

Prospective Validation of the VxC Regenerative Model through Markov Chains in Territorial Systems

Julio Lu-Chang-Say¹ , Estuardo Lu Chang-Say² 
¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jluc@uni.pe
²Universidad ESAN, Perú, elu@esan.edu.pe

Abstract: *This article presents LxC Engineering (Life per Carbon), a regenerative and participatory engineering approach aimed at transforming degradative processes into sustainable, functional, and multi-capital systems. Derived from the IP.IDEAS.S framework, it is grounded in the CRFC (Carbon Regenerative Physicochemical Cycle), whose operative equation states: $L = C + 6.5 \text{ kWh/kg}$, where L is regenerated life, C is captured carbon ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$), and 6.5 kWh/kg is the solar energy required per kg of useful biomass. Its methodology integrates tools that support the co-design, implementation, and evaluation of regenerative and participatory processes: DPAV (Decide, Plan, Act, Value): strategic governance cycle for making informed decisions under uncertainty; CUPA (Calculate, Understand, Plan, Act): adaptive operational core structured around technical, creative, and social engagement; ToC (Theory of Constraints): prioritization and measurement logic through five iterative steps to focus action; ADFI (Analyze, Define, Formulate, Implement): participatory engineering methodology that involves stakeholders in every phase from contextual analysis to implemented improvements; 9SP (Nine Strategic Pillars): participatory strategic framework articulating Purpose, Problematic, Potential, People, Proposal, Process, Project, Budget, and Benefit.*

VxC quantifies regeneration through indicators such as ROP (Return on Process), BM (Marginal Benefit), CM (Marginal Consumption), and PTF (Total Factor Productivity). Its territorial validation is based on the ATA case (Amazon Tambo Hamlet), applying Markov chain simulations and input-output matrices. Results demonstrate the feasibility of reconfiguring degraded territorial processes toward regenerative and sustainable futures through participatory governance and value co-creation.

Keywords: *LxC Regenerative Engineering; CRFC; DPAV-CUPA-TOC; ADFI Participatory Engineering; 9SP Strategic Participatory Framework*

Validación Prospectiva del Modelo Regenerativo VxC mediante Cadenas de Márkov en Sistemas Territoriales

Julio Lu-Chang-Say¹ , Estuardo Lu Chang-Say² 

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jluc@uni.pe

²Universidad ESAN, Perú, elu@esan.edu.pe

Resumen: Este artículo presenta la Ingeniería VxC (Vida por Carbono), una propuesta regenerativa y participativa orientada a transformar procesos degradativos en sistemas sostenibles, funcionales y multicapitales. Derivada del marco IP.IDEAS.S, se fundamenta en el CRFC (Ciclo Regenerativo Físico-Químico del Carbono), cuya ecuación operativa establece: $V = C + 6.5 \text{ kWh/kg}$, donde V es vida regenerada, C el carbono capturado ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$) y 6.5 kWh/kg la energía solar necesaria para estructurar un kilogramo de biomasa útil. La metodología integra herramientas que permiten co-diseñar, implementar y evaluar procesos regenerativos con participación activa; DPAV (Decidir, Planear, Actuar, Valorar): ciclo de gobernanza estratégica para decisiones informadas ante la incertidumbre; CEPA (Calcular, Entender, Planear, Actuar): núcleo operativo adaptativo basado en rigor técnico, creatividad y acción social; ToC (Teoría de Restricciones): lógica de priorización y medición a través de cinco pasos iterativos que orientan las acciones; ADFI (Analizar, Definir, Formular, Implementar): metodología de ingeniería participativa que involucra actores en todas las fases, desde el análisis contextual hasta la mejora implementada; 9PE (Nueve Pilares Estratégicos): marco estratégico participativo que articula Propósito, Problemática, Potencial, Personas, Propuesta, Proceso, Proyecto, Presupuesto y Provecho; VxC cuantifica la regeneración mediante indicadores como ROP (Rendimiento Operativo del Proceso), BM (Beneficio Marginal), CM (Consumo Marginal) y PTF (Productividad Total de los Factores). Su validación territorial se realiza mediante el caso ATA (Aldea Tambo Autosustentable), aplicando simulaciones con cadenas de Márkov y matrices insumoproducto. Los resultados evidencian la viabilidad de reconfigurar procesos territoriales degradados hacia futuros sostenibles y regenerativos mediante gobernanza participativa y cocreación de valor.

Palabras Clave ingeniería regenerativa VxC; CRFC; DPAV-CEPA-TOC; ADFI ingeniería participativa; 9PE marco estratégico participativo

I. Introducción

Durante las últimas décadas, la sostenibilidad ha sido promovida mediante políticas públicas, programas institucionales e inversiones orientadas a reducir impactos ambientales y mejorar las condiciones sociales y económicas [5], [6], [8]. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, la trayectoria dominante de muchos sistemas territoriales continúa mostrando dinámicas de degradación, baja articulación social y limitada convergencia hacia estados sostenibles [5], [6], [15]. Esta situación evidencia una brecha persistente entre la intención de sostenibilidad y su materialización efectiva en el tiempo.

Esta brecha plantea una cuestión central: si la sostenibilidad constituye una trayectoria posible para los sistemas territoriales, ¿por qué no se consolida como tendencia dominante? Más aún, ¿qué condiciones deben cumplirse para que un sistema territorial transite de manera estable hacia estados sostenibles?

En este contexto, el presente artículo sostiene que la sostenibilidad regenerativa no depende únicamente de la disponibilidad de recursos, del diseño técnico o de la existencia de marcos normativos, sino de la capacidad del sistema territorial para modificar su dinámica de acción [2], [4], [5]. En este trabajo, dicho sistema se entiende como la articulación entre Planeta, Personas, Procesos y Provecho (4P), cuya interacción determina la trayectoria funcional del territorio. En particular, se plantea que la convergencia hacia estados sostenibles requiere cambios significativos en la acción efectiva de las personas, expresados en procesos de sensibilización, empoderamiento, capacitación y participación activa. Desde esta perspectiva, el factor Personas adquiere un papel decisivo en la reconfiguración de las trayectorias territoriales [2], [4].

Para abordar esta problemática, el artículo desarrolla una validación prospectiva del modelo VxC (Vida por Carbono) mediante cadenas de Márkov. Este enfoque permite analizar probabilidades de transición entre distintos estados del sistema territorial y comprobar si la sostenibilidad constituye una trayectoria viable bajo determinadas condiciones [9], [10], [12]. A diferencia de los enfoques retrospectivos, esta aproximación permite evaluar la plausibilidad de escenarios futuros y la estabilidad de las trayectorias de cambio en contextos de incertidumbre.

El análisis se apoya en el caso ATA como referencia territorial y muestra que, si bien la trayectoria hacia un estado estable sostenible existe, esta no se activa de manera automática. Por el contrario, su consolidación depende de la capacidad del sistema territorial para fortalecer el factor Personas y generar condiciones que permitan sostener procesos regenerativos en el tiempo. En este sentido, la sostenibilidad se entiende no solo como un resultado deseable, sino como una trayectoria que debe ser construida y sostenida mediante la acción humana organizada [2], [4], [7].

Con base en ello, el objetivo del presente artículo es desarrollar una validación prospectiva del modelo VxC en sistemas territoriales, utilizando cadenas de Márkov para analizar la viabilidad de trayectorias hacia estados estables y sostenibles. Asimismo, se busca evidenciar que la sostenibilidad regenerativa depende de manera decisiva de la transformación del factor Personas, entendido como la capacidad de sensibilizar, empoderar, capacitar y organizar la acción colectiva.

