

COVER PAGE

LxC Engineering for Regenerative Governance: A Physico-Chemical and Exergetic Framework for Transforming Carbon into Organized Living Capital

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

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

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

Abstract : *This article presents Participatory Regenerative Governance LxC (Life per Carbon) as a scientific and engineering-based strategy to transform captured carbon and solar energy into living biomass with multi-capital value. Derived from the IP.IDEAS.S framework, LxC Engineering is based on the CRPC (Carbon Regenerative Physico-Chemical Cycle), whose technical equivalence establishes: $L = C + 6.5 \text{ kWh/kg}$; Where: L is regenerated life; C is the captured carbon ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$); 6.5 kWh/kg is the solar energy required to structure 1 kg of useful biomass.*

Unlike Elkington's Triple Bottom Line approach, LxC not only integrates ESG dimensions but articulates them with physico-chemical traceability, exergetic efficiency, and verifiable regeneration. Its methodological framework combines: DPAV (Decide, Plan, Act, Value), as a strategic governance cycle; UPA (Calculate, Understand, Plan, Act), as the operational core; ETESG, a Ecological, Technological, Economic, and Scientific Governance decisions; 9SP, the canvas of Nine Strategic Pillars to design and evaluate regenerative processes. The model applies indicators such as ROP, BM, CM, and PTF, and tools including Markov chain simulations and Leontief input-output matrices. Its validation in the Peruvian Amazon (1977–2024) demonstrates the potential to redesign territorial development through structural regeneration, collaborative governance, and applied science.

Keywords: *Liife per Carbon (LxC) Regenerative Engineering, CPRC, DPAV-CUPA, 9SP Strategic Participatory Framework, Participatory Regenerative Governance*

Ingeniería VxC para la Gobernanza Regenerativa: Marco Exergético para la Organización de Vida y Valor a partir del Carbono

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 *Gobernanza Regenerativa Participativa VxC (Vida por Carbono)* como estrategia científica e ingenieril para transformar carbono capturado y energía solar en biomasa viva con valor multicapital. Derivada del marco IP.IDEAS.S, la Ingeniería VxC se fundamenta en el CRFC (Ciclo Regenerativo Físico-Químico del Carbono), cuya equivalencia técnica establece: $V = C + 6.5 \text{ kWh/kg}$; Donde: V es vida regenerada, C el carbono capturado (kg CO₂ eq; 6.5 kWh/kg la energía solar requerida para estructurar 1 kg de biomasa útil. Diferenciándose significativamente del enfoque de Triple Resultado de Elkington, Vx, al no solo integra dimensiones ASG, sino que las articula con trazabilidad físico-química, eficiencia exergética y regeneración verificable. Su marco metodológico combina: DPAV (Decidir, Planear, Actuar, Valorar), como ciclo estratégico de gobernanza; CEPA (Calcular, Entender, Planear, Actuar), como núcleo operativo; GETEC, sistema multiactor para articular decisiones ecológicas, tecnológicas, económicas y científicas; 9PE el lienzo de los Nueve Pilares Estratégicos para diseñar y evaluar procesos regenerativos. El modelo aplica indicadores como ROP, BM, CM, PTF y herramientas como simulaciones de cadenas de Márkov y matrices insumo-producto de Leontiev. Su validación en la Amazonía peruana (1977–2024) evidencia que es posible rediseñar el desarrollo territorial desde la regeneración estructural, con gobernanza colaborativa y ciencia aplicada.

Palabras clave: Ingeniería Regenerativa VxC; CRFC; DPAV - CEPA - TOC, 9PE Marco Estratégico Participativo; GETEC Gobernanza Regenerativa Participativa

I. Introducción

En un contexto global marcado por la crisis climática, la pérdida de biodiversidad y la creciente fragilidad de los sistemas socioeconómicos, los enfoques tradicionales de sostenibilidad —centrados en la mitigación de impactos, la eficiencia y el cumplimiento normativo— resultan insuficientes para revertir las dinámicas estructurales de degradación [1], [2]. Aunque en las últimas décadas se han fortalecido políticas públicas, estándares ambientales y marcos ASG, persiste una brecha entre la sostenibilidad declarada y su materialización efectiva en los territorios.

