

Markov Chain Modeling of Forest Cover Change and Forest Type Allocation (2000–2018) with a 2030 Projection

Elmer Molina Ramos¹; Henry Osorto²

¹Facultad de Postgrado, Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Honduras, elmer_amos@unitec.hn,
henry.osorto@unitec.edu.hn

²Universidad Nacional Autónoma de Honduras, UNAH, Honduras, henry.osorto@unah.edu.hn

Abstract– *This study examines the dynamics of forest cover in Honduras between 2000 and 2018 and projects its economic and environmental implications through 2030. Land-use transition matrices were constructed by harmonizing forest categories (coniferous, deciduous, broadleaf, mangrove, and non-forest areas), and Markov chain models were applied to estimate persistence, losses, and gains. Economic valuation integrated net carbon stocks (tCO₂/ha) and ecosystem services (USD/ha) under voluntary market scenarios. The findings reveal a sustained decline in forest cover, particularly within broadleaf and deciduous ecosystems, with significant negative impacts on carbon reserves and ecosystem service values. Projections to 2030 suggest that, if current trends persist, Honduras may experience a substantial reduction in forest cover and its associated economic value, underscoring the urgent need for integrated conservation strategies and strengthened public policy interventions.*

Keywords– *Markov chains; forest cover change; environmental economic valuation; forest carbon; territorial projection.*

Modelación mediante cadenas de Markov del cambio de cobertura forestal y la asignación de tipos de bosque (2000–2018) con proyección al 2030

Elmer Molina Ramos¹; Henry Osorto²

¹Facultad de Postgrado, Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Honduras, elmer_amos@unitec.hn, henry.osorto@unitec.edu.hn

²Universidad Nacional Autónoma de Honduras, UNAH, Honduras, henry.osorto@unah.edu.hn

Resumen— Esta investigación examina la dinámica de la cobertura forestal en Honduras entre 2000 y 2018 y proyecta sus implicaciones económicas y ambientales hacia 2030. Se emplearon matrices de transición de uso de suelo, homologando categorías de bosque (coníferas, deciduos, latifoliados, manglares y áreas sin cobertura), y se aplicaron modelos de Markov para estimar permanencias, pérdidas y ganancias. La valoración económica integró el carbono neto (tCO₂/ha) y los servicios ecosistémicos (USD/ha) bajo escenarios de mercado voluntario. Los hallazgos evidencian una pérdida sostenida de bosques, particularmente en ecosistemas latifoliados y deciduos, con impactos negativos significativos en las reservas de carbono y en el valor de los servicios ecosistémicos. Las proyecciones al 2030 sugieren que, de mantenerse las tendencias actuales, Honduras podría enfrentar una disminución sustancial de su cobertura forestal y del valor económico asociado, lo que subraya la necesidad urgente de intervenciones integradas de conservación y políticas públicas.

Palabras clave— Cadenas de Markov; cambio de cobertura forestal; valoración económica ambiental; carbono forestal; proyección territorial..

I. INTRODUCCIÓN

La cobertura forestal en Honduras ha experimentado transformaciones profundas durante las últimas décadas, con implicaciones directas sobre la provisión de servicios ecosistémicos, la estabilidad climática y la economía ambiental del país. Entre los años 2000 y 2018, diversos tipos de bosque en particular los bosques latifoliados y los manglares han mostrado tendencias persistentes de pérdida y fragmentación, asociadas a la expansión de la frontera agrícola, la ganadería extensiva, la extracción maderera y la presión demográfica. Estas dinámicas no solo afectan la biodiversidad, sino que comprometen funciones clave como la regulación hídrica, la captura de carbono y el sustento económico de comunidades rurales altamente dependientes de los recursos forestales.

A escala regional y global, la deforestación ha sido identificada como uno de los principales factores que intensifican el cambio climático y reducen la resiliencia de los ecosistemas. América Latina concentra algunas de las tasas más elevadas de pérdida de bosques, lo que ha motivado un creciente interés por desarrollar herramientas analíticas que permitan comprender la dinámica espacial y temporal del cambio de cobertura forestal, así como anticipar escenarios futuros bajo distintos supuestos de gestión y conservación. En

este contexto, la modelación de cambios de uso y cobertura del suelo mediante cadenas de Markov y matrices de transición se ha consolidado como un enfoque robusto para describir patrones históricos y proyectar probabilísticamente trayectorias futuras de transformación territorial.

De manera paralela, la valoración económica de los servicios ecosistémicos ha permitido ampliar la comprensión del impacto de la deforestación más allá de la pérdida física de cobertura forestal, incorporando dimensiones monetarias asociadas a la captura de carbono, la regulación climática y otros beneficios ambientales. La integración de estos enfoques ha demostrado ser particularmente relevante en el diseño de políticas públicas, esquemas de conservación y mecanismos de mercado voluntario de carbono. Sin embargo, en el caso hondureño, persiste una limitada disponibilidad de estudios que articulen de forma sistemática la dinámica forestal observada, la modelación probabilística de cambios futuros y la estimación económica de los servicios ecosistémicos asociados.

En particular, existe un vacío en el análisis diferenciado por tipo de bosque, en la construcción de matrices de transición a escala nacional y en la generación de proyecciones de mediano plazo que permitan evaluar escenarios de permanencia, pérdida y ganancia forestal hacia horizontes relevantes para la planificación, como el año 2030. Esta carencia restringe la capacidad de las instituciones públicas y privadas para diseñar estrategias de manejo forestal, conservación y mitigación del cambio climático basadas en evidencia cuantitativa y prospectiva.

Frente a este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la dinámica de los tipos de bosque en Honduras durante el período 2000–2018, utilizando cadenas de Markov para estimar matrices de transición y proyectar escenarios de cambio hacia 2030, incorporando además una valoración económica asociada al carbono y a servicios ecosistémicos seleccionados. El enfoque adoptado busca contribuir tanto al conocimiento científico como a la formulación de políticas públicas, integrando herramientas de análisis espacial, modelación probabilística y economía ambiental.

A partir de este objetivo general, el estudio se estructura en torno a las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuáles han sido las principales dinámicas de transición entre los distintos tipos de bosque en Honduras durante el período 2000–2018?
2. ¿Qué patrones probabilísticos de permanencia, pérdida y ganancia forestal se proyectan hacia el año 2030 a partir de las matrices de transición estimadas?
3. ¿Existen diferencias espaciales relevantes en la dinámica forestal a nivel departamental que permitan identificar zonas críticas de pérdida o recuperación?
4. ¿Cuáles son las implicaciones ambientales y económicas de los escenarios proyectados, particularmente en términos de captura de carbono y servicios ecosistémicos asociados?

En respuesta a estas preguntas, el estudio realiza las siguientes contribuciones principales:

- i. Construye matrices de transición de cobertura forestal a escala nacional, diferenciadas por tipo de bosque, para el período 2000–2018.
- ii. Genera proyecciones probabilísticas de la dinámica forestal hacia el año 2030 mediante el uso de cadenas de Markov.
- iii. Integra una valoración económica de la captura de carbono y servicios ecosistémicos seleccionados bajo escenarios de mercado voluntario.
- iv. Analiza la distribución espacial de los cambios forestales a nivel departamental, identificando patrones territoriales de pérdida y ganancia.
- v. Aporta un marco analítico replicable que vincula modelación probabilística y economía ambiental como insumo para la planificación territorial y las políticas de conservación en Honduras.

