE para analizar cómo se propagarían a través de toda la economía.

En el caso de un incremento sostenido en la temperatura promedio, la agricultura sería el sector más impactado por las sequías proyectadas por su alto uso directo de agua y su sensibilidad climática. Pero los efectos no se limitan a ese sector. La reducción en producción agrícola aumenta los precios de alimentos, afectando la seguridad alimentaria urbana y rural. El empleo rural disminuye, potencialmente acelerando la migración hacia ciudades o al exterior. Los sectores agroindustriales vinculados con el procesamiento de alimentos y las exportaciones agrícolas también se verían afectados por la reducción en materias primas disponibles.

El análisis también reveló diferencias regionales importantes. Las tierras altas occidentales, donde se concentra la producción de café y hortalizas, son particularmente vulnerables a cambios en patrones de precipitación. Además, el corredor seco, el cual es ya una región que sufre sequías recurrentes, enfrentaría riesgos aún mayores bajo el cambio climático proyectado.

Este trabajo subraya la urgencia de desarrollar estrategias de adaptación climática para la agricultura guatemalteca, para lo cual las prioridades incluyen infraestructura de almacenamiento y distribución de agua para amortiguar la variabilidad en precipitación; variedades de cultivos tolerantes a sequía y calor; diversificación de cultivos y fuentes de ingreso rural para reducir dependencia de cultivos climáticamente sensibles; sistemas de alerta temprana y seguros agrícolas basados en índices climáticos; y un marco regulatorio claro para la distribución de agua entre diferentes usuarios (doméstico, agrícola, industrial, ambiental) que funcione efectivamente en períodos de escasez.

Críticamente, el análisis demostró que el costo de no actuar, en términos de pérdidas económicas futuras por sequías y reducción de productividad, excede significativamente el costo de las inversiones en adaptación. Esto pone en evidencia que la adaptación climática no es opcional. Al contrario es una necesidad económica.

3.4 Descarbonización en Costa Rica

Los modelos económicos y ambientales integrados descritos arriba también han sido utilizados para analizar experiencias en países vecinos que ofrecen lecciones valiosas. En Costa Rica se evaluó la estrategia de descarbonización de ese país para el sector AFOLU (Agricultura, Silvicult-

tura y Otros Usos de la Tierra); sectores responsables de aproximadamente 40% de las emisiones nacionales de ese país (Banerjee et al., 2024).

Costa Rica se comprometió a alcanzar emisiones netas cero para 2050 y necesitaba identificar las opciones más costo-efectivas para el sector AFOLU. Con el uso de modelación económica y ambiental integrada, se evaluó diversos instrumentos como impuestos al carbono; incentivos para reforestación y restauración de tierras degradadas; inversiones en agricultura sostenible y ganadería baja en carbono; así como protección de bosques existentes.

Un hallazgo central de ese análisis fue que muchas opciones de mitigación generan beneficios económicos y ambientales significativos más allá de la reducción de emisiones. Las políticas de restauración forestal no solo secuestran carbono; también mejoran la regulación hídrica, la cual es crítica para hidroelectricidad y agricultura, controlan la erosión, y conservan biodiversidad. Cuando estos beneficios se valoran económicamente, el “costo” de mitigación se reduce dramáticamente o incluso se vuelve negativo.

La intensificación sostenible de la ganadería mediante mejoras en pasturas, sistemas silvopastoriles, y mejor manejo del hato ganadero puede reducir emisiones de metano al mismo tiempo que aumenta la productividad y los ingresos de los productores. Esto rompe la falsa dicotomía que contrapone la mitigación climática y el desarrollo económico.

El análisis también demostró que los instrumentos de mercado, como impuestos al carbono combinados con subsidios para prácticas sostenibles, son generalmente más costo-efectivos que regulaciones rígidas, porque permiten flexibilidad para que los productores encuentren las opciones de menor costo en sus circunstancias específicas.