II. Marco conceptual: fundamentos físico-químicos y sistémicos de la ingeniería regenerativa VxC

El modelo VxC (Vida por Carbono) constituye la base conceptual regenerativa del presente trabajo. Su propósito es comprender la sostenibilidad no solo como reducción de impactos o cumplimiento normativo, sino como la capacidad de reorganizar

materia, energía, procesos y acción humana para generar materia viva organizada, valor multicapital y trayectorias territoriales más estables en el tiempo [1], [2]. En este sentido, VxC se inscribe dentro de la arquitectura general del modelo IPIDEAS.S, abordándose aquí su dimensión físico-química y sistémica como sustento de la validación prospectiva desarrollada en el artículo.

Desde esta perspectiva, VxC articula procesos naturales, como la fotosíntesis, con criterios de ingeniería orientados a transformar carbono, agua, energía y trabajo útil en materia viva organizada, funcionalidad ecosistémica y beneficios acumulativos [3], [4]. Así, la sostenibilidad deja de entenderse únicamente como contención del daño y pasa a concebirse como una dinámica activa de regeneración, en la que la materia viva se organiza y se reorganiza funcionalmente dentro de sistemas abiertos capaces de sostener y mejorar su desempeño en el tiempo.

2.1. Fundamento físico-químico regenerativo: el CRFC como base del modelo VxC

El fundamento físico-químico de VxC se expresa en el CRFC (Ciclo Regenerativo Físico-Químico Fotosintético del Carbono), entendido como el proceso mediante el cual el CO₂, el agua y la energía solar pueden reorganizarse para dar lugar a materia viva que se organiza y se reorganiza funcionalmente [3], [5]. Este principio, observado en la fotosíntesis, se interpreta aquí como base operativa de una ingeniería regenerativa orientada a transformar carbono en vida útil, funcionalidad ecosistémica y valor verificable.

A diferencia de los enfoques convencionales que tratan el carbono como residuo o externalidad, el CRFC lo concibe como un insumo estructural dentro de sistemas abiertos capaces de disminuir entropía local mediante el ingreso de energía externa, conforme a los principios de la termodinámica [4], [11]. En este marco, la relación VxC se utiliza como una convención operativa para expresar que la regeneración requiere captura de carbono y aporte energético suficiente para organizar y reorganizar funcionalmente materia viva.

La ecuación regenerativa del proceso se expresa así

$$V = C + 6.5 \text{ kWh/kg}$$

Donde:

V vida regenerada, expresada como materia viva organizada y operativa.

C carbono capturado (kg CO₂ equivalente).

6.5 energía solar promedio necesaria para transformar 1 kg de CO₂ en materia viva útil [6].

Esta formulación no debe interpretarse como una ecuación química estricta, sino como una convención operativa que resume el principio regenerativo del modelo: la regeneración requiere carbono, agua, energía y condiciones funcionales que permitan la organización de la materia viva.

Desde esta lógica, regenerar no equivale solo a captar CO₂, sino a restablecer relaciones entre materia, energía y organización para producir funcionalidad ecológica, productiva y social.

La figura representa el CRFC como una ruta regenerativa mediante la cual el CO₂ atmosférico, el agua y la energía solar se convierten en materia viva organizada. Este proceso opera en tiempos biológicos y territoriales relevantes, genera oxígeno y funcionalidad ecosistémica, y permite comprender la regeneración como una dinámica físicamente sustentada y cuantificable [3], [4], [6].

CO₂, Energía Solar, Fotosíntesis, = Biomasa + Aire + Agua

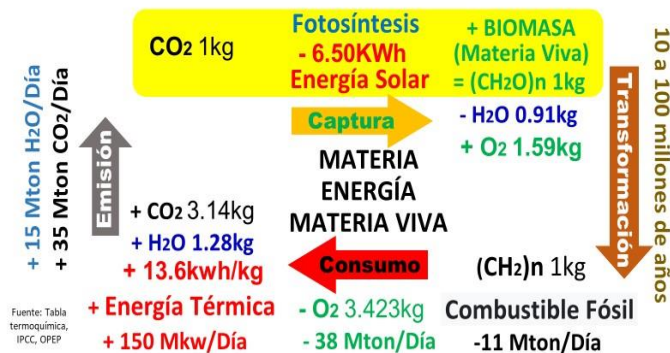


Figura 1. CRFC – Ciclo Regenerativo Fotosintético del Carbono, Fuente: Elaboración propia basada en principios bioquímicos del VxC e IPIDEAS.S

2.2. Sistema 4P y regeneración multicapital

Sobre esta base biofísica, VxC se inserta en un sistema multicapital estructurado en cuatro componentes interdependientes: Planeta, Personas, Procesos y Provecho (4P), sustentado en enfoques de dinámica de sistemas y teoría de sistemas vivos [2], [3]. Este sistema permite comprender que la regeneración no depende de un solo factor, sino de la articulación funcional entre condiciones biofísicas, acción humana, procesos de transformación y resultados útiles.

En esta lógica, Planeta aporta la base material y energética; Personas activa, orienta y sostiene la transformación; Procesos organiza la conversión de insumos en resultados; y Provecho expresa el valor útil que puede retroalimentar el sistema. Así, la economía circular trasciende el reciclaje o la mera eficiencia, para entenderse como una dinámica regenerativa capaz de restituir, reorganizar y multiplicar valor [4], [5].

La sostenibilidad, por tanto, no depende únicamente de la disponibilidad de recursos, sino de la calidad de las relaciones funcionales entre estos cuatro componentes. En VxC, la regeneración se expresa precisamente en la capacidad del sistema para reorganizar dichas relaciones de modo que la materia, la energía, la acción humana y los beneficios producidos converjan hacia trayectorias más estables y sostenibles.



Figura 2. Economía circular: termodinámica del balance de energía, materia biótica y abiótica del planeta.

Fuente: Elaboración propia basada en la dinámica de sistemas de Forrester (1969) y adaptada al VxC

La figura muestra el flujo de transformación y retorno entre los componentes del sistema 4P, evidenciando que la sostenibilidad depende de la articulación funcional entre estos elementos y no únicamente de la disponibilidad de recursos [2], [4].

2.3. Indicadores del proceso regenerativo: CM, BM y ROP

Para evaluar el comportamiento de los procesos regenerativos, VxC incorpora indicadores que permiten medir el rendimiento del sistema en términos físicos y funcionales, basados en enfoques exergéticos y de eficiencia en sistemas abiertos [1], [3]. Estos indicadores son útiles para comparar alternativas, identificar restricciones y orientar decisiones en clave regenerativa.

Los principales indicadores son:

CM (Consumo Marginal): recurso adicional requerido para generar una unidad funcional adicional.

BM (Beneficio Marginal): valor regenerativo incremental obtenido.

ROP (Rendimiento Operativo del Proceso): relación entre beneficio y consumo marginal, expresada como $ROP = BM / CM$.

Interpretación:

ROP > 1: Indica un proceso regenerativo, pues el beneficio generado supera el consumo incremental

ROP < 1: Indica un proceso degradativo, pues el consumo incremental supera el valor funcional.

Estos indicadores permiten superar la dependencia exclusiva de métricas monetarias y desplazar la evaluación hacia criterios más consistentes con el rendimiento físico, funcional y multicapital del sistema. En ese sentido, su utilidad no se restringe al control de eficiencia, sino que fortalece la capacidad de diseñar y gobernar procesos regenerativos con mayor base técnica.