En América Latina, y de manera particular en la Amazonía, esta brecha se expresa en procesos simultáneos de deforestación, degradación ecosistémica y vulnerabilidad social, asociados a modelos económicos lineales basados en la extracción, transformación y descarte de recursos [3]. Estas dinámicas no solo deterioran la base ecológica del desarrollo, sino que también debilitan la capacidad de los sistemas territoriales para sostener procesos estables de bienestar, productividad y regeneración.

Frente a este escenario, se requiere un cambio de enfoque: pasar de una sostenibilidad orientada principalmente a reducir daños hacia una lógica de regeneración activa, capaz de rediseñar los sistemas para producir valor ecológico, social y económico de forma verificable. En este tránsito, la ingeniería adquiere un papel estratégico, al aportar criterios, métodos e instrumentos para comprender, diseñar y operar procesos que articulen materia, energía, organización social y propósito en dinámicas de creación de valor multicapital.

En ese marco, el modelo VxC (Vida por Carbono) se plantea como una propuesta ingenieril orientada a transformar carbono y energía solar en biomasa estructurada y funcional, con impacto verificable sobre los sistemas territoriales. A diferencia de los enfoques centrados únicamente en el reporte, la compensación o la reducción de emisiones, VxC propone una lógica operativa de regeneración sustentada en principios físico-químicos, termodinámicos y exergéticos.

Bajo esta perspectiva, la sostenibilidad deja de concebirse solo como una aspiración normativa y pasa a entenderse como un proceso susceptible de diseño, gestión y gobernanza. Ello supone orientar los flujos de carbono,

energía y materia con criterios de trazabilidad, eficiencia y efectividad regenerativa, incorporando además la participación de los actores como condición para sostener las transformaciones en el tiempo.

Por ello, la gobernanza regenerativa participativa ocupa un lugar central en esta propuesta. La transformación de sistemas complejos no depende únicamente de disponer de tecnologías o normas, sino de la capacidad de articular actores, alinear propósitos, coordinar decisiones y sostener procesos colectivos de aprendizaje y acción orientados al bien común.

A partir de ello, este artículo se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar y gobernar procesos, en contextos de incertidumbre, que permitan transformar dinámicas degradativas en trayectorias regenerativas, generando valor multicapital verificable en sinergia con el planeta?

Para responder a esta pregunta, el estudio desarrolla una propuesta basada en la Ingeniería VxC, integrando fundamentos físico-químicos, métricas exergéticas y herramientas de modelamiento como las cadenas de Márkov, con el fin de explorar su aplicabilidad en sistemas territoriales complejos.

1.1. Planteamiento del problema

El calentamiento global, la pérdida acelerada de biodiversidad y el deterioro de ecosistemas estratégicos evidencian una crisis sistémica que no puede explicarse solo como un problema ambiental aislado, sino como expresión de una forma dominante de producir, consumir y organizar el desarrollo [1], [2]. En este marco, numerosos territorios continúan operando bajo lógicas lineales que extraen recursos, degradan capital natural y social, y trasladan sus costos al futuro.

En la Amazonía peruana, esta problemática adquiere particular relevancia debido a la convergencia de presiones ecológicas, económicas e institucionales. La deforestación, la degradación de suelos, la pérdida de funcionalidad ecosistémica y la vulnerabilidad de las poblaciones locales reflejan la insuficiencia de modelos de intervención centrados en la explotación de recursos o en respuestas fragmentadas de mitigación [2], [3]. Esta situación revela no solo una crisis de sostenibilidad, sino también una crisis de diseño y gobernanza de los procesos territoriales.

Buena parte de los enfoques predominantes ha privilegiado métricas monetarias, reportes retrospectivos o instrumentos normativos que, si bien resultan útiles en ciertos niveles de control y seguimiento, no logran captar adecuadamente la dinámica físico-bioquímica que sostiene la vida ni la capacidad regenerativa de los sistemas [4]. En consecuencia, la sostenibilidad suele evaluarse más como cumplimiento o compensación que como transformación efectiva de procesos.