En conjunto, este enfoque busca ofrecer una visión integral y prospectiva de la dinámica forestal hondureña, proporcionando evidencia científica relevante en un contexto en el que las decisiones adoptadas durante la presente década resultarán determinantes para la sostenibilidad ambiental y económica del país hacia 2030.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A. Contexto general

En las últimas décadas, el análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo (LULC) ha adquirido un papel central en la investigación ambiental debido a su estrecha relación con la degradación de ecosistemas forestales, la alteración de procesos hidrológicos, la pérdida de servicios ecosistémicos y el incremento de riesgos ambientales. En este contexto, las cadenas de Markov particularmente en su formulación espacial mediante autómatas celulares (CA-Markov) se han consolidado como una herramienta fundamental para describir transiciones probabilísticas entre coberturas, reconstruir trayectorias históricas y proyectar escenarios futuros de transformación territorial [1], [2], [3].

La literatura reciente muestra una evolución clara desde aplicaciones descriptivas de Markov hacia marcos analíticos más complejos, en los que la proyección de cambios de cobertura forestal se vincula explícitamente con impactos hidrológicos, exportación de nutrientes, dinámica de lagos, riesgos de inundación, emisiones de carbono y provisión de servicios ecosistémicos [4], [5], [6]. Esta evolución responde a la necesidad de superar análisis puramente espaciales y avanzar hacia evaluaciones integradas que permitan interpretar las consecuencias funcionales de la pérdida o recuperación de coberturas forestales en distintos contextos biofísicos y socioeconómicos.

B. Enfoques Metodológicos

Desde el punto de vista metodológico, los estudios revisados convergen en el uso de esquemas Markovianos para estimar matrices de transición entre clases de uso del suelo, combinados con reglas espaciales que permiten asignar dichas transiciones en el territorio. En múltiples aplicaciones, el modelo CA-Markov se emplea como núcleo de la simulación, apoyado en series temporales de imágenes satelitales y métricas de validación como el coeficiente Kappa o análisis de sensibilidad [7].

Una tendencia metodológica destacada es la integración de CA-Markov con técnicas de aprendizaje automático, principalmente Random Forest y redes neuronales tipo MLP o ANN, con el objetivo de mejorar la clasificación histórica y la asignación espacial de las transiciones futuras [8], [9], [10]. Estos enfoques híbridos permiten capturar relaciones no lineales entre factores explicativos (proximidad a infraestructuras, topografía, densidad poblacional) y la dinámica de cambio, especialmente en paisajes forestales frágiles o sometidos a presiones antrópicas intensas.

Asimismo, varios estudios amplían el alcance de la modelación Markoviana mediante su acoplamiento con modelos hidrológicos y biofísicos. En este grupo se incluyen investigaciones que combinan CA-Markov con modelos como HYPE, SWAT, HBV o WASSI para evaluar cómo las transiciones de cobertura forestal influyen en la escorrentía, la recarga subterránea, el rendimiento hídrico o la exportación de nutrientes [4], [5], [11]. De manera complementaria, otros trabajos integran Markov con modelos de servicios ecosistémicos como InVEST o RUSLE, permitiendo traducir cambios espaciales en indicadores de carbono, retención de sedimentos, conservación del suelo y calidad del hábitat [12], [13], [14].

Los resultados reportados en la literatura muestran patrones recurrentes que resultan particularmente relevantes para el análisis de bosques. De forma consistente, los escenarios tendenciales proyectados mediante cadenas de Markov indican una reducción progresiva de coberturas forestales y naturales, acompañada por la expansión de áreas agrícolas, mineras, urbanas o de infraestructura, tanto en regiones protegidas como en cuencas abiertas [2], [3], [15]. Estas transiciones se asocian

con incrementos en la fragmentación del paisaje, pérdida de carbono almacenado y deterioro de funciones reguladoras.

En términos hidrológicos y biogeoquímicos, los estudios evidencian que los cambios en cobertura forestal modifican significativamente la dinámica de escorrentía, la exportación de nitrógeno y la estabilidad de cuerpos de agua, efectos que tienden a intensificarse cuando se consideran conjuntamente escenarios de cambio climático [4], [11]. En el ámbito de los servicios ecosistémicos, la reducción de bosques se vincula con disminuciones en la retención de sedimentos, el almacenamiento de carbono y la calidad del hábitat, mientras que los enfoques de restauración o protección forestal muestran potencial para revertir parcialmente estas tendencias bajo ciertos escenarios [13], [14]. No obstante, los propios estudios reconocen limitaciones recurrentes, entre ellas la dependencia de supuestos de estacionariedad en las matrices de transición, la incertidumbre asociada a escenarios de largo plazo y la dificultad para atribuir causalidad directa entre políticas específicas y cambios observados en la cobertura forestal [16], [17]. Estas limitaciones refuerzan la necesidad de interpretaciones prudentes y de complementar los resultados con análisis de sensibilidad y escenarios alternativos.

C. Síntesis de la Revisión de Literatura

En conjunto, la literatura revisada demuestra que las cadenas de Markov, especialmente en su versión espacial CA-Markov, constituyen una base metodológica sólida para analizar y proyectar cambios de cobertura forestal y otros usos del suelo. Su fortaleza radica en la capacidad de sintetizar información histórica, capturar probabilidades de transición y generar escenarios futuros coherentes, particularmente cuando se integran con modelos hidrológicos y de servicios ecosistémicos [5], [12], [18]. Sin embargo, persisten vacíos relevantes que justifican nuevas investigaciones. En particular, se identifica una necesidad de estudios que apliquen estos enfoques de manera sistemática para evaluar la dinámica de los tipos de bosque a escala nacional o regional, con horizontes temporales claramente definidos y proyecciones explícitas, y que vinculen los resultados probabilísticos de Markov con implicaciones ambientales y de gestión forestal. Asimismo, resulta pertinente profundizar en la interpretación de las matrices de transición como instrumentos analíticos para la planificación, más allá de su uso como herramientas predictivas, aspecto que el presente estudio busca abordar.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Fuentes de información

El análisis se fundamentó en datos oficiales del Instituto de Conservación Forestal (ICF) de Honduras para el período 2000–2018, que incluyen registros de pérdidas y ganancias de cobertura forestal por departamento y categoría de bosque. Los insumos provienen de imágenes satelitales con resolución de 30 m y área mínima de detección de 1 ha, generadas a partir de mosaicos libres de nubes de Landsat 5, 7 y 8, bajo la definición oficial de bosque para Honduras, lo que asegura consistencia

metodológica y credibilidad de los resultados. [30], [31], [32], [33]. Las categorías se homologaron en cinco grupos principales: bosque conífero, bosque deciduo, bosque latifoliado, manglar y no cobertura. Esta clasificación permitió estandarizar los análisis y construir matrices de transición consistentes.