¿Precio ≠ Valor = Consumo = Cantidad = Beneficios?

$$\begin{aligned}
 ROP \left\{ \begin{aligned}
 RM &= \frac{T}{CMV} = \frac{\text{Ventas} - CMV}{\text{Consumo Marginal Variable}} = \frac{BM}{CM} = \frac{\text{Beneficio Marginal}}{\text{Consumo Marginal}} \\
 RO &= \frac{T}{CO} = \frac{BM}{CO} = \frac{\text{Throughput}}{\text{Consumo Marginal Operativo}} \\
 ROP &= \frac{BM}{CM} = \frac{T - CO}{CO} = \frac{BN}{CO} = \frac{\text{Beneficios Neto}}{\text{Consumo Operativo}} \\
 RV &= \frac{T}{V} = \frac{BM}{V} = \frac{\text{Ventas} - CM}{\text{Ventas}} = \text{Margen}
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Figura 3. ROP y rendimiento operativo de los procesos: cuantificar el valor regenerativo desde el consumo y beneficio marginal.

Fuente: Elaboración propia según Lu Chang-Say (2018)

La figura sintetiza la relación entre consumo marginal, beneficio marginal y rendimiento operativo del proceso, mostrando cómo estas métricas permiten evaluar el carácter regenerativo o degradativo de las decisiones y alternativas analizadas.

2.4. VxC como sistema de generación de valor vivo: 3V y 3P

VxC entiende la regeneración como un proceso que produce simultáneamente resultados ecológicos, sociales y de provecho. Por ello, organiza su lógica de valor en tres dimensiones complementarias (3V), vinculadas con tres pilares de sostenibilidad (3P). Esta relación permite interpretar la

regeneración no solo como incremento de biomasa o captura de carbono, sino como creación de valor vivo en sentido multicapital.

En esta lógica, la **vida regenerada** expresa la restauración biofísica; el **valor generado** incorpora bienestar y funcionalidad social; y la **vida próspera** representa retornos útiles, innovación y sostenibilidad del provecho. Estas dimensiones no operan por separado, sino de manera interdependiente, configurando una dinámica multicapital en la que la regeneración requiere una base energética mínima y se expresa simultáneamente en el plano ecológico, social y productivo.

3V Dimensión VxC	3P - Pilar de sostenibilidad	Descripción
V1: Vida regenerada	Planeta	Materia viva organizada, ecosistemas y reducción de entropía local
V2: Valor generado	Personas	Bienestar, inclusión, resiliencia social y capacidades
V3: Vida próspera	Provecho	Empleo, innovación, producción útil y beneficios sostenibles

La figura muestra que la regeneración requiere una base energética mínima y que sus resultados se expresan de manera simultánea en dimensiones ecológicas, sociales y de provecho, integradas en una misma lógica de creación de valor vivo.

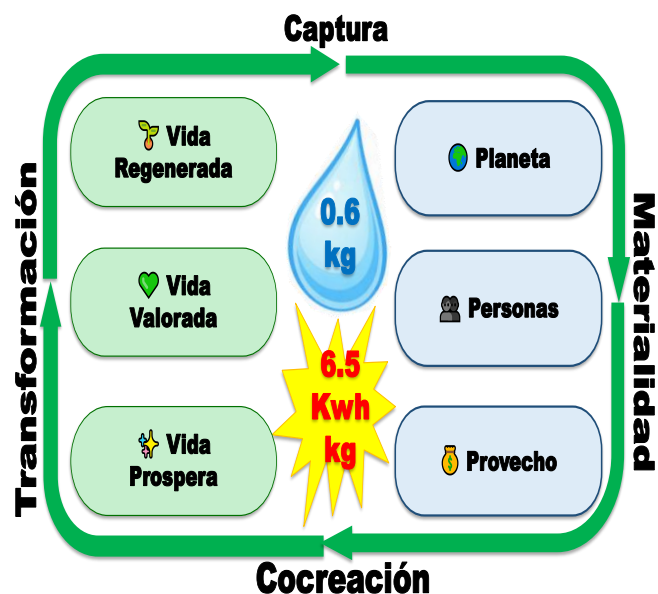


Figura 4. Modelo VxC de cocreación de vida: Relación entre 3V, 3P y el balance energético regenerativo (6.5 kWh/kg)

Fuente: Elaboración propia adaptada de IP.IDEAS.S

Este enfoque permite transformar entropía en vida funcional y multicapital, reorganizando la sostenibilidad como un proceso operativo, verificable y compartido [1], [4].

2.5. Materialidad regenerativa: del reporte a la acción transformadora

En VxC, la materialidad se entiende como un proceso dinámico derivado de la transformación regenerativa de recursos físicos, energéticos y sociales. En este enfoque, el carbono capturado, la energía absorbida, la materia viva generada y los beneficios obtenidos forman parte de un mismo proceso de estructuración y reorganización de valor [1], [2].

Desde esta perspectiva, la materialidad deja de ser solo un criterio de relevancia para reportar impactos y pasa a convertirse en un criterio de diseño activo. Lo materialmente relevante no es únicamente aquello que debe informarse, sino aquello que debe transformarse, sostenerse y verificarse dentro del proceso regenerativo. Así, VxC permite vincular la sostenibilidad con trayectorias efectivas de reorganización sistémica, en las que la acción se orienta no solo a medir resultados, sino a producirlos de manera más coherente con la dinámica del sistema.

2.6. Diferencias estratégicas frente a marcos tradicionales

VxC trasciende los enfoques convencionales de sostenibilidad que usualmente informan impactos históricos o aplican criterios de cumplimiento normativo. En su lugar, se proyecta hacia la regeneración activa del sistema, integrando indicadores operativos como ROP, BM, RM (Rendimiento Marginal) y el propio índice VxC como métricas de desempeño regenerativo con base científica y física [3], [5].

Su enfoque estratégico puede sintetizarse en tres principios:

- No solo compensa, sino convierte;
- No solo reduce, sino regenera;
- No solo informa, sino orienta la acción y la transformación.

Estos principios derivan de una lógica de rediseño sistémico que convierte impactos negativos en potencial regenerativo y reconfigura la sostenibilidad como una estrategia activa de transformación material, energética y organizacional. En consecuencia, la sostenibilidad deja de limitarse a la corrección de externalidades y pasa a entenderse como capacidad de reorganizar funcionalmente el sistema para sostener vida, valor y provecho.

2.7. Cierre estratégico del marco regenerativo

La propuesta VxC convierte drenajes —como residuos, emisiones y desperdicios— en fuerzas regenerativas activas. Esto permite que la sostenibilidad deje de ser una promesa futura para convertirse en una práctica ingenieril presente, trazable, verificable y guiada por propósito. Desde esta perspectiva, VxC se posiciona como una arquitectura operativa que permite transitar de modelos de compensación pasiva a procesos de creación de valor vivo organizado, fundamentados en métricas físicas y principios biofísicos regenerativos [1], [4].

En síntesis, el marco conceptual de VxC propone una lectura físico-química y sistémica de la regeneración, en la que la materia viva se organiza y se reorganiza funcionalmente mediante la articulación entre carbono, agua, energía, procesos y acción humana. Esta base conceptual sustenta la validación prospectiva desarrollada en el artículo y permite comprender la sostenibilidad regenerativa como una trayectoria construible y gobernable en el tiempo.

III. Marco operativo

El modelo VxC (Vida por Carbono) se implementa mediante una arquitectura metodológica integrada que articula estructura conceptual, estrategia operativa y acción regenerativa multiescalar. Esta arquitectura permite diseñar, gestionar y evaluar procesos regenerativos con base en fundamentos científicos, termodinámicos, sistémicos y participativos [1], [2]. En el presente trabajo, el marco operativo cumple la función de traducir los principios conceptuales de VxC en un conjunto coherente de herramientas orientadas a la intervención, el aprendizaje y la mejora continua en contextos territoriales complejos.