A ello se suma una desconexión entre las ciencias naturales, las ciencias sociales y las prácticas de gestión. Mientras las primeras explican los límites y condiciones biofísicas de la vida, las segundas analizan instituciones, actores y decisiones, y la gestión suele operar con criterios de corto plazo orientados a resultados parciales. Esta fragmentación dificulta construir enfoques integrados que permitan rediseñar los sistemas desde una lógica regenerativa, articulando energía, materia, organización social y creación de valor.

Desde esta perspectiva, el problema central no radica únicamente en la existencia de emisiones, residuos o impactos negativos, sino en la persistencia de procesos mal diseñados que convierten recursos y energía en deterioro, en lugar de transformarlos en vida organizada, valor útil y beneficios sostenibles. En otras palabras, la dificultad no es solo mitigar el

daño, sino reconfigurar estructuralmente los procesos para que sus salidas tiendan a ser regenerativas y no degradativas.

En respuesta a esta limitación, esta investigación propone abordar el problema mediante un enfoque de gobernanza regenerativa participativa basado en el modelo VxC, el cual integra fundamentos físico-químicos, herramientas de evaluación exergética y mecanismos de simulación prospectiva. La premisa central es que la sostenibilidad efectiva no se alcanza únicamente reduciendo impactos, sino rediseñando los procesos para transformar consumos, emisiones y drenajes en resultados regenerativos medibles, trazables y multicapitales.

De ello se deriva la siguiente hipótesis de trabajo:

La sostenibilidad efectiva no puede lograrse únicamente mediante la mitigación o compensación de impactos, sino mediante el rediseño de los procesos para transformar drenajes y consumos marginales en beneficios regenerativos verificables, en coherencia con los principios físicos, bioquímicos y sociales que sostienen la vida.

II. Marco conceptual: fundamentos de la gobernanza participativa regenerativa VxC

El presente marco conceptual constituye la base teórica del enfoque VxC y se articula con el modelo IP.IDEAS.S [8], orientado a transformar el carbono en vida estructurada, funcional y útil. Desde esta perspectiva, la gobernanza regenerativa no se limita al cumplimiento de metas climáticas o normativas, sino que redefine la sostenibilidad como una práctica activa de diseño, gestión y organización multicapital.

Este enfoque parte de la premisa de que los procesos territoriales pueden ser rediseñados para transformar carbono, energía y trabajo útil en biomasa, organización y valor regenerativo. En consecuencia, la sostenibilidad deja de entenderse únicamente como reducción de impactos y pasa a concebirse como la capacidad de generar vida, restaurar funcionalidad ecosistémica y producir beneficios verificables en distintos capitales.

Sobre esta base, el marco conceptual se organiza en siete componentes complementarios: el fundamento físico-químico regenerativo del CRFC, la arquitectura operativa de VxC, la visión sistémica exergética, los indicadores de rendimiento regenerativo, la materialidad activa del carbono, las dimensiones del valor regenerativo y la diferenciación estratégica frente a marcos tradicionales de sostenibilidad.

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

El modelo VxC se sustenta en un fundamento físico-químico regenerativo que explica cómo la vida puede organizarse a partir del carbono, el agua y la energía solar bajo condiciones biofísicas naturales. Este fundamento se expresa en el **CRFC (Ciclo Regenerativo Físico-Químico del Carbono)**, que concibe al carbono no como residuo pasivo, sino como insumo estructural para la generación de biomasa viva y funcional.