B. Estrategia de análisis con Matrices de Transición

El análisis de la dinámica de los cambios de uso se hace asumiendo que la dinámica puede explicarse como un proceso estocástico, mediante una cadena de Markov de primer orden:

$$\pi_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \cdot P_{ij}(t, t+1)$$

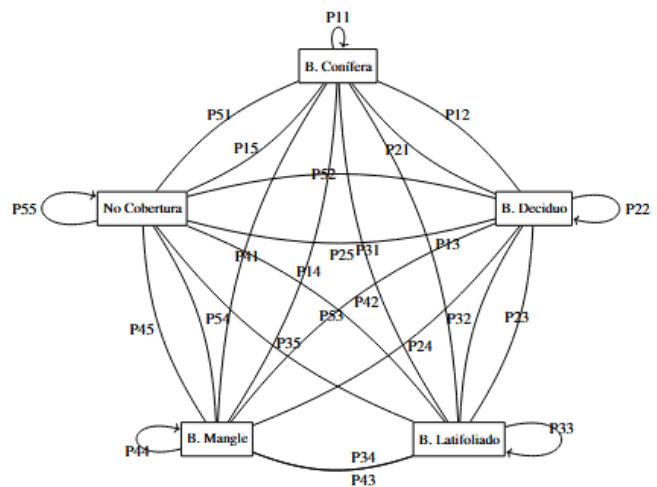


Fig. 1 Diagrama de probabilidades de cambios de uso de la tierra. Fuente elaboración propia con base en Bell [19].

C. Construcción de transición de cobertura

A partir de los datos crudos se elaboraron tablas de transiciones en R, estructuradas con las variables: origen, destino, periodo de transición, área en hectáreas y tipo de transición (pérdida, ganancia, permanencia, cambio lateral). Cada transición se clasificó como:

- **Pérdida:** bosque → no cobertura
- **Ganancia:** no cobertura → bosque
- **Permanencia:** bosque → mismo bosque
- **Cambio lateral:** bosque → otro tipo de bosque.

Este enfoque sigue metodologías aplicadas en estudios de cambio de uso de suelo [20].

D. Matrices de transición y modelo de Markov

El análisis de la dinámica de los cambios de uso se realizó asumiendo que la evolución puede explicarse como un proceso estocástico, mediante una cadena de Markov de primer orden [19], [21]. Para cada categoría i , la probabilidad de transición hacia la categoría j se definió como:

$$P_{ij} = \frac{\text{Área de transición de } i \rightarrow j}{\text{Área total inicial de } i}$$

La matriz de probabilidades de transición P se aplicó sobre el vector de distribución inicial $x(t)$, obteniéndose la distribución proyectada en el tiempo $t+1$

$$x(t+1) = x(t) \cdot P$$

Este procedimiento permitió estimar las permanencias, pérdidas y ganancias futuras bajo las tendencias observadas, siguiendo la lógica de los modelos de Markov aplicados al cambio de uso de la tierra [19], [22], [23], [24], [20].

E. Valoración económica

La valoración económica integró dos componentes: carbono neto y servicios ecosistémicos [20].

1. Carbono neto (tCO_2)

$$C = A \times Fco_2$$

donde A es el área en hectáreas y Fco_2 el factor de carbono (tCO_2 /ha).

2. Valor del carbono (USD):

$$Vc = C \times Pc$$

donde Pc es el precio de referencia del carbono en el mercado voluntario (USD/ tCO_2).

3. Valor de servicios ecosistémicos (USD):

$$Vs = A \times S_{ha}$$

donde S_{ha} es el valor de servicios ecosistémicos por hectárea (USD/ha).

4. Valor total (USD):

$$Vt = Vc + Vs$$

Los factores de carbono se asignaron según categoría de bosque (ej. 110 / tCO_2 /ha para conífera, 200 / tCO_2 /ha para latifoliado, 450 / tCO_2 /ha para manglar). Los precios de referencia del mercado voluntario se establecieron en escenarios

base de 5–6 USD/ tCO_2 . Los servicios ecosistémicos se valoraron en rangos de 50–500 USD/ha según tipo de bosque [25], [26], [27], [28]

F. Proyección 2018–2030

Con las matrices de transición y los factores económicos se proyectaron las pérdidas, ganancias y permanencias de cobertura forestal hacia 2030. Las áreas proyectadas se multiplicaron por los factores de carbono y valores ecosistémicos, obteniendo el impacto económico esperado, cabe destacar que para la proyección de beneficios económicos al año 2030, se aplicó un análisis a precios constantes referenciados al año base de la investigación. Este enfoque permite aislar el efecto cantidad (cambios físicos en la cobertura forestal) de distorsiones monetarias intertemporales como la inflación, asegurando que las variaciones en el valor económico reflejen fielmente la dinámica ecológica del territorio. Los resultados se clasificaron en:

Pérdidas: valores negativos.

Ganancias: valores positivos.

Ganancias: valores marginales, siguiendo metodologías internacionales [24], [20].

Los resultados se sintetizaron en tablas dinámicas y gráficos en Excel, mostrando pérdidas y ganancias por departamentos más afectados y tipo de bosque.

IV. RESULTADOS

A. Cambios históricos de cobertura (2000–2018)

Con base en la aplicación de metodológica los resultados mostraron variaciones las transiciones de cobertura forestal. La Figura 1 presenta la distribución espacial de las pérdidas y ganancias de cobertura forestal por departamento durante el periodo 2000–2018. Estos resultados evidencian una tendencia general de pérdida neta de bosques, especialmente en los departamentos de Olancho, Colón y Gracias a Dios. Las categorías más afectadas fueron el bosque latifoliado y el bosque deciduo que se ve reflejado en Choluteca, que presentaron conversiones significativas hacia áreas de no cobertura.

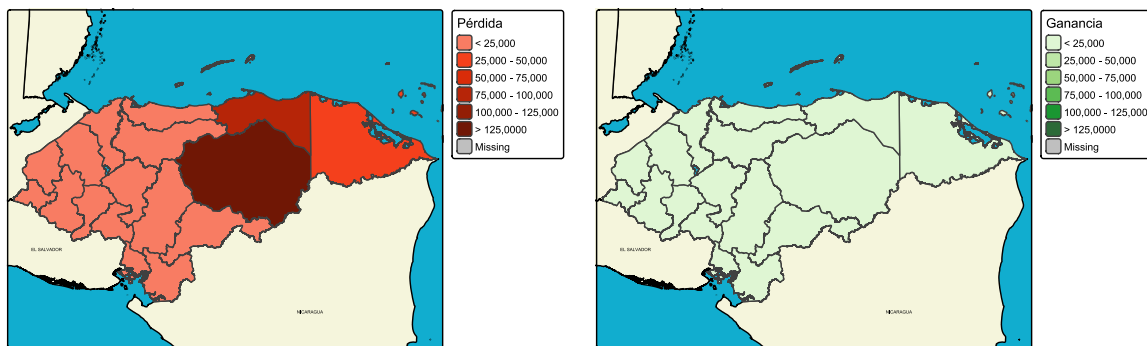


Fig. 2 Distribución espacial de pérdidas (izquierda) y ganancias (derecha) de cobertura forestal por departamento, Honduras (2000–2018).

La Tabla I presenta las principales variaciones en la cobertura forestal entre 2000 y 2018 para los departamentos con mayores cambios. Los resultados evidencian una marcada pérdida neta de cobertura forestal en todos los casos analizados. Olancho concentra la mayor pérdida absoluta con 125,320 ha, seguido por Colón con 82,519 ha, mientras que Atlántida y Choluteca registran pérdidas significativamente menores (13,377 ha y 12,480 ha, respectivamente). Este patrón indica que la presión sobre la cobertura forestal se encuentra altamente concentrada en territorios con extensas superficies boscosas iniciales.