Inspirado en enfoques sistémicos y adaptativos, como los desarrollados por Checkland y Capra & Luisi [3], [4], este marco se organiza en cuatro componentes interrelacionados: **CEPA**, como núcleo operativo adaptativo; el **método de los cinco pasos**, derivado de la lógica estratégica de la Teoría de Restricciones (ToC); **ADFI**, como secuencia de gestión regenerativa; y el **lienzo de los 9 Pilares Estratégicos (9PE)**, como soporte estructural para el diseño sistémico y multiactor. La articulación entre estos componentes permite pasar del diagnóstico a la acción, y de la acción a la evaluación y retroalimentación del sistema.

3.1. Núcleo operativo: CEPA

El núcleo operativo **CEPA (Calcular, Entender, Planear, Actuar)** se estructura como un ciclo adaptativo orientado a integrar análisis técnico, comprensión sistémica, planificación estratégica y acción transformadora [1], [2]. Su función dentro del modelo VxC es activar procesos de intervención regenerativa capaces de operar en contextos inciertos, complejos y cambiantes, sin perder coherencia metodológica ni trazabilidad en la toma de decisiones.

En el marco de VxC, CEPA no se limita a una secuencia lineal de pasos, sino que funciona como una arquitectura operativa con tres dimensiones complementarias:

- **CEPA estratégico**, orientado al cálculo, análisis de datos, simulación, planificación técnica y modelado regenerativo [3].
- **CEPA creativo**, orientado a la concepción, experimentación, ajuste y mejora continua de soluciones regenerativas [2].
- **CEPA participativo**, orientado a la comunicación, educación, participación y apropiación social del proceso [4].

Esta triple dimensión permite que CEPA articule rigor técnico, capacidad adaptativa y movilización social, evitando que la regeneración quede reducida a un ejercicio exclusivamente analítico o exclusivamente participativo. En este sentido, CEPA opera como el núcleo dinámico del modelo, pues conecta la comprensión del sistema con decisiones y acciones orientadas a reorganizarlo funcionalmente.

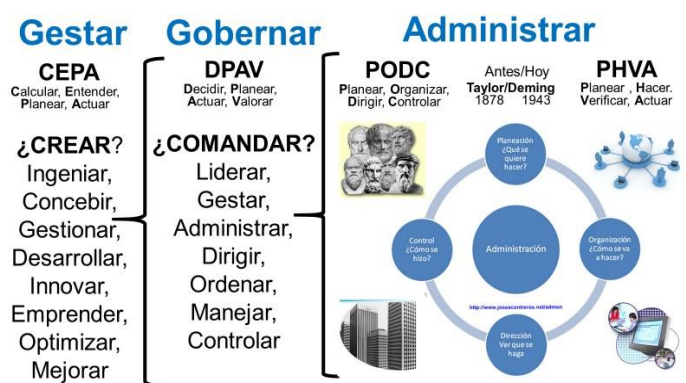


Figura 5. Ciclo CEPA: Sistema GETEC de Ingeniería Técnica y Creativa.
Fuente: Elaboración propia según Lu Chang-Say (2018)

La figura representa las dimensiones integradas del CEPA como una arquitectura funcional de ingeniería regenerativa, orientada a concebir, gestar, operar y ajustar procesos de transformación positiva.

3.2. ADFI: ciclo de gestión estratégica regenerativa para la implementación, operación y mejora del sistema

ADFI (Analizar, Definir, Formular, Implementar) constituye la secuencia metodológica mediante la cual VxC

organiza el tránsito desde la comprensión del problema hasta la ejecución de respuestas regenerativas. Se trata de un proceso iterativo que integra pensamiento sistémico, criterios exergéticos y principios de priorización estratégica, tomando como referencia la Teoría de Restricciones (ToC) y otras herramientas de diseño y evaluación [1], [2], [3].

Cada fase del proceso cumple una función específica:

- **Analizar:** identificar las condiciones físicas, sociales, energéticas, ecológicas y organizativas del sistema, estableciendo una línea base y reconociendo restricciones, interdependencias y potencialidades [3], [4].
- **Definir:** precisar el propósito estratégico (Intención, Visión y Misión), las metas regenerativas, los actores clave y los criterios de desempeño del sistema [5].
- **Formular:** diseñar soluciones, alternativas y configuraciones de intervención coherentes con la lógica multicapital del modelo [6].
- **Implementar:** ejecutar acciones, monitorear su desempeño y activar mecanismos de retroalimentación y ajuste mediante el ciclo CEPA [1], [4]

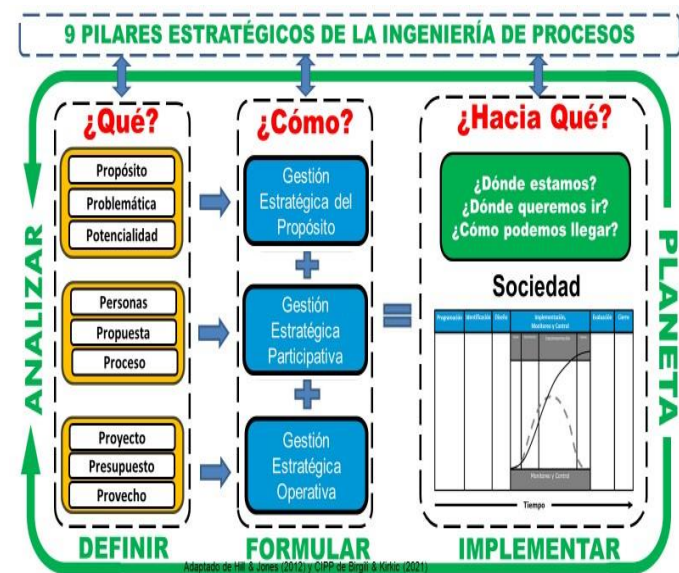


Figura 6. Proceso ADFI: muestra la iteración continua entre fases y su articulación con CEPA y los 9PE.

Fuente: Elaboración propia adaptada de la tesis IP.IDEAS.S(2025)

La importancia de ADFI radica en que evita separar artificialmente diagnóstico, diseño e implementación. En VxC, estas fases forman parte de una misma dinámica operativa y adaptativa, donde cada decisión debe poder ser revisada a la luz de la respuesta del sistema y de los resultados observados. De este modo, ADFI no solo organiza el proceso, sino que fortalece la capacidad del modelo para operar en condiciones reales de incertidumbre.

3.3. Enfoque estratégico: definir el propósito del sistema

Todo sistema regenerativo requiere una meta explícita que oriente sus decisiones, prioridades y criterios de evaluación. En VxC, esta meta no se limita a minimizar daños ni a cumplir exigencias normativas, sino que se orienta a regenerar vida, funcionalidad ecosistémica y valor multicapital a partir del carbono, la energía solar y la acción humana organizada [1], [2].

Este principio se vincula con la reinterpretación de la Teoría de Restricciones (ToC), en la que definir la meta constituye el punto

de partida de toda arquitectura de mejora [3]. En el caso de VxC, dicho propósito se alinea con los cinco propósitos clave del desarrollo sostenible: **Personas, Planeta, Prosperidad, Paz y Pactos**. Estos cinco referentes permiten situar la regeneración dentro de una lógica más amplia de transformación sostenible y cooperación multiactor [4].

Sobre esa base, el marco operativo propone un método de cinco pasos:

1. **Definir el propósito compartido:** establecer qué forma de vida, funcionalidad o valor se busca regenerar y por qué.
2. **Diagnosticar las restricciones críticas:** identificar qué bloquea o debilita la trayectoria regenerativa del sistema.
3. **Diseñar la estrategia regenerativa:** seleccionar herramientas, indicadores y cursos de acción coherentes con el propósito definido.
4. **Alinear recursos y actores:** movilizar capacidades técnicas, sociales e institucionales en torno a la estrategia.
5. **Evaluar, retroalimentar y escalar:** medir resultados, ajustar la intervención y proyectar su ampliación territorial.