Con una estructura económica y un sector AFOLU similar al de Costa Rica, estas lecciones son directamente aplicables a Guatemala. Una estrategia de descarbonización bien diseñada no requiere sacrificar el desarrollo rural, pues puede fortalecerlo si se enfoca en opciones que generen beneficios económicos y ambientales. Guatemala podría beneficiarse enormemente de desarrollar una estrategia similar, adaptada a sus circunstancias específicas.

3.5 Desarrollo sostenible y capital natural en Colombia

El uso de modelos económicos y ambientales integrados también ha permitido analizar la trayectoria de desarrollo territorial en Colombia tras el acuerdo de paz (Banerjee et al., 2021). En ese contexto se evaluaron distintos escenarios de uso del suelo y desarrollo rural para entender cómo las decisiones de política afectan tanto la economía como el capital natural del país. Colombia es uno de los países más biodiversos del mundo y gran parte de sus emisiones y presiones ambientales provienen de la deforestación y de la expansión de la frontera agropecuaria, especialmente en zonas rurales afectadas por el conflicto armado.

El análisis mostró que continuar con las tendencias recientes de deforestación puede generar aumentos modestos en el PIB en el corto plazo, debido a que la tala de bosques y la expansión agropecuaria elevan la actividad económica medida en términos convencionales. Sin embargo, al considerar indicadores más amplios de riqueza que incluyen el capital natural, como los bosques, el agua y los servicios ecosistémicos, se observa que estas ganancias son temporales y pueden

implicar pérdidas económicas significativas en el largo plazo. La degradación ambiental reduce la base de recursos que sustenta la producción futura y el bienestar de las comunidades rurales (Banerjee et al., 2021).

Los resultados indican que políticas orientadas a reducir la deforestación, mejorar la planificación del uso del suelo y aumentar la productividad agrícola pueden generar una trayectoria de desarrollo más próspera y sostenible. La combinación de menor deforestación con mejoras en la productividad agropecuaria permite mantener la producción y los ingresos rurales sin necesidad de expandir la frontera agrícola, al tiempo que protege la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Bajo este enfoque, la riqueza nacional total, considerando capital natural, humano y productivo, aumenta de forma sustancial en comparación con un escenario de continuidad de la deforestación (Banerjee et al., 2021).

Una lección central del caso colombiano es que el PIB por sí solo puede dar señales engañosas sobre el desempeño económico, especialmente en contextos donde el crecimiento se basa en la degradación de recursos naturales. Incorporar métricas de riqueza y capital natural en la planificación pública permite identificar políticas que generan beneficios económicos duraderos, reducen la pobreza rural y fortalecen la sostenibilidad del desarrollo. Estas conclusiones son relevantes para otros países de la región, incluyendo a Guatemala, que enfrentan presiones similares sobre sus bosques y territorios rurales, y que buscan estrategias de desarrollo que concilien crecimiento económico, bienestar social y conservación ambiental.

3.6 Valoración de servicios ecosistémicos: La experiencia mexicana

Un trabajo más reciente en México (Banerjee et al., 2025) demostró cómo integrar la valoración monetaria de servicios ecosistémicos a nivel de cuenca con análisis macroeconómico para evaluar programas de conservación. México ha invertido significativamente en una estrategia denominada Pago por Servicios Ambientales (PSA) y programas de restauración ecológica, pero históricamente estas inversiones se han justificado principalmente con argumentos ambientales. La pregunta obligada circula, entonces, alrededor de si estos programas generan retornos económicos que justifiquen la inversión pública que representan.

Para este análisis se desarrolló un enfoque que combina tres niveles de análisis. En primer lugar se realiza una valoración biofísica, cuantificando cómo la conservación y restauración afectan la provisión de servicios ecosistémicos como regulación hídrica, control de erosión, recreación y turismo. Seguidamente se hace una valoración monetaria, traduciendo estos cambios biofísicos en valores económicos usando métodos de valoración establecidos. Finalmente, se conduce un análisis macroeconómico, incorporando estos valores en las cuentas nacionales y modelos CGE para evaluar los impactos sobre el PIB, empleo, y el bienestar agregado.