En contraste, las ganancias son considerablemente menores en magnitud. Olancho registra la mayor recuperación relativa (4,168 ha), seguido por Colón (2,029 ha), mientras que Atlántida (730 ha) y Choluteca (1,406 ha) muestran incrementos modestos. Sin embargo, estas ganancias no compensan las pérdidas registradas. El componente de permanencia es particularmente reducido en todos los departamentos. Olancho presenta 359 ha de permanencia, Colón 156.6 ha, Choluteca 71 ha y Atlántida apenas 27 ha. Estos valores sugieren una alta inestabilidad estructural en la cobertura forestal durante el período analizado o bien que la definición operativa de permanencia corresponde a permanencia estricta por tipo de bosque, lo que limita su magnitud.

En términos netos, la relación pérdida/ganancia supera ampliamente la unidad en todos los departamentos, evidenciando un proceso dominante de conversión forestal hacia otras categorías de uso del suelo.

TABLA I
PÉRDIDAS, GANANCIAS Y PERMANENCIA DE COBERTURA FORESTAL
(PRINCIPALES VARIACIONES) 2000 - 2018

Departamento	Pérdida (ha)	Ganancia (ha)	Permanencia (ha)
Colón	82,519	2,029	156.6
	Latifoliado	Latifoliado	Latifoliado
Atlántida	13,377	730	27
	Latifoliado	Latifoliado	Latifoliado
Choluteca	12,480	1,406	71
	Deciduo	Deciduo	Deciduo
Olancho	125,320	4,168	359
	Latifoliado	Latifoliado	Latifoliado

La Tabla II presenta la matriz de transición (ha) de la cobertura forestal entre 2000 y 2018. El resultado central evidencia que la dinámica estuvo dominada por transiciones desde coberturas forestales hacia la categoría No Cobertura, acumulando 408,079.73 ha. La mayor contribución a este flujo provino del bosque latifoliado, con 307,496.3 ha convertidas a No Cobertura, seguido del bosque deciduo (54,204.7 ha) y el bosque conífero (45,205.0 ha), mientras que el mangle aportó 1,173.7 ha. En contraste, la permanencia por tipo (diagonal de la matriz) fue reducida: 613.4 ha en conífera, 344.1 ha en deciduo, 1,934.1 ha en latifoliado y 49.4 ha en mangle. La matriz también registra transiciones desde No Cobertura hacia coberturas forestales (38,598.02 ha), principalmente hacia

latifoliado (20,548.7 ha), y en menor medida hacia conífera (8,280.8 ha), deciduo (8,230.8 ha) y mangle (1,537.7 ha). Finalmente, las transiciones entre clases forestales fueron marginales frente a los flujos hacia No Cobertura, lo que sugiere que el proceso predominante en el período fue la salida neta del sistema forestal más que una sustitución entre tipos de bosque.

TABLA II
MATRIZ DE TRANSICIÓN DE ÁREAS HISTÓRICAS DE COBERTURA
FORESTAL EN HONDURAS (2000 – 2018)

Origen / Destino	Conífera	Deciduo	Latifoliado	Mangle	No Cobertura	Total
Conífera	613.4	5.4	23.9		45,205	45,847.72
Deciduo	7.7	344.1	3.4		54,204.7	54,559.81
Latifoliado	15.5	16.2	1,934.1		307,496.3	309,462.13
Mangle		0.9		49.4	1,173.7	1,223.97
No Cobertura	8,280.8	8,230.8	20,548.7	1,537.7		38,598.02
Total	8,917.42	8,597.3	22,510.11	1,587.08	408,079.73	449,691.65

La Tabla III sintetiza el valor económico neto asociado a las transiciones de cobertura forestal en el período 2000–2018, desagregando el aporte en valor carbono (USD) y valor de servicios ecosistémicos (USD), y su suma como valor total (USD). En conjunto, los cinco departamentos reportados concentran un valor total de USD 350,791,225, donde el componente de carbono domina claramente la estructura del valor: en todos los departamentos, el carbono representa aproximadamente 91.8–91.9% del valor total, mientras que los servicios ecosistémicos aportan alrededor de 8.1–8.2%.

En términos de magnitud, Olancho presenta el mayor valor total con USD 167,183,173, explicado por USD 153,479,597 en carbono y USD 13,703,576 en servicios. En segundo lugar, Colón registra USD 102,479,199 (carbono: USD 94,194,611; servicios: USD 8,284,589), equivalente a aproximadamente 29.21% del total. En tercer lugar, se ubica Gracias a Dios con USD 42,011,181 (carbono: USD 38,566,010; servicios: USD 3,445,172), representando 11.98% del total.

Los departamentos con menores valores dentro de esta selección son El Paraíso con USD 22,398,440 (carbono: USD 20,572,369; servicios: USD 1,826,071) y Atlántida con USD 16,719,232 (carbono: USD 15,360,898; servicios: USD 1,358,334). En suma, la evidencia de la Tabla III muestra una alta concentración territorial del valor económico neto, principalmente en Olancho y Colón, y una composición del valor marcadamente dominada por el carbono, lo cual es consistente con un esquema de valoración donde el componente biofísico-económico del carbono explica la mayor parte del balance neto reportado para el período 2000–2018.

TABLA III
VALOR ECONÓMICO NETO DE LAS TRANSICIONES DE COBERTURA
FORESTAL (2000 – 2018)

Departamento	Valor carbono (USD)	Valor servicios (USD)	Valor total (USD)
Olancho	153,479,597	13,703,576	167,183,173
Colón	94,194,611	8,284,589	102,479,199
Gracias a Dios	38,566,010	3,445,172	42,011,181
El Paraíso	20,572,369	1,826,071	22,398,440
Atlántida	15,360,898	1,358,334	16,719,232

La Tabla IV presenta la matriz de transición del valor económico asociado a los cambios de cobertura forestal entre 2000 y 2018, con un valor agregado total de USD 487,970,992. El análisis evidencia que el 90.96% del valor económico total (USD 443,834,576) se concentra en transiciones hacia la categoría “No Cobertura”, confirmando que la principal fuente del impacto económico está asociada a la conversión del bosque hacia usos no forestales.

La permanencia económica estricta por tipo de bosque (valores en la diagonal) asciende únicamente a USD 3,235,501, lo que representa menos del 1% del valor total analizado. Este resultado es consistente con la baja permanencia física observada en la matriz de áreas.

TABLA IV
MATRIZ DE TRANSICIÓN DE VALOR ECONÓMICO DE COBERTURA
FORESTAL EN HONDURAS (2000 – 2018)

Origen / Destino	Conifera	Deciduo	Latifoliado	Mangle	No Cobertura	Total
Conifera	440,291	326.9	1,432.0		31,788,934	32,230,984
Deciduo	384	197,024	168.5		30,982,185	31,179,762
Latifoliado	1,549	1,616	2,461,455		377,770,223	380,234,844
Mangle		434		136,731	3,293,233	3,430,400
No Cobertura	5,738,172	4,578,620	25,696,067	4,882,138		40,894,999
Total	6,180,397	4,778,023	28,159,123	5,018,870	443,834,576	487,970,992

B. Proyección estimada a 2030

La Tabla V presenta la proyección hacia 2030 de pérdidas y ganancias de cobertura forestal, junto con el valor económico total asociado, para los cinco departamentos más afectados. Los resultados muestran una continuidad del proceso de pérdida neta, concentrado específicamente en la cobertura latifoliada. En el agregado de estos departamentos, la pérdida proyectada asciende a 267,651 ha, mientras que la ganancia proyectada alcanza únicamente 9,046 ha, lo que implica un balance neto de 258,605 ha. En términos relativos, las ganancias representan aproximadamente 3.38% de la pérdida, evidenciando una marcada asimetría del cambio proyectado.