Este enfoque permite que la sostenibilidad sea tratada como un proceso orientado por propósito y no solo como una suma de acciones dispersas. Su aporte central consiste en vincular la dirección estratégica del sistema con criterios operativos concretos de regeneración, desempeño y aprendizaje adaptativo.



Figura 7. Cinco propósitos clave del desarrollo sostenible (5PC-ODS)

Fuente: Elaboración propia según ODS

La figura representa la alineación estratégica de VxC con los grandes propósitos del desarrollo sostenible y muestra cómo estos orientan la selección de herramientas, decisiones y metas regenerativas.

3.4. Lienzo de los 9 Pilares Estratégicos (9PE)

El lienzo de los **9 Pilares Estratégicos (9PE)** constituye la base estructural del diseño regenerativo dentro del modelo VxC. Su función es organizar la formulación estratégica desde una perspectiva lógica, multicapital y participativa, asegurando coherencia entre diagnóstico, propósito, propuesta de intervención y resultados esperados [1], [2].

Los 9PE se agrupan en tres bloques funcionales interdependientes:

3PPE: Propósito, Problemática y Potencialidad.

3PPP: Personas, Propuesta y Proceso.

3PPO: Proyecto, Presupuesto y Provecho.

Cada bloque responde a preguntas clave del proceso regenerativo. El primero permite comprender el sentido y las condiciones del sistema; el segundo organiza la interacción entre actores, soluciones y transformación operativa; y el tercero vincula la ejecución con la asignación de recursos y la generación de valor. En conjunto, estos bloques facilitan una formulación más trazable, comparable y alineada con evidencia.

El aporte del lienzo 9PE no radica únicamente en ordenar componentes, sino en hacer visible la relación entre propósito, actores, decisiones, recursos y provecho. De esta manera, el modelo evita que la regeneración sea tratada como un conjunto fragmentado de iniciativas y la sitúa como una arquitectura integrada de diseño estratégico.

La figura muestra cómo los 9PE estructuran el diseño estratégico regenerativo y permiten articular las fases de ADFI con una lógica multiactor y multicapital.



Figura 8. Lienzo de los 9 pilares estratégicos (9PE)
Fuente: Adaptado del marco MENS (Lu Chang-Say 2023)

3.5. Síntesis del marco operativo

En conjunto, el marco operativo de VxC articula cuatro niveles complementarios: un núcleo adaptativo de acción (**CEPA**), una secuencia metodológica de gestión (**ADFI**), una definición estratégica del propósito basada en restricciones y metas compartidas (**método de los cinco pasos**) y un soporte estructural para el diseño sistémico (**9PE**). Esta combinación permite traducir el enfoque regenerativo en decisiones, procesos e intervenciones más coherentes con la complejidad territorial.

Su aporte metodológico principal consiste en integrar ciencia, participación, estrategia y evaluación dentro de una sola arquitectura operativa. Así, el modelo VxC no solo propone una visión conceptual de la regeneración, sino también un modo de organizarla, implementarla y aprender de ella en contextos concretos. Esta base metodológica sustenta el desarrollo del marco aplicativo y, en particular, la validación prospectiva mediante cadenas de Márkov presentada en la sección siguiente.

IV. Marco aplicativo

La validación prospectiva del modelo VxC exige no solo una base conceptual y operativa sólida, sino también un marco aplicativo capaz de representar la dinámica real de los sistemas territoriales bajo condiciones de incertidumbre. En este contexto, las cadenas de Márkov constituyen una herramienta pertinente para modelar probabilidades de transición entre estados del sistema y explorar la viabilidad de trayectorias hacia configuraciones más estables, sostenibles y regenerativas. Su utilidad radica en que permiten analizar procesos de cambio no como secuencias lineales, sino como dinámicas probabilísticas

condicionadas por la estructura del sistema, las decisiones estratégicas y la capacidad de respuesta de los actores involucrados [6], [7], [8].

En el presente trabajo, este enfoque se articula con la lógica multicapital de VxC y con la descomposición funcional del sistema en Planeta, Personas, Procesos y Provecho (PT4P). De esta manera, el marco aplicativo no se limita a proyectar escenarios abstractos, sino que busca evaluar si la sostenibilidad regenerativa constituye una trayectoria efectivamente alcanzable en sistemas territoriales concretos, tomando como referencia el caso ATA.

4.1. Evaluación prospectiva participativa con Márkov

La evaluación prospectiva participativa con cadenas de Márkov permite representar la transición de un sistema territorial desde estados de baja articulación o desmovilización hacia estados de mayor organización, compromiso regenerativo y estabilidad funcional. En este trabajo, dicha modelación se orienta a examinar cómo la acción humana organizada puede modificar la trayectoria del sistema y aumentar la probabilidad de convergencia hacia estados sostenibles.

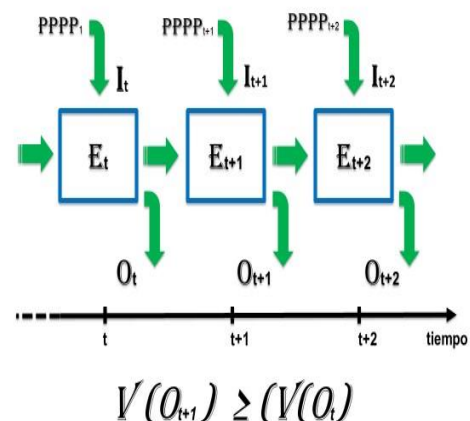
El interés central no reside únicamente en identificar un estado final deseable, sino en comprender la dinámica de transición entre estados y las condiciones que favorecen o dificultan dicha transición. Desde esta perspectiva, el sistema participativo puede expresarse, de manera simplificada, en tres estados generales: desmovilización, activación y compromiso regenerativo. Cada uno de ellos representa un nivel distinto de articulación social, apropiación del propósito y capacidad de sostener procesos de transformación en el tiempo.

La modelación con Márkov permite entonces:

- definir los estados relevantes del sistema participativo;
- estimar las probabilidades de transición entre ellos;
- simular escenarios de evolución bajo distintas condiciones de intervención;
- y
- analizar la sensibilidad del sistema frente a cambios estratégicos, particularmente en el componente Personas.

Esta aproximación resulta coherente con el enfoque de VxC, pues permite evaluar la sostenibilidad no como una condición estática, sino como una trayectoria probabilística cuya consolidación depende de la calidad de las decisiones, de la organización del sistema y de la capacidad de aprendizaje colectivo.

Transiciones de un Proceso con Estados de Incertidumbre, a Certidumbre Estable y Sostenible



Adaptado de Cepal, Gallopín G. 2003

Figura 9. Transiciones de un Proceso con Estados de Incertidumbre hacia Certidumbre Estable y Sostenible

Fuente: Elaboración propia, adaptado de CEPAL (Gallopín 2003)

La figura ilustra la lógica general de transición del sistema desde estados de mayor incertidumbre hacia configuraciones futuras más organizadas. En ella se representa cómo las intervenciones estratégicas pueden modificar la trayectoria del proceso y elevar la probabilidad de alcanzar estados con mayor estabilidad, siempre que el valor futuro del sistema no sea inferior al valor inicial. Esta representación es consistente con el uso de modelos estocásticos aplicados a sistemas complejos y refuerza la lectura de la sostenibilidad como trayectoria construible.