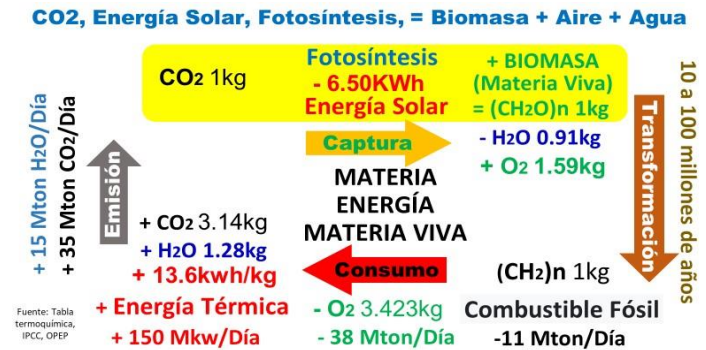
Tal como se muestra en la **Figura 1**, el CRFC representa un ciclo abierto en el que el CO₂ atmosférico, mediante la incorporación de energía solar, se transforma en biomasa estructurada, reduciendo entropía local y generando organización biológica. La figura cumple aquí una función central, porque permite visualizar que la regeneración no es solo una metáfora conceptual, sino un proceso físico y bioenergético susceptible de ser comprendido y modelado.

Este planteamiento se apoya en tres bases científico-técnicas principales. En primer lugar, la **termodinámica**, que permite comprender que todo proceso regenerativo requiere flujos de energía capaces de reducir entropía local y generar organización [4]. En segundo lugar, la **bioenergética**, que explica la conversión de energía en estructura viva mediante procesos metabólicos y funcionales. En tercer lugar, la **fotosíntesis**, mecanismo por el cual el CO₂ atmosférico es incorporado a la biomasa vegetal a partir de energía solar [6].

Este principio puede expresarse mediante la ecuación regenerativa:

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

donde **V** representa vida regenerada, entendida como biomasa estructurada, operativa y funcional; **C** corresponde al carbono capturado o fijado, expresado en kg de CO₂ equivalente; y **6.5 kWh/kg** representa la energía solar promedio requerida para estructurar 1 kg de biomasa viva [7].



Esta ecuación sintetiza la transformación de carbono y energía en vida organizada. Desde esta perspectiva, la regeneración no consiste únicamente en compensar emisiones, sino en reorganizar materia y energía para producir estructura viva y valor útil. Mientras la sostenibilidad convencional suele centrarse en la eficiencia insumo-producto, VxC introduce el criterio de **efectividad regenerativa**, es decir, la capacidad de transformar consumos y drenajes en vida, organización y valor multicapital [3], [4].

2.2. VxC: Arquitectura regenerativa para transformar carbono en vida

A partir de ese fundamento, VxC se configura como una arquitectura regenerativa orientada a diseñar, implementar y verificar procesos con impacto positivo. Su diferencia principal frente a marcos como GRI, ASG o ISO 14000 radica en que no se limita al reporte, control o comunicación de impactos pasados, sino que propone una lógica activa de transformación [5], [9], [10].

En este sentido, VxC integra ciencia, tecnología y participación para reconfigurar procesos de modo que el carbono, la energía y el trabajo útil se conviertan en biomasa, servicios ecosistémicos, bienestar social y provecho sostenible. Así, la sostenibilidad deja de abordarse solo como cumplimiento o restricción y pasa a concebirse como una capacidad de diseño orientada a regenerar sistemas vivos.

Esta arquitectura no actúa de forma aislada. Se articula con herramientas metodológicas como CEPA, GETEC y el Lienzo de los 9 Pilares Estratégicos, que permiten traducir los fundamentos físicos en decisiones, procesos, proyectos y resultados verificables [8]. En consecuencia, VxC funciona como un puente entre la base biofísica de la regeneración y su operacionalización en procesos de gobernanza.

2.3. Gobernanza exergética basada en la dinámica de sistemas

Para transitar de modelos extractivos a modelos regenerativos, no basta con incorporar nuevos indicadores o tecnologías; es necesario comprender cómo interactúan los procesos humanos, naturales y económicos dentro de sistemas complejos. La gobernanza regenerativa exige, por tanto, una lectura sistémica de los flujos de energía, materia, información y valor que estructuran el comportamiento del sistema [4], [21].