En conjunto, la evidencia sugiere que, bajo la proyección considerada, la dinámica hacia 2030 mantiene un patrón de pérdida neta de cobertura latifoliada, con recuperaciones insuficientes para compensar la reducción proyectada y con una alta concentración espacial del impacto económico en departamentos específicos.

TABLA V
PROYECCIÓN DE PÉRDIDA Y GANANCIAS, VALOR ECONÓMICO NETO DE
COBERTURA FORESTAL HACIA 2030

Departamento	Pérdida proyectada (ha)	Ganancia proyectada (ha)	Valor total (USD)
Olancho	125,536 Latifoliado	4,168 Latifoliado	740,342,457
Colón	82,613 Latifoliado	2,029 Latifoliado	491,561,366
Gracias a Dios	33,719 Latifoliado	855 Latifoliado	200,468,697
Atlántida	13,393 Latifoliado	730 Latifoliado	77,241,691
El Paraíso	12,390 Latifoliado	1,264 Latifoliado	67,868,232

La Tabla VI presenta la matriz de transición proyectada para 2030 en términos de área (ha), donde se observa que la dinámica dominante corresponde a la conversión de coberturas forestales hacia la categoría de No Cobertura. En particular, los flujos más voluminosos se registran desde el bosque latifoliado hacia No Cobertura (308,655.7 ha), seguidos por los bosques deciduos (54,412.4 ha) y coníferos (45,568.3 ha).

Aunque el modelo también proyecta transiciones desde No Cobertura hacia categorías forestales principalmente hacia latifoliado (20,548.7 ha) y, en menor magnitud, hacia conífera (8,280.8 ha) y deciduo (8,230.8 ha), la estructura general de la matriz evidencia que los procesos de pérdida superan ampliamente a las recuperaciones.

TABLA VI
MATRIZ DE TRANSICIÓN PROYECTADA EN ÁREA DE COBERTURA
FORESTAL EN HONDURAS 2030

Origen / Destino	Conifera	Deciduo	Latifoliado	Mangle	No Cobertura	Total
Conifera	255.7	4.5	19.2		45,568.3	45,847.72
Deciduo	6.2	138.5	2.7		54,412.4	54,559.81
Latifoliado	12.5	13.1	780.8		308,655.7	309,462.13
Mangle		0.7		20.4	1,202.8	1,223.97
No Cobertura	8,280.8	8,230.8	20,548.7	1,537.7		38,598.02
Total	8,555.28	8,387.56	21,351.5	1,558.12	409,839.2	449,691.65

En La Tabla VII se presenta la matriz de transición proyectada al año 2030 en términos de valor económico (USD). Los resultados indican que la dinámica económica del cambio de cobertura se encuentra fuertemente dominada por las transiciones hacia No Cobertura, categoría que concentra 2,202,383,128 USD del total proyectado.

En conjunto, la matriz proyectada sugiere un escenario donde la pérdida neta de cobertura forestal hacia 2030 se traduce en una reasignación dominante del valor económico del sistema hacia No Cobertura, especialmente a través del componente latifoliado.

TABLA VII
MATRIZ DE TRANSICIÓN PROYECTADA EN VALOR ECONÓMICO EN
HONDURAS 2030

Origen / Destino	Conifera	Deciduo	Latifoliado	Mangle	No Cobertura	Total
Conifera	874,482	15,141	64,655		153,109,394	154,063,674
Deciduo	17,057	387,883	7,475		149,633,991	150,046,408
Latifoliado	76,508	79,691	4,841,014		1,882,799,854	1,887,797,068
Mangle		7,914		296,045	16,839,888	17,145,848
No Cobertura	27,823,610	22,634,565	125,347,250	21,527,795		197,333,221
Total	28,791,659	23,127,196	130,260,395	21,823,840	2,202,383,128	2,406,386,221

C. Proyección optimista a 2030

Bajo el escenario optimista, que considera una reducción del 15% en las tasas de deforestación y un incremento equivalente en la regeneración natural, la pérdida proyectada en los departamentos analizados para latifoliado se reduce a 227,503 ha, mientras que la ganancia semantiene al base a 9,046 ha. En

este contexto, la asimetría del cambio se modera ligeramente, con las ganancias representando un [3.38 %] de las pérdidas. A pesar de la mejora en los flujos de cobertura, el balance neto sigue siendo negativo, lo que refuerza la conclusión de que incluso bajo condiciones favorables de gestión forestal, la inercia de la pérdida latifoliada requiere medidas de intervención inmediata para preservar el Valor Económico Total (VET) remanente.

TABLA IX
PROYECCIÓN DE PÉRDIDA Y GANANCIAS, VALOR ECONÓMICO NETO DE COBERTURA FORESTAL HACIA 2030

Departamento	Pérdida proyectada (ha)	Ganancia proyectada (ha)	Valor total (USD)
Olancho	106,706 Latifoliado	4,168 Latifoliado	625,477,110
Colón	70,221 Latifoliado	2,029 Latifoliado	415,970,764
Gracias a Dios	28,661 Latifoliado	855 Latifoliado	169,616,070
Atlántida	11,384 Latifoliado	730 Latifoliado	64,987,145
El Paraíso	10,532 Latifoliado	1,264 Latifoliado	56,530,930

La Tabla X presenta la matriz de transición proyectada para 2030 en términos de área (ha), donde se observa que la dinámica dominante corresponde a la conversión de coberturas forestales hacia la categoría de No Cobertura. En particular, los flujos más voluminosos se registran desde el bosque latifoliado hacia No Cobertura (262,513.3 ha), seguidos por los bosques deciduos (46,289.0 ha) y coníferos (38,847.8 ha).

Aunque el modelo también proyecta transiciones desde No Cobertura hacia categorías forestales principalmente hacia latifoliado (20,548.7 ha) y, en menor magnitud, hacia conífera (8,280.8 ha) y deciduo (8,230.8 ha), la estructura general de la matriz evidencia que los procesos de pérdida superan ampliamente a las recuperaciones.

TABLA XI
MATRIZ DE TRANSICIÓN PROYECTADA EN ÁREA DE COBERTURA FORESTAL EN HONDURAS 2030

Origen/Destino	B. Conífera	B. Deciduo	B. Latifoliado	B. Mangle	No cobertura	Total general
B. Conífera	6,976.2	4.5	19.2		38,847.8	45,847.72
B. Deciduo	6.2	8,261.8	2.7		46,289.0	54,559.81
B. Latifoliado	12.5	13.1	46,923.2		262,513.3	309,462.13
B. Mangle		0.7		195.0	1,028.2	1,223.97
No cobertura	8,280.8	8,230.8	20,548.7	1,537.7		38,598.02
Total general	15,275.74	16,510.87	67,493.87	1,732.75	348,678.42	449,691.65

En La Tabla XII se presenta la matriz de transición proyectada al año 2030 en términos de valor económico (USD). Los resultados indican que la dinámica económica del cambio de cobertura se encuentra fuertemente dominada por las transiciones hacia No Cobertura, categoría que concentra 1,873,549,977 USD del total proyectado.