4.2. Evaluación prospectiva con Márkov y PT4P

La evaluación prospectiva del modelo VxC se fortalece al integrarse con una lectura multicapital del sistema a través del enfoque PT4P, que descompone la Productividad Total de los Factores en cuatro componentes funcionales: Planeta, Personas, Procesos y Provecho. Esta adaptación permite trasladar el análisis desde una noción convencional de productividad hacia una interpretación regenerativa del desempeño territorial.

En este marco, las cadenas de Márkov permiten simular la evolución probabilística del sistema, mientras que PT4P aporta una estructura analítica para interpretar dicha evolución en términos biofísicos, sociales, operativos y de generación de valor. A su vez, la referencia a KLEMS permite reconocer que el rendimiento del sistema depende de combinaciones dinámicas entre capital, trabajo, energía, materiales y servicios, aunque en este trabajo tales componentes son reinterpretados desde una lógica regenerativa y territorial.

La articulación entre estos enfoques cumple tres funciones principales. En primer lugar, permite representar transiciones de estado entre configuraciones degradativas, intermedias y regenerativas. En segundo lugar, ofrece una base para interpretar cómo dichas transiciones afectan el rendimiento del sistema en cada una de sus dimensiones funcionales. En tercer lugar, facilita una lectura integrada entre desempeño físico, eficiencia exergética y retornos multicapitales.

Así, la evaluación prospectiva no se limita a proyectar probabilidades abstractas, sino que busca responder una cuestión más sustantiva: si las trayectorias del sistema muestran convergencia hacia estados más sostenibles, ¿en qué componente ocurre dicha mejora y qué tan estable resulta en el tiempo? En el caso de VxC, esta pregunta es especialmente relevante porque el análisis sugiere que la sostenibilidad no depende solo del componente biofísico o tecnológico, sino de la activación efectiva del componente Personas, entendido como sensibilización, empoderamiento, capacitación y capacidad de acción colectiva.

Prospectiva y Proyectiva de los Procesos Sostenibles, de Personas en sinergia con la Energía y Materia, Biótica y Abiótica del Planeta



Figura 10. Evaluación Exérgica Aplicando Principios de Márkov y KLEMS
Fuente: Elaboración propia según integración de teorías económicas y termodinámicas del modelo VxC

La figura sintetiza esta integración metodológica. Las cadenas de Márkov aportan la lógica de transición probabilística; KLEMS ofrece una base de lectura productiva de los factores; y PT4P reorganiza dicha lectura desde una perspectiva regenerativa. En conjunto, estas herramientas permiten evaluar con mayor solidez los efectos de las decisiones estratégicas sobre la estabilidad estructural, la eficiencia energética, la resiliencia socioecológica y la generación de valor multicapital.

4.3. Escenarios prospectivos: convergencia regenerativa

Con base en el esquema anterior, se construyen tres escenarios prospectivos orientados a representar trayectorias contrastantes del sistema territorial: un escenario inicial degradativo, un escenario intermedio de intervención parcial y un escenario deseable de convergencia regenerativa. Estos escenarios no deben entenderse como predicciones cerradas, sino como configuraciones analíticas que permiten comparar la dirección, consistencia y estabilidad de distintas trayectorias posibles.

El **escenario inicial** representa una configuración dominada por presiones extractivas, baja articulación social y procesos insuficientemente orientados a la regeneración. En este caso, el sistema mantiene una dinámica inercial, con mayor tendencia al deterioro que a la reorganización funcional. El predominio de relaciones lineales de consumo y la debilidad del componente Personas reducen la probabilidad de convergencia hacia estados sostenibles.

El **escenario intermedio** refleja la existencia de acciones correctivas o mejoras parciales, principalmente concentradas en procesos o resultados, pero todavía insuficientemente articuladas con la base biofísica y social del sistema. Aunque pueden observarse avances puntuales, estos no logran consolidar una trayectoria regenerativa estable, precisamente porque no existe aún una reorganización sistémica coherente entre Planeta, Personas, Procesos y Provecho.

El **escenario deseable**, en cambio, representa una intervención estratégica multiactor en la que los cuatro componentes del sistema mejoran de manera sinérgica. En esta configuración, la reducción de entropía no depende de un solo factor, sino de la articulación entre soporte ecológico, acción humana organizada, procesos rediseñados y provechos que retroalimentan positivamente al sistema. Este escenario expresa, por tanto, la trayectoria regenerativa que el modelo VxC considera viable bajo condiciones de intervención apropiadas.

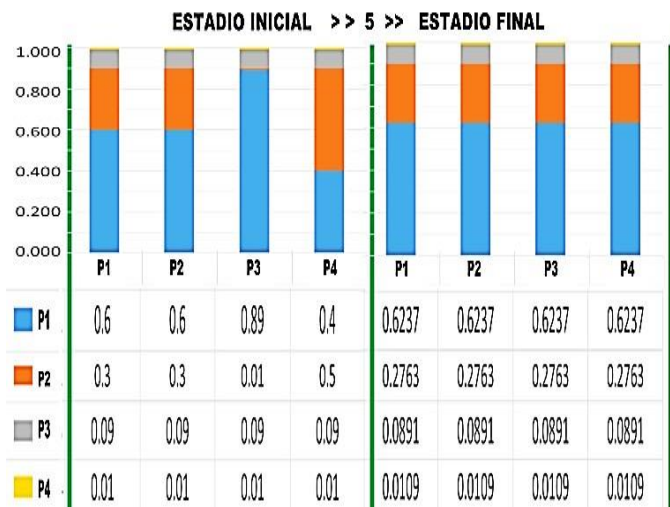


Figura 11. Escenario Inicial – Prospectiva PTF.
Fuente: Elaboración propia con base en modelo PT4P aplicado a territorios extractivos

La figura representa una configuración de alta presión sobre Planeta y Personas, con tendencia degradativa y baja capacidad de reorganización regenerativa.



Figura 12. Escenario Alternativo – Intervención Parcial.
Fuente: Elaboración propia según simulación de convergencia limitada en sistemas desarticulados

La figura muestra mejoras parciales en Procesos y Provecho, pero todavía sin una articulación suficiente con Planeta y Personas, lo que limita la estabilidad estructural del sistema.

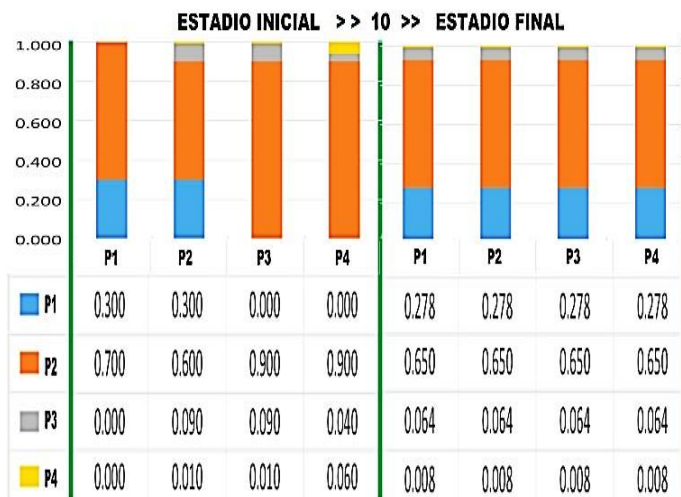


Figura 13. Escenario Deseable – Convergencia hacia el Equilibrio.
Fuente: Elaboración propia con base en Ingeniería regenerativa multiactor y Márkov

La figura representa una trayectoria de intervención estratégica en la que la mejora conjunta de los cuatro componentes incrementa la eficiencia, la estabilidad y la viabilidad regenerativa del sistema. Desde la perspectiva del artículo, este escenario es el que mejor expresa la posibilidad de construir sostenibilidad como trayectoria estable y no solo como aspiración normativa.