Los resultados mostraron que cuando se contabiliza de manera integral los servicios ecosistémicos, muchos programas de conservación que otrora parecieran gasto no productivo muestran retornos positivos a la inversión pública. Los beneficios económicos que ofrece la existencia de agua más confiable y de mejor calidad para ciudades y agricultura, la reducción en daños por erosión e inundaciones y el aumento en el turismo, exceden los costos de esos programas cuando se evalúan en horizontes temporales apropiados de décadas, no años.

Críticamente, estos beneficios no son solo “ambientales”, pues se traducen en un PIB más alto, mayor empleo, y mejores niveles de vida. La conservación y restauración ecológica, cuando se hacen estratégicamente en áreas que proveen servicios ecosistémicos valiosos, son inversiones productivas que aumentan la riqueza nacional, no gastos que la reducen.

Este enfoque metodológico es directamente replicable en Guatemala. El país ya tiene experiencias con PSA (PINFOR, PINPEP, PROBOSQUE) y un sistema de áreas protegidas, pero las evaluaciones económicas han sido limitadas. Una evaluación integral que capture tanto los beneficios directos para participantes como los beneficios indirectos para usuarios de agua, agricultura, turismo y otros sectores podría demostrar que escalar estos programas es económicamente justificable en el largo plazo.

Por ejemplo, proteger los bosques nubosos en las tierras altas del occidente no solo conserva biodiversidad, sino asegura el suministro de agua para millones de personas y para agricultura de alto valor en las zonas bajas. Valorar económicamente estos servicios hídricos probablemente demostraría que los pagos por conservación son una inversión con retorno positivo, no un costo neto como se presume en el corto plazo.

3.7 Puntos de inflexión ambientales: Lecciones de la Amazonía

La modelación económica y ambiental integrada ha servido para hacer evaluaciones regionales importantes de las cuales Guatemala se puede beneficiar. Por ejemplo, se condujo un análisis multipaís sobre los costos económicos de un “punto de inflexión” ambiental en la Amazonía y los países que la conforman (Banerjee et al., 2022), el cual ofrece lecciones importantes sobre riesgos que también aplican a Guatemala. Un punto de inflexión es un umbral más allá del cual un sistema ambiental experimenta cambios abruptos y potencialmente irreversibles.

La Amazonía transporta humedad desde el Atlántico hacia el interior del continente a través de un proceso conocido como “ríos voladores” a través de los cuales la evapotranspiración del bosque alimenta lluvias en regiones distantes. Los científicos han advertido que si la deforestación amazónica supera cierto umbral, estimado entre 20-25% del área original, el sistema podría colapsar, pues menos bosque se traduce en menos evapotranspiración, lo cual reduce la precipitación y, a su vez, hace más difícil que el bosque se regenere, acelerando aún más la pérdida forestal. Este círculo vicioso podría transformar partes de la Amazonía en sabana o pastizales en tan solo décadas.

A través de dicho estudio (Banerjee et al., 2022), se analizó las consecuencias económicas de este escenario. Los resultados muestran que la reducción en precipitación regional afectaría severamente la agricultura en vastas áreas de Sudamérica, más allá de la Amazonía, en regiones agrícolas productivas que dependen de esa humedad. Los costos económicos serían enormes, medidos en cientos de miles de millones de dólares en pérdidas de productividad agrícola, sin mencionar los impactos sobre biodiversidad, poblaciones indígenas, y el clima global, del cual la Amazonía es un importante mecanismo regulador.

Aunque los bosques guatemaltecos son órdenes de magnitud más pequeños que la Amazonía, el concepto de puntos de inflexión es relevante. Ciertas cuencas hidrográficas pueden tener umbrales críticos de cobertura forestal más allá de los cuales la regulación hídrica se degrada abruptamente. Por ejemplo, si la deforestación en las tierras altas occidentales supera cierto nivel, la infiltración

de agua podría reducirse tanto que los manantiales y ríos que alimentan sistemas de riego y agua potable río abajo podrían secarse, con consecuencias económicas severas para las regiones de costa y bocacosta de gran importancia para la agroindustria de alto valor en el país.