En conjunto, la matriz proyectada sugiere un escenario donde la pérdida neta de cobertura forestal hacia 2030 se traduce en una reasignación dominante del valor económico del sistema hacia No Cobertura, especialmente a través del componente latifoliado.

TABLA XII
MATRIZ DE TRANSICIÓN PROYECTADA EN VALOR ECONÓMICO EN HONDURAS 2030

Origen/Destino	B. Conífera	B. Deciduo	B. Latifoliado	B. Mangle	No cobertura	Total general
B. Conífera	23,858,464	15,141	64,656		130,528,641	154,466,902
B. Deciduo	17,058	23,133,161	7,475		127,294,879	150,452,574
B. Latifoliado	76,509	79,691	290,923,723		1,601,331,384	1,892,411,306
B. Mangle		9,914		2,828,176	14,395,073	17,233,163
No cobertura	27,823,610	22,634,566	125,347,250	21,527,795		197,333,221
Total general	51,775,641	45,872,474	416,343,104	24,355,971	1,873,549,977	2,411,897,167

D. Proyección pesimista a 2030

En el escenario pesimista, que proyecta una aceleración del 15% en la pérdida y una contracción del 15% en las ganancias, el balance neto de cobertura forestal se deteriora críticamente, alcanzando una pérdida de 307,798 ha. En este escenario, la capacidad de recuperación del ecosistema se reduce a niveles marginales, representando apenas un 2.94% de la pérdida total. El impacto económico se intensifica significativamente en los departamentos con mayor stock de bosque latifoliado, sugiriendo que factores externos no controlados podrían llevar el VET a niveles de riesgo para la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos hacia 2030.

En conjunto, la evidencia sugiere que, bajo la proyección considerada, la dinámica hacia 2030 mantiene un patrón de pérdida neta de cobertura latifoliada, con recuperaciones insuficientes para compensar la reducción proyectada y con una alta concentración espacial del impacto económico en departamentos específicos.

TABLA XIII
PROYECCIÓN DE PÉRDIDA Y GANANCIAS, VALOR ECONÓMICO NETO DE COBERTURA FORESTAL HACIA 2030

Departamento	Pérdida proyectada (ha)	Ganancia proyectada (ha)	Valor total (USD)
Olancho	144,366 Latifoliado	4,168 Latifoliado	855,207,805
Colón	95,005 Latifoliado	2,029 Latifoliado	567,151,968
Gracias a Dios	38,777 Latifoliado	855 Latifoliado	231,321,324
Atlántida	15,402 Latifoliado	730 Latifoliado	89,496,239
El Paraíso	14,249 Latifoliado	1,264 Latifoliado	79,205,536

V. DISCUSIÓN

La Tabla XIV presenta la matriz de transición proyectada para 2030 en términos de área (ha), donde se observa que la dinámica dominante corresponde a la conversión de coberturas forestales hacia la categoría de No Cobertura. En particular, los flujos más voluminosos se registran desde el bosque latifoliado hacia No Cobertura (354,798.1 ha), seguidos por los bosques deciduos (62,535.7 ha) y coníferos (52,288.8 ha).

Aunque el modelo también proyecta transiciones desde No Cobertura hacia categorías forestales principalmente hacia latifoliado (20,548.7 ha) y, en menor magnitud, hacia conífera (8,280.8 ha) y deciduo (8,230.8 ha), la estructura general de la matriz evidencia que los procesos de pérdida superan ampliamente a las recuperaciones.

TABLA XIV
MATRIZ DE TRANSICIÓN PROYECTADA EN ÁREA DE COBERTURA
FORESTAL EN HONDURAS 2030

Origen/Destino	B. Conifera	B. Deciduo	B. Latifoliado	B. Mangle	No cobertura	Total general
B. Conifera	- 6,464.8	4.5	19.2		52,288.7	45,847.72
B. Deciduo	6.2	- 7,984.8	2.7		62,535.7	54,559.81
B. Latifoliado	12.5	13.1	- 45,361.6		354,798.1	309,462.13
B. Mangle		0.7		- 154.2	1,377.5	1,223.97
No cobertura	8,280.8	8,230.8	20,548.7	1,537.7		38,598.02
Total general	1,834.82	264.25	- 24,790.87	1,383.49	470,999.97	449,691.65

En La Tabla XV se presenta la matriz de transición proyectada al año 2030 en términos de valor económico (USD). Los resultados indican que la dinámica económica del cambio de cobertura se encuentra fuertemente dominada por las transiciones hacia No Cobertura, categoría que concentra 2,531,216,281 USD del total proyectado.

En conjunto, la matriz proyectada sugiere un escenario donde la pérdida neta de cobertura forestal hacia 2030 se traduce en una reasignación dominante del valor económico del sistema hacia No Cobertura, especialmente a través del componente latifoliado.

TABLA XV
MATRIZ DE TRANSICIÓN PROYECTADA EN VALOR ECONÓMICO EN
HONDURAS 2030

Origen/Destino	B. Conifera	B. Deciduo	B. Latifoliado	B. Mangle	No cobertura	Total general
B. Conifera	- 22,109,499	15,141	64,656		175,690,149	153,660,447
B. Deciduo	17,058	- 22,357,394	7,475		171,973,103	149,640,242
B. Latifoliado	76,509	79,691	- 281,241,693		2,164,268,326	1,883,182,832
B. Mangle		9,914		- 2,236,084	19,284,704	17,058,534
No cobertura	27,823,610	22,634,566	125,347,250	21,527,795		197,333,221
Total general	5,807,678	381,919	- 155,822,312	19,291,711	2,531,216,281	2,400,875,276

Los resultados históricos (2000–2018) y proyectados hacia 2030 revelan una dinámica estructural consistente caracterizada por la conversión dominante de coberturas forestales hacia la categoría “No Cobertura”. La matriz histórica evidencia que más de 408 mil hectáreas corresponden a transiciones bosque → No Cobertura, mientras que la permanencia estricta por tipo es marginal. Esta estructura no refleja una simple reorganización interna entre tipos de bosque, sino un proceso sistemático de salida del sistema forestal. El bosque latifoliado concentra la mayor parte de esta dinámica tanto en área como en valor económico, lo que confirma su papel determinante en la configuración del balance agregado del sistema. Esta tendencia es consistente con los diagnósticos regionales de la FAO [29] y las evaluaciones del IPCC [26], que señalan la persistencia de presiones estructurales sobre los ecosistemas forestales en América Latina.

La dimensión económica amplifica la lectura biofísica. En el periodo histórico, el valor económico asociado a las transiciones alcanza aproximadamente 488 millones de USD, mientras que la proyección 2030 supera los 2,400 millones de USD. En ambos casos, más del 90% del valor se vincula a transiciones hacia No Cobertura, lo que sugiere que el impacto económico del cambio forestal está fuertemente concentrado en procesos de conversión más que en reconfiguraciones internas.