4.4. Evaluación exergética y métricas de ingeniería regenerativa

La evaluación prospectiva del modelo VxC se complementa con una lectura exergética orientada a medir el rendimiento del sistema más allá de criterios exclusivamente monetarios. Este enfoque permite valorar la capacidad de las intervenciones para transformar recursos, energía y organización social en beneficios regenerativos verificables, tanto en el plano biofísico como en el social y productivo.

Desde esta perspectiva, invertir estratégicamente no equivale simplemente a realizar un desembolso inicial, sino a introducir

capacidad de organización, dirección y aprendizaje dentro del sistema. Una inversión bien orientada puede reducir entropía, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y activar procesos capaces de producir valor multicapital acumulativo. Por el contrario, una inversión mal estructurada puede aumentar consumos, reproducir ineficiencias y profundizar trayectorias degradativas.

En este marco, tres métricas adquieren particular relevancia. El **ROP (Rendimiento Operativo del Proceso)** permite medir la relación entre el valor regenerativo generado y los recursos incrementalmente consumidos. El **BM (Beneficio Marginal)** expresa el valor adicional generado por cada unidad adicional invertida o consumida. La **PTF**, reinterpretada mediante el enfoque **PT4P**, permite evaluar el desempeño global del sistema en términos de articulación entre Planeta, Personas, Procesos y Provecho. En conjunto, estas métricas permiten valorar no solo cuánto produce el sistema, sino cómo lo produce y con qué capacidad de sostener o mejorar su trayectoria en el tiempo.



Figura 14. Inversión clave y ciclo de vida en procesos estratégicos regenerativos
Fuente: Elaboración propia con datos del piloto ATA – Amazonía 2025

La figura expresa la relación entre inversión estratégica, organización del proceso y generación de valor a lo largo del ciclo de vida del sistema. Su aporte principal consiste en mostrar que el rendimiento regenerativo no depende únicamente de la magnitud de la inversión, sino de su capacidad para activar trayectorias de mejora estructural.

Tabla 1
Indicadores del valor exergético acumulado proyectado y TIR del sistema agroforestal
Fuente: Elaboración propia

Indicador	Valor estimado
Producción de biomasa (kg/ha/año)	1,200
Energía solar absorbida (kWh/ha/año)	65,000
Captura estimada de CO2 (kg/año)	4,500
Empleos directos generados	15
ROP	1.35
BM	0.85

IRR (Tasa Interna de Retorno) Programa ATA											
% / Mil. / Año	Inv	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TIR E	424% - 50	112	337	1,011	3,033	9,098	27,294	81,881	245,644	736,932	2,210,795
TIR F	307% - 100	112	337	1,011	3,033	9,098	27,294	81,881	245,644	736,932	2,210,795
TIR S	307% - 100	112	337	1,011	3,033	9,099	27,297	81,890	245,670	737,010	2,211,031
TIR A	2595% - 0.07	2	5	15	44	130	389	1,163	3,484	10,438	31,288

Tabla 1 sintetiza los resultados del modelo ATA (Aldea Tambo Autosustentable), como unidad territorial regenerativa. A través de ella se visualiza el flujo de valor desde la inversión inicial hasta la generación de beneficios tangibles y multicapitales. En ella se observa que el sistema no solo presenta capacidad de captura y reorganización biofísica, sino también generación de empleo, rendimiento operativo favorable y retorno proyectado significativo. En términos del presente artículo, estos resultados respaldan la viabilidad exergética, social y económica del enfoque VxC y sugieren su potencial de replicabilidad en otros contextos territoriales, siempre que se mantenga la coherencia entre propósito, intervención estratégica y fortalecimiento del componente Personas.

4.5. Cierre del marco aplicativo

En conjunto, el marco aplicativo permite mostrar que la validación prospectiva del modelo VxC no se reduce a una formulación conceptual, sino que puede expresarse mediante herramientas analíticas capaces de representar transiciones de estado, estimar estabilidad estructural y evaluar rendimiento multicapital. La integración entre cadenas de Márkov, PT4P y métricas exergéticas permite así sostener que la sostenibilidad regenerativa constituye una trayectoria posible, pero no automática.

El análisis del caso ATA sugiere que dicha trayectoria depende de la articulación funcional entre los componentes del sistema y, de manera especialmente decisiva, del fortalecimiento del componente Personas. En consecuencia, la principal contribución del marco aplicativo no es solo demostrar que existe un escenario deseable, sino evidenciar que su materialización exige intervención estratégica, organización social y capacidad de sostener procesos regenerativos en el tiempo.

V. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

El desarrollo del presente artículo ha permitido integrar un marco conceptual, operativo y aplicativo para la validación prospectiva del modelo VxC en sistemas territoriales. A través del uso de cadenas de Márkov, complementadas con el enfoque PT4P y métricas exergéticas, se ha podido analizar la dinámica de transición entre distintos estados del sistema y evaluar la viabilidad de trayectorias hacia configuraciones más estables, sostenibles y regenerativas.

Los resultados obtenidos no solo evidencian que la sostenibilidad puede modelarse como una trayectoria probabilística, sino que también permiten identificar los factores que condicionan su consolidación en el tiempo. En particular, el análisis confirma que dicha trayectoria no se activa de manera automática, sino que depende de la capacidad del sistema para reorganizar sus componentes funcionales, especialmente a través del fortalecimiento del factor Personas.

Sobre esta base, el presente capítulo sintetiza los principales hallazgos del estudio, propone criterios conceptuales para la priorización estratégica en contextos regenerativos, y plantea recomendaciones y líneas de trabajo futuro orientadas a fortalecer la aplicación del modelo VxC en distintos sistemas territoriales.

5.1. Nota conceptual para la priorización estratégica

Como criterio complementario para la interpretación de los resultados y la toma de decisiones en contextos regenerativos, conviene distinguir seis categorías de priorización estratégica que ayudan a ordenar el diseño y la intervención del sistema.

Clave: elemento imprescindible para la existencia y funcionamiento básico del sistema. Su omisión impide el

desarrollo del propósito regenerativo y, por tanto, debe ser considerado desde el inicio del diseño estructural [1].

Estratégico: factor esencial para alcanzar la visión y orientar la trayectoria del sistema. Su ausencia no impide la existencia del sistema, pero sí limita significativamente su alcance, dirección y capacidad de consolidación [2].

Crítico: condición que emerge cuando aspectos relevantes han sido postergados o insuficientemente atendidos. Su efecto es acumulativo y puede comprometer el rendimiento, la estabilidad o la continuidad operativa del sistema [3].

Riesgo alto: amenaza potencial significativa que debe ser monitoreada y gestionada oportunamente. Aunque no produce de inmediato un colapso sistémico, puede deteriorar el desempeño y debilitar la trayectoria regenerativa [4].

Catástrofe: situación de colapso sistémico asociada a la omisión o desatención de factores clave. Su ocurrencia expresa fallas graves de diseño, previsión o gestión, y exige respuestas estructurales más que correctivas [5].

Incertidumbre estructural: fragilidad derivada de errores de concepción, articulación o diseño del sistema. A diferencia del riesgo externo, esta incertidumbre se origina en fallas internas de estructuración y puede limitar desde el inicio la viabilidad de la trayectoria regenerativa [6].

Esta jerarquía conceptual es útil porque permite distinguir entre lo indispensable, lo orientador, lo acumulativamente problemático y lo potencialmente colapsante. En el contexto del modelo VxC, su aplicación fortalece la formulación estratégica y mejora la capacidad de anticipar restricciones relevantes en procesos territoriales complejos.