Como se observa en la **Figura 2**, la dinámica del sistema puede interpretarse a partir de la interacción entre energía, materia biótica, materia abiótica y procesos de transformación. La figura ayuda a entender que la economía circular no debe reducirse a reciclaje o manejo de residuos, sino que responde a una lógica termodinámica en la que los flujos materiales y energéticos condicionan la estabilidad o el deterioro del sistema.

Este enfoque permite alinear la gobernanza con principios termodinámicos, exergéticos y biofísicos, posicionando a la ingeniería como disciplina clave para transformar decisiones en regeneración efectiva y sostenida. La figura, por tanto, no solo complementa el texto, sino que

refuerza la idea de que la regeneración debe pensarse como una reorganización sistémica y no únicamente como una intervención puntual.



Figura 2. Economía Circular: termodinámica del balance de energía, materia biótica y abiótica del planeta.
Fuente: Elaboración propia basada en Forrester (1971) y VxCIP.IDEAS.S [8].

2.4. Indicadores de eficiencia regenerativa multicapital

Para evaluar y optimizar el desempeño de los procesos regenerativos, VxC incorpora indicadores derivados del análisis del rendimiento operativo. Estos indicadores permiten cuantificar no solo la eficiencia, sino también la capacidad real del sistema para generar valor útil y regenerativo en distintos capitales [24], [26].

Tal como se presenta en la Figura 3, los indicadores principales son el ROP (Rendimiento Operativo del Proceso), el BM (Beneficio Marginal), el CM (Consumo Marginal) y el valor regenerativo asociado al proceso. La figura resulta importante porque muestra que estos indicadores no actúan de forma aislada, sino como un sistema articulado de medición del desempeño.

En términos operativos, el CM expresa el consumo incremental necesario para producir una unidad adicional de resultado; el BM representa el valor incremental generado; y el ROP sintetiza la relación entre ambos, permitiendo distinguir si el proceso tiende a crear o a degradar valor. Bajo esta lógica, la regeneración no depende simplemente de producir más, sino de lograr una mejor relación entre recursos movilizados y valor generado.

De este modo, la medición deja de centrarse exclusivamente en costos o emisiones y pasa a considerar la calidad regenerativa del proceso y su contribución al sistema en el tiempo. La figura refuerza esta interpretación al mostrar visualmente la relación entre consumo, beneficio y rendimiento como base para la toma de decisiones.

¿Precio ≠ Valor = Consumo = Cantidad = Beneficios?

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

Figura 3. Indicadores clave de rendimiento operativo del proceso regenerativo (ROP, BM, CM, RV)
Fuente: Elaboración propia basada en IP.IDEAS.S [8]

2.5. Materialidad del carbono y principio exergético

Uno de los aportes conceptuales más relevantes de VxC es redefinir la materialidad del carbono. En lugar de tratarlo únicamente como pasivo climático o como variable de reporte, este enfoque lo reconoce como insumo estructural dentro de procesos vivos. Bajo esta lógica, el carbono capturado, combinado con energía solar y trabajo útil, puede convertirse en biomasa, organización y valor multicapital [6], [8].

Esta visión se expresa de manera sintética en la siguiente relación regenerativa:

1 kg de CO₂ + 6.5 kWh de energía solar → 1 kg de biomasa viva

Como se sintetiza en la Figura 4, esta transformación no debe entenderse como un simple balance físico, sino como una relación entre vida, valor y provecho regenerativo. La figura aporta aquí una visión integradora, porque conecta la materialidad del carbono con las dimensiones estratégicas del valor y con los pilares de sostenibilidad.

El principio exergético permite comprender que esta transformación no depende solo de la cantidad de energía disponible, sino de su capacidad para realizar trabajo útil y organizar materia. Por ello, la regeneración implica algo más que capturar carbono: supone activar procesos capaces de convertir esa captura en vida funcional, estabilidad ecosistémica y beneficios sostenibles.