La centralidad del latifoliado en estas cifras refuerza la noción de pérdida de capital natural con alta densidad ecológica y económica, en línea con el argumento de Costanza et al. [25] sobre los costos sistémicos de la degradación ambiental. No obstante, es metodológicamente necesario precisar que los valores reportados corresponden a la monetización de transiciones bajo parámetros constantes, lo que implica que las magnitudes proyectadas deben interpretarse como escenarios condicionados y no como pérdidas intertemporales descontadas.

La proyección Markov hacia 2030 reproduce la estructura observada en el periodo base, anticipando continuidad en la pérdida neta, particularmente en departamentos como Olancho y Colón, donde la relación pérdida/ganancia supera ampliamente la unidad. Sin embargo, este resultado depende críticamente del supuesto de estacionariedad de la matriz de transición y de la hipótesis de primer orden, que implican que el régimen observado entre 2000 y 2018 se mantiene sin alteraciones estructurales.

Dado que los sistemas socio-ecológicos están expuestos a variaciones regulatorias, cambios en precios relativos, infraestructura, eventos extremos y políticas de conservación, la proyección debe interpretarse como un escenario tendencial (business-as-usual). Estudios de modelación de uso de suelo [22], [23] muestran que pequeñas modificaciones en probabilidades de transición pueden alterar significativamente las trayectorias de largo plazo, lo que sugiere que la incorporación de escenarios alternativos y análisis de sensibilidad fortalecería la robustez prospectiva del modelo.

En conjunto, los resultados indican que el sistema forestal hondureño, bajo las condiciones observadas, presenta una dinámica desequilibrada donde las ganancias y permanencias son insuficientes para compensar las pérdidas proyectadas. La concentración territorial del impacto sugiere que la política pública debe orientarse a intervenciones focalizadas, particularmente en departamentos donde la presión es estructuralmente mayor. Asimismo, la magnitud del valor económico asociado a las transiciones subraya la relevancia de explorar instrumentos que modifiquen el régimen de incentivos, como mecanismos de mercado voluntario de carbono y esquemas de pagos por servicios ambientales, cuya experiencia regional [23] demuestra que pueden alterar patrones de conversión cuando se implementan con adecuada gobernanza y monitoreo. En este sentido, más que ofrecer una predicción determinista, el modelo proporciona una base cuantitativa para discutir trayectorias alternativas y evaluar la necesidad de intervenciones que modifiquen la matriz de transición subyacente.

Se optó por un modelo de Markov Tabular fundamentado en datos del ICF y sensores Landsat (30m). Dado que el objetivo primordial de este estudio es la valoración económica nacional y la cuantificación del capital natural, la precisión en la suma total de hectáreas por tipo de bosque es prioritaria sobre la ubicación geoespacial exacta píxel a píxel, la cual no altera los agregados económicos reportados.

VI. CONCLUSIONES

El análisis de la dinámica de cobertura forestal en Honduras mediante matrices de transición y modelación de cadenas de Markov evidencia un patrón estructural de pérdida neta durante el periodo 2000–2018, caracterizado por la conversión predominante de coberturas boscosas hacia categorías de no cobertura. Este comportamiento no responde únicamente a fluctuaciones internas entre tipos forestales, sino a un proceso sistemático de salida del sistema forestal, con especial incidencia sobre el bosque latifoliado, que concentra la mayor proporción de área y valor económico afectado.

La incorporación de una dimensión de valoración económica permite dimensionar la magnitud del capital natural comprometido. Los resultados muestran que el valor asociado a las transiciones hacia no cobertura supera ampliamente el correspondiente a permanencias o ganancias, lo que confirma que la degradación forestal implica no solo una pérdida biofísica, sino también una reducción significativa del potencial económico derivado de carbono y servicios ecosistémicos. Esta evidencia refuerza la necesidad de integrar la contabilidad ambiental en la planificación territorial y en los esquemas de política pública.

La proyección hacia 2030, bajo el supuesto de estacionariedad del régimen de transición observado, anticipa la continuidad de esta tendencia, particularmente en departamentos con alta presión estructural sobre los bosques. No obstante, los resultados deben interpretarse como un escenario tendencial condicionado por los supuestos del modelo

cadena de primer orden y probabilidades constantes y no como una trayectoria determinista. La sensibilidad inherente a los modelos probabilísticos sugiere que cambios en políticas, incentivos económicos o condiciones climáticas podrían modificar sustancialmente las probabilidades de transición y, por ende, los resultados proyectados.

Desde el punto de vista científico, el estudio contribuye al ofrecer: (i) una matriz nacional de transición por tipo forestal; (ii) una proyección probabilística explícita hacia 2030; y (iii) una integración entre dinámica espacial y valoración económica del capital natural. Esta articulación metodológica permite pasar de un diagnóstico descriptivo a un análisis prospectivo cuantificado, aportando una base empírica para la formulación de escenarios alternativos de gestión forestal.

En términos de política pública, la magnitud de las pérdidas proyectadas indica que mantener el régimen actual de transición podría comprometer de forma creciente la sostenibilidad ecológica y económica del país. En consecuencia, se vuelve estratégico fortalecer instrumentos que alteren la matriz de incentivos, tales como mecanismos de mercado voluntario de carbono, esquemas de pagos por servicios ambientales y programas de restauración focalizados territorialmente. La evidencia presentada sugiere que la intervención temprana puede modificar las trayectorias probabilísticas antes de que se consoliden dinámicas irreversibles de degradación.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de fortaleza y guía en cada etapa de este trabajo.

Seguidamente, expreso mi más profundo reconocimiento a mi familia y amigos, cuyo apoyo constante y ánimo fueron esenciales para la culminación de este estudio.

Reconozco también el respaldo de mi lugar de trabajo, que me brinda las condiciones necesarias para avanzar en la investigación.

De manera especial, agradezco a mis asesores y colegas profesionales, quienes compartieron información valiosa, ideas y sugerencias que enriquecieron el análisis y fortalecieron la discusión de los resultados. Su orientación y experiencia fueron un aporte fundamental en el desarrollo metodológico y conceptual de este estudio.

Asimismo, extendiendo mi reconocimiento a las instituciones nacionales e internacionales que facilitaron datos oficiales y recursos técnicos, como el Instituto de Conservación Forestal (ICF) de Honduras, la FAO y el IPCC, así como a los investigadores y profesionales del área que contribuyeron con su conocimiento especializado. Sin su colaboración, este esfuerzo académico no habría alcanzado la solidez que hoy presenta.

REFERENCIAS

- [1] F. Pouryanezhad, S. M. Monavari, M. Robati, A. Vafaeinejad, and H. Mohammadi, "Predicting the Changes in National Parks Due to Urbanization Growth, Applying the CA_Markov Model Approach: Bamou National Park Case Study—Fars Province—Iran," *Natural Resource Modeling*, vol. 39, no. 1, 2026, doi: 10.1111/nrm.70021.