5.2. Conclusiones

El presente artículo tuvo como objetivo desarrollar una validación prospectiva del modelo VxC en sistemas territoriales mediante cadenas de Márkov, con el fin de analizar la viabilidad de trayectorias hacia estados estables y sostenibles. A partir del marco conceptual, operativo y aplicativo desarrollado, pueden plantearse las siguientes conclusiones.

En primer lugar, el estudio muestra que la sostenibilidad regenerativa puede ser tratada como una **trayectoria construible y evaluable**, y no únicamente como una aspiración normativa o un estado deseable abstracto. El uso de cadenas de Márkov permitió representar la dinámica de transición entre estados del sistema territorial y explorar la plausibilidad de convergencia hacia configuraciones más estables bajo determinadas condiciones de intervención. En ese sentido, la validación prospectiva confirma que la trayectoria sostenible existe, pero no se activa de manera automática.

En segundo lugar, los resultados refuerzan que el modelo VxC ofrece una base consistente para pensar la regeneración desde una perspectiva físico-química, sistémica y multicapital. Su aporte no se limita a replantear el carbono como insumo estructural dentro de procesos regenerativos, sino que permite integrar materia, energía, organización funcional y acción humana en una misma lógica de creación de valor vivo, útil y verificable [7].

En tercer lugar, el análisis desarrollado sugiere que el componente **Personas** desempeña un papel decisivo en la activación de trayectorias sostenibles. La sensibilización, el empoderamiento, la capacitación y la organización de la acción colectiva no aparecen como factores complementarios, sino como condiciones estructurales para que el sistema transite desde

configuraciones degradativas hacia estados regenerativos más estables. Este hallazgo es especialmente relevante, porque permite afirmar que la sostenibilidad no depende solo de recursos, tecnologías o marcos normativos, sino de la capacidad humana organizada para reconfigurar la dinámica del territorio.

En cuarto lugar, la articulación entre CEPA, ADFI, el método de los cinco pasos, los 9PE y el enfoque PT4P demuestra que VxC no es solo un marco conceptual, sino una arquitectura metodológica operativa. Esta articulación permite conectar propósito, diagnóstico, diseño, implementación, evaluación y aprendizaje adaptativo dentro de una sola lógica de intervención regenerativa.

En quinto lugar, la incorporación de métricas como ROP, BM y PTF reinterpretada mediante PT4P permite ampliar la base de evaluación más allá de indicadores puramente monetarios. Estas métricas ofrecen una lectura más consistente con el rendimiento físico, funcional y multicapital del sistema, y fortalecen la posibilidad de gobernar procesos regenerativos con base en evidencia cuantificable.

En conjunto, el artículo concluye que el modelo VxC constituye una propuesta pertinente para analizar y orientar procesos territoriales complejos desde una lógica de regeneración. Su principal contribución no es solo conceptual, sino estratégica: mostrar que la sostenibilidad puede modelarse como trayectoria, evaluarse prospectivamente y fortalecerse mediante intervención deliberada sobre los componentes que estructuran el sistema, especialmente sobre el factor Personas.

5.3. Recomendaciones

A partir de los hallazgos obtenidos, se recomienda avanzar hacia la aplicación progresiva del modelo VxC en contextos territoriales donde la degradación ambiental, la fragmentación social y la fragilidad operativa exijan enfoques más integrales de transformación.

En primer lugar, conviene desarrollar y ejecutar **pilotos territoriales** adicionales que permitan contrastar el comportamiento del modelo en distintos contextos ecológicos, productivos y sociales, especialmente en territorios amazónicos y otros espacios de alta relevancia socioambiental. Esto permitiría verificar la robustez del enfoque y ajustar sus herramientas según condiciones locales específicas.

En segundo lugar, se recomienda fortalecer los procesos de **formación, sensibilización y empoderamiento de actores**, dado que el análisis prospectivo sugiere que la activación del componente Personas es decisiva para la convergencia sostenible. La formación técnica y participativa no debe verse como un complemento, sino como parte central del diseño regenerativo.

En tercer lugar, resulta pertinente desarrollar **instrumentos de seguimiento, monitoreo y simulación**, apoyados en herramientas digitales, analítica de datos e inteligencia artificial, que faciliten la evaluación continua de trayectorias, la detección de restricciones y la actualización de escenarios regenerativos complejos.

En cuarto lugar, se recomienda promover marcos institucionales y normativos que reconozcan la importancia del **valor regenerativo multicapital** en la evaluación del desarrollo territorial. Esto implica avanzar hacia enfoques que no reduzcan la sostenibilidad a métricas de cumplimiento o compensación, sino que incorporen organización de materia viva, eficiencia exergética, acción colectiva y generación de provecho sostenible.

5.4. Trabajos futuros

Como agenda de investigación, este trabajo deja abiertas varias líneas que pueden fortalecer y ampliar el alcance del modelo VxC.

Una primera línea consiste en profundizar la integración entre **simulación estocástica, evaluación exergética y contabilidad multicapital**, con el fin de mejorar la precisión analítica del modelo y su aplicabilidad en sistemas territoriales más diversos.

Una segunda línea corresponde al desarrollo de **matrices de transición calibradas empíricamente** para distintos tipos de territorios y procesos, de modo que la validación prospectiva no solo mantenga consistencia conceptual, sino que incorpore progresivamente mayor sustento comparativo y observacional.

Una tercera línea de trabajo consiste en adaptar el modelo VxC a otros ámbitos de aplicación, incluidos sistemas urbanos, industriales, agroforestales, comunitarios y educativos, evaluando su capacidad de replicabilidad, escalabilidad y ajuste contextual.

Finalmente, se propone avanzar hacia la conformación de redes de validación interinstitucional y, eventualmente, hacia un **Observatorio VxC**, orientado a sistematizar experiencias, monitorear trayectorias regenerativas y consolidar una base de aprendizaje compartido en torno a la ingeniería regenerativa aplicada a sistemas territoriales.

Referencias

- [1] Goldratt, E. M. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. North River Press, 2004.
- [2] Checkland, P. *Systems Thinking, Systems Practice*. John Wiley & Sons, 1981.
- [3] Smil, V. *Energy and Civilization: A History*. MIT Press, 2017.
- [4] Capra, F., and Luisi, P. L. *The Systems View of Life*. Cambridge University Press, 2014.
- [5] Munda, G. *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Springer, 2008.
- [6] Meadows, D. H., Randers, J., and Meadows, D. L. *Limits to Growth: The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing, 2004.
- [7] Lu Chang-Say, J. *Ingeniería VxC para Regenerar Vida*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
- [8] United Nations Development Programme (UNDP). *Human Development Report 2023*. UNDP, 2023.
- [9] Forrester, J. W. *Principles of Systems*. MIT Press, 1969.
- [10] Leontief, W. *Input-Output Economics*. Oxford University Press, 1986.
- [11] Georgescu-Roegen, N. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, 1971.
- [12] OECD. *Productivity Statistics and KLEMS Data*. OECD Publishing, 2022.
- [13] Lazarus, R. "Emissions and Evaluation: Measuring the Immeasurable in Sustainability." *Environmental Systems Journal*, vol. 45, 2018.
- [14] Freire, P. *Pedagogía del oprimido*. Siglo XXI Editores, 1970.
- [15] CEPAL. *La emergencia climática en América Latina y el Caribe*. CEPAL, 2020.
- [16] IPCC. *Sixth Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [17] Hall, C. A. S., and Klitgaard, K. A. *Energy and the Wealth of Nations*. Springer, 2012.
- [18] FAO. *Photosynthesis and Biomass Productivity: A Global Perspective*. FAO, 2017.
- [19] LACCEI. *Agenda Estratégica para la Ingeniería en América Latina y el Caribe*. LACCEI, 2023.