La lección es aplicar un “principio de precaución” en áreas ecológicamente críticas. Una vez que se cruzan ciertos umbrales, los impactos pueden ser desproporcionados y muy difíciles o imposibles de revertir. Identificar y proteger estas áreas críticas en cuencas altas, bosques nubosos y corredores fluviales debe ser una prioridad de conservación y regulación.

4 Síntesis: ¿Qué hemos aprendido?

Las aplicaciones en Guatemala y Latinoamérica muestran varios patrones consistentes:

1. **Las conexiones economía-ambiente son fundamentales, no secundarias:** Ignorar estas conexiones lleva a políticas mal diseñadas con consecuencias no intencionadas. El uso ineficiente de leña no solo causa deforestación; también genera costos masivos de salud que reducen la productividad económica (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Vargas, et al., 2019). Las políticas de seguridad alimentaria que ignoran recursos hídricos pueden obstaculizarse a si mismas (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al., 2019). Las estrategias de desarrollo que no consideran el cambio climático están condenadas al fracaso (Vargas et al., 2018).
2. **Los co-beneficios son la norma, no la excepción:** Prácticamente todas las políticas ambientales bien diseñadas analizadas generan múltiples dividendos económicos. Las estufas eficientes mejoran la salud y conservan los bosques. El agua limpia aumenta productividad y reduce la pobreza. La agricultura sostenible reduce las emisiones y aumenta ingresos. Estos beneficios adicionales a menudo justifican las políticas incluso antes de considerar los beneficios ambientales directos. Además, su naturaleza económica hacen que sea más fácil utilizarlos en el proceso de negociación social para su implementación.
3. **El espacio y el contexto importan críticamente:** Dónde ocurren las actividades económicas y los cambios ambientales es tan importante como su cuantía. Un bosque en una cuenca alta crítica vinculada a un áreas urbanas aguas abajo importantes tiene un valor de servicios ecosistémicos muy diferente que uno en tierras remotas. Las políticas efectivas deben ser espacialmente específicas, no uniformes.
4. **El largo plazo es muy diferente del corto plazo:** Muchas políticas ambientales tienen costos en el corto plazo pero generan beneficios sustanciales en el largo plazo. La conservación puede frenar cierto crecimiento inmediato pero asegurar la sostenibilidad en un horizonte de décadas. Los análisis de corto plazo sistemáticamente subvaloran las políticas de sostenibilidad.
5. **Los puntos de inflexión son riesgos reales:** Ciertos umbrales de degradación ambiental pueden tener consecuencias desproporcionadas y potencialmente irreversibles (Banerjee et al., 2022). Esto justifica un enfoque precautorio en áreas ecológicamente críticas.
6. **Las experiencias regionales ofrecen lecciones valiosas:** Guatemala puede aprender de países vecinos. Costa Rica demuestra que la descarbonización puede ser compatible con el desarrollo económico (Banerjee et al., 2024). México muestra que los programas de conserva-

ción pueden generar retornos económicos positivos (Banerjee et al., 2025). La colaboración y aprendizaje regional son esenciales.

En la siguiente sección, traducimos estos hallazgos en implicaciones concretas para las políticas de desarrollo sostenible en Guatemala.

5 Implicaciones para las políticas de desarrollo sostenible

5.1 El costo económico de la degradación ambiental

Uno de los aportes más importantes de la modelación económica y ambiental integrada es hacer visible y cuantificable algo que tradicionalmente se ignoraba relacionado con el costo económico de no actuar para proteger el capital natural. Este “costo de la inacción” es la diferencia entre el bienestar económico futuro bajo un escenario de gestión sostenible versus uno donde se continúa con las tendencias actuales de degradación.

Por ejemplo, en el caso de la leña en Guatemala (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al., 2019), el uso ineficiente de leña no solo acelera la deforestación; también tiene costos severos de salud por la contaminación intradomiciliar, particularmente para mujeres y niños que pasan horas cerca del fuego. La reducción en enfermedades respiratorias aumentó la productividad laboral de los hogares rurales, especialmente en hogares pobres donde estos efectos son más severos.