- [2] L. K. Hakiki, M. Achmad, A. S. Soma, and U. H. Amin, "Prediction of land use changes via the cellular automata-Markov model in East Luwu Regency," *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 350–363, 2026, doi: 10.12912/27197050/215827.
- [3] A. Abdollahzadeh and R. Mostafazadeh, "Long-term dynamics and intensity of LULC changes and conservation implications in the Zagros mountain ecoregion, Iran," *Journal for Nature Conservation*, vol. 89, p. 127113, 2026, doi: 10.1016/j.jnc.2025.127113.
- [4] S. Jiang, A. D. Werner, L. Gao, and M. Rode, "Climate change expected to amplify land-use change impacts on nitrogen export from a subtropical catchment in China," *Journal of Hydrology*, vol. 667, p. 134888, 2026, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.134888.
- [5] Y. He *et al.*, "Hydrological response to land use change under low carbon-optimal economic scenario," *Journal of Hydrology*, vol. 664, p. 134501, 2026, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.134501.
- [6] M. Naem *et al.*, "Simulating and predicting lake dynamics by fusing HBV modeling, machine learning approach and remote sensing data," *Journal of Hydrology*, vol. 663, p. 134303, 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.134303.
- [7] N. I. Gbaï, G. C. Akabassi, A. Djafarou, P. F. Dagou, and C. Adjire, "Diachronic analysis of land vegetation around the mouth of the Sô River," *Discov Environ*, vol. 3, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s44274-025-00377-6.
- [8] V. Ivanov, I. A. Milyaev, and E. A. Soldatova, "Successional pathways after peatland draining: remote sensing and predictive modelling of landscape dynamics," *Landscape Ecol Eng*, 2026, doi: 10.1007/s11355-025-00696-z.
- [9] P. K. Thakur, P. K. Thakur, R. K. Verma, and B. Pradhan, "Integrating CA–Markov–ANN for spatiotemporal prediction of land use dynamics in a fragile Himalayan watershed," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 41, p. 101856, 2026, doi: 10.1016/j.rsase.2025.101856.
- [10] J. Sachapara, S. Chaturvedi, D. Sarkar, and N. Bhatt, "Geospatial LULC and LST Change Analysis with Future Growth Prediction Using Random-Forest and MLP-MCA Algorithms," in *Studies in Systems, Decision and Control, Artificial Intelligence in Civil Engineering*, G. Bekdaş and S. M. Nigdeli, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 339–367.
- [11] M. Fallahi, S. A. C. Nelson, J. P. Roise, S. Beyene, M. N. Peterson, and P. V. Caldwell, "The Potential Impacts of Climate and Land Use Changes on Water Yield in the Croatan National Forest, USA," *Environments*, vol. 12, no. 12, p. 473, 2025, doi: 10.3390/environments12120473.
- [12] S. Xiao, W. Fu, and F. Cao, "Land use configuration optimization based on ecosystem service enhancement in Xi'an City," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 29, p. 101076, 2026, doi: 10.1016/j.indic.2025.101076.
- [13] A. Weng *et al.*, "Dynamics and trade-off/synergy of ecosystem services in China's First Batch national Parks: Evidence from recent decades and future land use and cover changes," *Journal of environmental management*, vol. 398, p. 128481, 2026, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.128481.
- [14] B. Legese, A. Pandey, and M. P. Mohanty, "A novel integrated framework for long-term assessment of ecosystem service degradation and restoration prioritization in a semi-arid rift valley landscape," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 197, no. 12, p. 1290, 2025, doi: 10.1007/s10661-025-14724-w.
- [15] G. Silveira, E. F. L. Pereira-Silva, R. F. dos Santos, and E. Hardt, "Impacts of REDD+ on Forest Conservation in a Protected Area of the Amazon," *Earth*, vol. 6, no. 4, p. 128, 2025, doi: 10.3390/earth6040128.
- [16] Y. Yang, X. Chen, Y. Zhang, Y. Cao, and D. Jin, "Multi-Scenario Simulation of Land Use Transition in a Post-Mining City Based on the GeoSOS-FLUS Model: A Case Study of Xuzhou, China," *Land*, vol. 14, no. 12, p. 2442, 2025, doi: 10.3390/land14122442.
- [17] R. M. A. Latif, A. Arshad, J. He, T. Ahmad, and A. Ahmed, "Geospatial modeling and forecasting of urban land use change using Google Earth Engine and machine learning," *PloS one*, vol. 20, no. 12, e0338920, 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0338920.
- [18] U. Seeboonruang, R. Mandadi, P. Thammaboribal, A. L. Gonzales, A. Kanchan, and S. V. S. A. B. Ganni, "Assessing the Combined Impacts of Future Climate and Land Use Changes on Soil Loss and Sediment Retention in the Lam Phra Phloeng Watershed, Thailand," *Agriculture*, vol. 15, no. 23, p. 2511, 2025, doi: 10.3390/agriculture15232511.
- [19] E. J. Bell, "Markov analysis of land use change—an application of stochastic processes to remotely sensed data," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 8, no. 6, pp. 311–316, 1974, doi: 10.1016/0038-0121(74)90034-2.
- [20] J.-F. Mas, M. Kolb, M. Paegelow, M. T. Camacho Olmedo, and T. Houet, "Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages," *Environmental Modelling & Software*, vol. 51, pp. 94–111, 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010.
- [21] J. R. Anderson, E. E. Hardy, J. T. Roach, and R. E. Witmer, "A land use and land cover classification system for use with remote sensor data," *U.S. Geological Survey*, no. 964, 1976, doi: 10.3133/pp964.
- [22] F. Briceño Valera, "Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra," (in spa), *Revista geográfica venezolana*, vol. 46, no. 1, pp. 35–45, 2005. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1294140>
- [23] G. R. Pontius and J. Malanson, "Comparison of the structure and accuracy of two land change models," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, no. 2, pp. 243–265, 2005, doi: 10.1080/13658810410001713434.
- [24] E. F. Lambin and H. Geist, *Land-Use and Land-Cover Change*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [25] R. Costanza *et al.*, "The value of the world's ecosystem services and natural capital," *Ecological Economics*, vol. 25, no. 1, pp. 3–15, 1998, doi: 10.1016/S0921-8009(98)00020-2.
- [26] IPCC, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [27] S. Pagiola, "Payments for environmental services in Costa Rica," *Ecological Economics*, vol. 65, no. 4, pp. 712–724, 2008, doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.07.033.
- [28] G. C. Daily, *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997.
- [29] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Global Forest Resources Assessment 2015: How Are the World's Forests Changing?*
- [30] García, M. (2024). *Protocolo para la clasificación de la cobertura forestal de mosaicos satelitales del sensor LANDSAT*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/385750597_Protocolo_para_la_clasificacion_de_la_cobertura_forestal_de_mosaicos_satelitales_del_sensor_LANDSAT
- [31] García, M. (2024). *Protocolo para la construcción de mosaicos libres de nube a partir de imágenes satelitales LANDSAT*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/385822463_Protocolo_para_la_construccion_de_mosaicos_libres_de_nube_a_partir_de_imagenes_satelitales_LANDSAT
- [32] Gobierno de Honduras. (2017). *Nivel de referencia de las emisiones forestales por la deforestación en la República de Honduras para el pago por resultados de REDD+ bajo la CMNUCC*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). https://redd.unfccc.int/media/nivel_de_referencia_honduras_final.pdf
- [33] Instituto de Conservación Forestal (ICF). (2014). *Mapa Forestal y de Cobertura de la Tierra de Honduras: Análisis de Cifras Nacionales*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1553.3046>