Cocrear Vida = Carbono+6.5kwh/kg

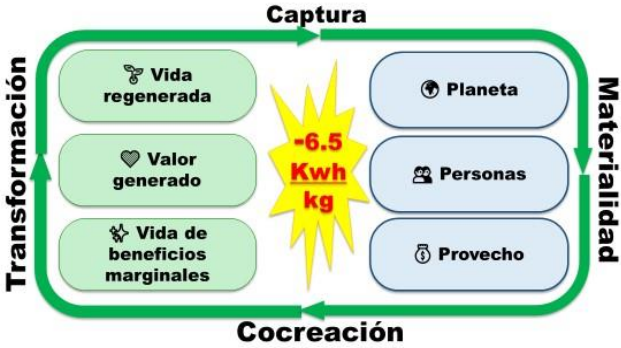


Figura 4. VxC: Relación entre las 3V del Valor Regenerativo y la Materialidad Estratégica 3P.
Fuente: Elaboración propia, adaptado de IP.IDEAS.S [8]

2.6. Las 3V del valor regenerativo y su articulación con los pilares de sostenibilidad

Como se resume en la Tabla 1, el valor regenerativo puede organizarse en tres dimensiones complementarias, denominadas aquí 3V, las cuales se articulan con los pilares de sostenibilidad:

Tabla 1. Articulación entre las 3V del valor regenerativo y los pilares de sostenibilidad
Fuente: Elaboración propia

Dimensión VxC (3V)	Pilar E (3P)	Descripción
Vida regenerada (V1)	Planeta	Biomasa viva creada que restaura ecosistemas, incrementa capital natural y reduce entropía [6], [4].
Valor generado (V2)	Personas	Bienestar, productividad inclusiva, servicios y capacidades locales fortalecidas [11].
Vida prospera (V3)	Provecho	Impactos colaterales positivos como empleos verdes, cohesión social e innovación ecosistémica [12, 4].

La relación entre estas tres dimensiones y los pilares de sostenibilidad se representa de manera integrada en la Figura 4, donde se evidencia que no se trata de categorías separadas, sino de expresiones interdependientes de un mismo proceso regenerativo. La vida regenerada sostiene el valor generado; el valor generado fortalece la organización social; y el provecho regenerativo crea condiciones para la continuidad y escalamiento del sistema.

Estas dimensiones se implementan mediante el ciclo CEPA y herramientas como GETEC y el Lienzo de los 9 Pilares Estratégicos [8], lo que permite traducir el marco conceptual en decisiones y procesos orientados a resultados multicapitales verificables.

2.7. Materialidad regenerativa: del reporte al diseño activo

En coherencia con lo anterior, la materialidad regenerativa no se define a partir de matrices estáticas ni de listas de asuntos relevantes elaboradas solo para fines de reporte. En VxC, la materialidad se construye en la medida en que un elemento participa efectivamente en procesos de transformación regenerativa.

Cada unidad de carbono capturado, al combinarse con energía solar, materia y trabajo útil, puede convertirse en una unidad de valor vivo verificable. Esto implica que marcos como ASG y GRI, aunque útiles para comunicar y ordenar información, adquieren mayor potencia cuando se integran a sistemas de diseño y medición regenerativa, en lugar de operar solo como instrumentos retrospectivos [9], [13].

Así, el criterio de materialidad se desplaza desde la pregunta “qué debe reportarse” hacia una pregunta más exigente: “qué elementos participan efectivamente en la generación de vida, valor y regeneración verificable”. Este cambio convierte la materialidad en un criterio de diseño, más que en un instrumento de reporte.

2.8. Diferencias estratégicas frente a marcos tradicionales

El enfoque VxC se diferencia de los marcos tradicionales de sostenibilidad en varios sentidos. Mientras muchos de ellos se concentran en informar impactos, reducir daños o demostrar cumplimiento, VxC orienta la acción hacia la regeneración activa de sistemas.

Su lógica estratégica puede sintetizarse en tres ideas centrales:

- No solo compensa, sino convierte.
- No solo reduce, sino regenera.
- No solo informa, sino transforma.