Un patrón similar emergió en el análisis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con agua limpia y saneamiento (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al., 2019). Mejorar el acceso a agua segura para beber y saneamiento básico genera beneficios adicionales significativos en salud y productividad laboral y el capital humano. Los hogares que no deben preocuparse por enfermedades transmitidas por agua pueden dedicar más tiempo al trabajo productivo y a la educación.

En el análisis de cómo las sequías y la reducción en la productividad agrícola causadas por el cambio climático afectarían la economía guatemalteca (Vargas et al., 2018), los resultados relacionados con la reducción en el empleo rural, el aumento en los precios de los alimentos y la presión sobre la seguridad alimentaria, mostraron la urgencia de desarrollar un marco regulatorio adecuado para la distribución de agua entre diferentes categorías de usuarios, combinado con inversiones en infraestructura de almacenamiento y tecnologías de ahorro de agua. El costo de no actuar en términos de pérdidas económicas futuras excede por mucho el costo de las inversiones necesarias.

El trabajo regional sobre los costos económicos de un “punto de inflexión” ambiental (Banerjee et al., 2022) ofrece lecciones relevantes. Las consecuencias económicas de la pérdida irreversible del ecosistema amazónico, mostrando cómo la deforestación extrema puede reducir la precipitación regional, por pérdida del transporte de humedad, con impactos en la productividad agrícola de toda la región. Para Guatemala, la lección es clara: ciertos umbrales de degradación pueden tener consecuencias no lineales y potencialmente irreversibles. Una vez que se pierde cierta masa crítica de bosque, los efectos sobre el clima local, el ciclo hidrológico y la productividad agrícola pueden ser desproporcionadamente severos.

5.2 Co-beneficios: Políticas que generan múltiples dividendos

Una implicación central de todo este cuerpo de trabajo está relacionada con que las políticas ambientales bien diseñadas no son un solo un costo neto para la economía pues generan múltiples dividendos o beneficios adicionales que a menudo exceden los costos de implementación.

Las políticas de restauración forestal no solo secuestran carbono; también contribuyen a la regulación hídrica, el control de erosión, y al aumento de la biodiversidad. Cuando estos co-beneficios se valoran económicamente, el “costo” de mitigación efectivamente se reduce o incluso se vuelve negativo en algunos casos.

La intensificación sostenible de la ganadería mediante mejoras en pasturas, manejo del hato, y sistemas silvopastoriles puede reducir emisiones de metano mientras aumenta la productividad y los ingresos de los productores.

Los instrumentos de mercado como impuestos al carbono combinados con subsidios para prácticas sostenibles son generalmente más costo-efectivos que regulaciones rígidas, porque permiten flexibilidad para que los productores encuentren las opciones de menor costo en sus circunstancias específicas.

Los programas de conservación como Pago por Servicios Ambientales (PSA) y restauración ecológica también suponen beneficios económicos de los servicios ecosistémicos mejorados en términos de regulación hídrica, control de la erosión y recreación que exceden los costos de los programas de conservación cuando se contabilizaron en el PIB y la riqueza nacional proyectada hacia el futuro en horizontes temporales de décadas.

6 Diseñando transiciones sostenibles: Escenarios para Guatemala

¿Cómo puede Guatemala transitar hacia un desarrollo más sostenible? Este cuerpo de trabajo sugiere que se requiere un portafolio de políticas cuidadosamente diseñado que aborde múltiples dimensiones simultáneamente y los modelos económicos y ambientales integrados ofrecen un laboratorio de pruebas que permite evaluar diferentes opciones antes de implementarlas. Estas evaluaciones muestran algunas opciones que pueden conformar este abanico de posibilidades de política pública a evaluar.

1. **Eficiencia energética en hogares rurales:** Escalar dramáticamente los programas de estufas mejoradas, combinados con fuentes alternativas de energía. Los co-beneficios en salud, productividad y conservación forestal justifican inversiones públicas sustanciales (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Vargas, et al., 2019).
2. **Gestión integrada de recursos hídricos:** Desarrollar un marco regulatorio claro para la distribución de agua entre usos doméstico, agrícola, industrial y ambiental, combinado con inversiones en infraestructura de almacenamiento y tecnologías de eficiencia. El cambio climático hace esto urgente (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al., 2019; Vargas et al., 2018).

3. **Intensificación sostenible de la agricultura:** Romper el vínculo entre crecimiento agrícola y expansión de la frontera mediante inversiones en productividad como el riego eficiente, las variedades mejoradas, las prácticas de conservación de suelos y la agroforestería. Esto requiere revitalizar los sistemas de investigación y extensión agrícola, históricamente debilitados en Guatemala.
4. **Conservación estratégica:** Expandir y fortalecer las áreas protegidas, especialmente en zonas críticas para servicios ecosistémicos como lo son las cuencas altas y los corredores biológicos. Combinar regulación estricta en áreas críticas con incentivos económicos como el PSA, el turismo y los productos forestales no maderables para comunidades locales.
5. **Infraestructura sostenible:** Evaluar todas las inversiones mayores en infraestructura como carreteras, hidroeléctricas y la expansión urbana con criterios ambientales explícitos. Algunas inversiones pueden justificarse plenamente; otras pueden requerir modificaciones de diseño para minimizar impactos; algunas pueden no ser justificables cuando se contabilizan todos los costos.
6. **Descarbonización del sector AFOLU:** Desarrollar una estrategia comprehensiva inspirada en el modelo costarricense (Banerjee et al., 2024), combinando reforestación, restauración de tierras degradadas, agricultura y ganadería baja en carbono, así como protección de bosques existentes. Esto no solo contribuye a compromisos climáticos internacionales; genera beneficios adicionales locales tangibles.

No todas estas políticas pueden implementarse simultáneamente con máxima intensidad. Los recursos fiscales son limitados, la capacidad institucional toma tiempo en construirse, y las transiciones demasiado rápidas pueden generar resistencia social. La modelación puede ayudar a identificar secuencias óptimas que permitan identificar qué políticas implementar primero para generar beneficios tangibles que faciliten políticas posteriores. Por ejemplo, comenzar con programas de eficiencia energética y mejoras en salud puede generar aumentos en productividad e ingresos rurales que, a su vez, reducen la presión sobre los bosques y crean condiciones políticas más favorables para expandir áreas de conservación.

7 Consideraciones importantes

Las experiencias mostradas también revelan limitaciones metodológicas importantes que deben reconocerse. En primer lugar, la modelación económico-ambiental integrada es intensiva en datos. Requiere no solo cuentas económicas tradicionales, sino también cuentas ambientales comprehensivas que cuantifiquen stocks de recursos naturales, flujos de servicios ecosistémicos, emisiones y contaminación, así como cambios en uso del suelo. Guatemala ha avanzado significativamente en desarrollar estas cuentas (URL, 2009) y debe continuar en esa vía.

Existe una necesidad de monitoreo continuo, pues los modelos se calibran con datos históricos, pero la realidad evoluciona. Para que la modelación siga siendo relevante, se requiere un sistema de monitoreo ambiental robusto y continuo que actualice regularmente las cuentas ambientales. Sin esto, los modelos pueden volverse obsoletos rápidamente.

Existe cierta incertidumbre paramétrica, pues muchas relaciones en los modelos, como por ejemplo, cómo los cambios en cobertura forestal afectan la precipitación local, o cómo los hogares responderán a incentivos económicos, están sujetas a cierta incertidumbre. Los resultados de modelos deben presentarse con rangos de confianza, no como predicciones exactas.

También existe una necesidad de integración del conocimiento local, pues los modelos capturan dinámicas agregadas, pero pueden omitir conocimiento local importante sobre prácticas de manejo de recursos, instituciones comunitarias, o valores culturales. La modelación debe complementarse con enfoques participativos que incorporen las perspectivas de las comunidades afectadas por las políticas.

A pesar de estas limitaciones, la modelación económico-ambiental integrada representa un avance significativo en la capacidad de analizar dilemas de desarrollo sostenible.

8 Conclusiones y direcciones futuras

Después de más de una década de investigación aplicando modelos económico-ambientales integrados en Guatemala y Latinoamérica muestran que el desarrollo sostenible no es una aspiración utópica ni un lujo para países altamente desarrollados. Es, en cambio, una necesidad económica práctica con implicaciones inmediatas. La degradación del capital natural relacionada con la deforestación, el agotamiento del agua, y la pérdida de suelos fértiles representa peso sobre el crecimiento económico y el bienestar humano. La modelación económico-ambiental integrada ayuda a traducir estas implicaciones en números concretos.

Los costos económicos de la inacción ambiental son cuantificables y, en muchos casos, superan ampliamente los costos de las políticas de conservación y gestión sostenible. Más aún, muchas políticas ambientales bien diseñadas generan beneficios económicos adicionales directos en términos de salud, productividad agrícola y regulación hídrica que justifican las inversiones incluso antes de considerar los beneficios ambientales.

La integración es indispensable, pues los modelos económicos que ignoran el ambiente, y los modelos ambientales que ignoran la economía, producen análisis incompletos y potencialmente engañosos. Las políticas efectivas deben diseñarse reconociendo explícitamente las conexiones bidireccionales entre sistemas económicos y ecológicos. Ignorar estas conexiones lleva a subvalorar dramáticamente los beneficios de políticas de eficiencia ambiental.

Los compromisos entre políticas son inevitables pero gestionables. Es iluso pretender que no existen tensiones reales entre objetivos de desarrollo. Conservar más bosque hoy puede significar menos empleo agrícola en el corto plazo. Pero estos compromisos entre políticas pueden minimizarse dramáticamente con acciones inteligentes. La intensificación agrícola sostenible, por ejemplo, puede generar más producción y empleo con menos deforestación. Los programas de pago por servicios ambientales pueden convertir la conservación en una actividad económicamente atractiva para los propietarios de tierra. La clave es planificar de manera integrada, buscando sinergias y diseñando compensaciones para los perdedores de las transiciones.

Hay que evaluar servicios ecosistémicos más allá del carbono. Los trabajos aquí mostrados han enfatizado el carbono forestal porque es relativamente fácil de medir y valorar económicamente.

Pero los bosques y otros ecosistemas proveen servicios mucho más diversos como la regulación hídrica, control de erosión, polinización, control de plagas, regulación de clima local, valores culturales y recreativos. Los modelos futuros deben incorporar estos servicios más integralmente.

Particularmente crítico para Guatemala es profundizar el análisis de recursos hídricos. Los trabajos mostrados (Onil Banerjee, Martin Cicowiez, Horridge, et al., 2019; Vargas et al., 2018) han comenzado a explorar estas conexiones, pero se requiere mucho más. Modelos hidrológicos espacialmente explícitos que capturen cómo los cambios en uso de suelo afectan la disponibilidad y calidad del agua, integrados con modelos económicos que representan los múltiples usos competitivos del agua (doméstico, agrícola, industrial, ambiental), son una prioridad urgente dado el estrés hídrico creciente que enfrenta el país.

Es importante pensar en la integración con la planificación nacional, pues es crucial pensar en cómo integrar estos análisis técnicos con los procesos reales de toma de decisiones. Los modelos económico-ambientales integrados pueden informar decisiones, pero son procesos políticos los que llevan a la toma real de decisiones. Para que este trabajo tenga impacto real, debe conectarse con los procesos de planificación nacional en planes de desarrollo, estrategias sectoriales, presupuestos públicos y evaluaciones de proyectos de inversión.

Los modelos futuros deben incorporar el cambio climático no como un escenario secundario, sino como una realidad central. Esto requiere integrar proyecciones climáticas regionalizadas con modelos económico-ambientales, y evaluar políticas no solo por su desempeño en condiciones históricas, sino por su capacidad de adaptación a un clima cambiante.

Una agenda de investigación y política para Guatemala en los próximos años podría incluir:

1. **Invertir en infraestructura de datos:** Fortalecer y mantener el sistema de cuentas ambientales, expandiéndolo para cubrir recursos hídricos, biodiversidad, y servicios ecosistémicos de manera integral.
2. **Institucionalizar la evaluación integrada:** Establecer requerimientos legales para que proyectos mayores de inversión pública y políticas sectoriales se evalúen con criterios económicos y ambientales integrados, no solo con análisis costo-beneficio tradicionales.
3. **Desarrollar escenarios de largo plazo:** Construir escenarios participativos de desarrollo sostenible para Guatemala hasta mediados de siglo, explorando diferentes visiones de futuro y sus implicaciones económicas, ambientales y sociales. Usarlos para informar planes nacionales de desarrollo y contribuciones climáticas.
4. **Pilotos y aprendizaje adaptativo:** Implementar programas piloto de políticas prometedoras, como la intensificación agrícola sostenible, pago por servicios ambientales, gestión integrada de cuencas, con monitoreo riguroso y evaluación de impacto. Lo importante será aprender de estos pilotos antes de elevar su implementación al nivel nacional.
5. **Colaboración regional:** Fortalecer la colaboración con otros países centroamericanos para compartir experiencias, metodologías y lecciones, pues muchos desafíos, como la migración climática, los corredores biológicos transfronterizos y las cuencas compartidas, no pueden resolverse a nivel nacional solamente.

9 Referencias

Bibliografía

- Banerjee, Onil, Cicowiez, Martin, Horridge, et al. (2019). Evaluating synergies and trade-offs in achieving the SDGs of zero hunger and clean water and sanitation: An application of the IEEM Platform to Guatemala. *Ecological Economics*, 161, 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.003>
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Macedo, M. N., Malek, Ž., Verburg, P. H., Goodwin, S., Vargas, R., Rattis, L., Bagstad, K. J., Brando, P. M., Coe, M. T., Neill, C., Marti, O. D., & Murillo, J. Á. (2022). Can we avert an Amazon tipping point? The economic and environmental costs. *Environmental Research Letters*, 17(12), 125005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca3b8>
- Banerjee, Onil, Cicowiez, Martin, Vargas, et al. (2019). The SEEA-Based Integrated Economic-Environmental Modelling Framework: An Illustration with Guatemala's Forest and Fuelwood Sector. *Environmental and Resource Economics*, 72(2). <https://doi.org/10.1007/s10640-017-0205-9>
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Vargas, R., Obst, C., Cala, J. R., Alvarez-Espinosa, A. C., Melo, S., Riveros, L., Romero, G., & Meneses, D. S. (2021). Gross domestic product alone provides misleading policy guidance for post-conflict land use trajectories in Colombia. *Ecological Economics*, 182, 106929. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106929>
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Torres-Rojo, J. M., Bagstad, K. J., Vargas, R., Edens, B., Salcone, J., Larrea, E. M. B. de, Lopez-Conlon, M., Rodríguez-Ortega, C., Torre-Bárcena, J. E. de la, Díaz-Núñez, V., & Guillen-Martin, F. (2025). Integrating Quantitative Macroeconomic and Ecosystem Service Modeling Methods to Assess Conservation Programs in Mexico. *Environmental and Resource Economics*, 88(7), 1995-2021. <https://doi.org/10.1007/s10640-025-00998-8>
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Vargas, R., Molina-Perez, E., Bagstad, K. J., & Malek, Ž. (2024). The economics of decarbonizing Costa Rica's agriculture, forestry and other land uses sectors. *Ecological Economics*, 218, 108115. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108115>
- Commission, E., Economic Cooperation and Development, O. for, Nations, U., & Bank, W. (2013). *System of Environmental-Economic Accounting 2012*.
- Nations, U. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution Adopted by the General Assembly on 25 September 2015, 42809, 1-13*.
- URL, I. Banguat y. (2009). *Compendio de cuadros estadísticos del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica Integrada de Guatemala (SCAEI) Periodo 2001-2006* (Número 24).
- Vargas, R., Cabrera, M., Cicowiez, M., Escobar, P., Hernández, V., Cabrera, J., & Guzmán, V. (2018). Climate risk and food availability in Guatemala. *Environment and Development Economics*, 23(5), 558-579. <https://doi.org/10.1017/S1355770X18000335>