Esto significa que el centro del análisis deja de ser exclusivamente la minimización del impacto negativo y pasa a ser la capacidad del sistema para producir resultados positivos, acumulativos y verificables. La comparación con marcos tradicionales no busca desconocer su utilidad, sino mostrar que VxC se ubica en un nivel distinto: el del diseño ingenieril de trayectorias regenerativas

2.9. Cierre estratégico del marco regenerativo

En conjunto, las Figuras 1 a 4 y Tabla 1 permiten comprender que VxC no es un modelo conceptual aislado, sino una arquitectura integrada que articula fundamentos físico-químicos, dinámica sistémica, medición operativa y generación de valor regenerativo. Cada figura cumple una función específica dentro del argumento: la Figura 1 explica la base biofísica del modelo; la Figura 2 muestra la lógica sistémica de la regeneración; la Figura 3 operacionaliza su medición; y la Figura 4 integra vida, valor y provecho dentro de una misma lógica estratégica.

En síntesis, VxC propone un marco conceptual que integra fundamentos físico-químicos, criterios exergéticos y visión sistémica para replantear la sostenibilidad como un proceso de regeneración activa. Bajo esta perspectiva, residuos, emisiones y drenajes dejan de ser considerados únicamente como externalidades negativas y pasan a entenderse como potenciales entradas para procesos de reorganización y creación de valor.

Con ello, la sostenibilidad deja de ser una promesa futura o una obligación declarativa, y se convierte en una práctica ingenieril presente, trazable y verificable, guiada por propósito multicapital. Este marco conceptual prepara así el tránsito hacia el marco operativo, donde los principios aquí desarrollados se traducen en herramientas, ciclos y procesos concretos de gobernanza regenerativa participativa.

III. Marco operativo: gobernanza participativa regenerativa VxC.

El marco operativo de la gobernanza VxC articula un conjunto de herramientas y procesos metodológicos diseñados para transformar los principios regenerativos del modelo en acciones verificables, trazables y sostenibles. Su finalidad es traducir el fundamento conceptual expuesto en el capítulo anterior en una arquitectura de actuación capaz de orientar decisiones, coordinar actores, movilizar recursos y evaluar resultados en contextos de complejidad e incertidumbre.

Esta arquitectura se organiza en seis componentes complementarios: el ciclo estratégico DPAV, el núcleo operativo CEPA, la lógica de priorización derivada de la Teoría de Restricciones, el Lienzo de los 9 Pilares Estratégicos, el sistema GETEC y la inversión estratégica regenerativa. En conjunto, estos elementos permiten pasar del propósito regenerativo a la actuación concreta, articulando análisis, diseño, participación, ejecución y aprendizaje continuo.

3.1. DPAV: ciclo de gobernanza estratégica que activa la operación regenerativa

Para que la regeneración no permanezca en el plano conceptual, se requiere una arquitectura metodológica que permita diseñar, gobernar y evaluar procesos regenerativos con trazabilidad, multiescalaridad y corresponsabilidad. En este marco, el modelo VxC introduce el ciclo **DPAV (Decidir, Planear, Actuar, Valorar)** como estructura general de gobernanza estratégica.

DPAV se diferencia de modelos clásicos como PODC (Planear, Organizar, Dirigir, Controlar) y PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar) porque no se orienta únicamente al control de operaciones relativamente estables, sino a la conducción de procesos en contextos de riesgo, incertidumbre y cambio [14], [15]. Su aporte principal consiste en reconocer que gobernar implica algo más que administrar recursos o ejecutar actividades: supone orientar el sistema con propósito, interpretar escenarios, coordinar capacidades y evaluar resultados para realimentar la toma de decisiones.

Cada fase del ciclo cumple una función específica:

- **Decidir:** definir el propósito compartido, los criterios estratégicos y las prioridades de intervención.
- **Planear:** estructurar rutas de acción, metas, recursos y mecanismos de coordinación.
- **Actuar:** implementar decisiones con enfoque adaptativo, participativo y orientado a resultados.
- **Valorar:** evaluar resultados, aprendizajes y efectos del contexto para ajustar las decisiones futuras.

En este sentido, DPAV opera como el nivel de conducción estratégica del modelo. Su función no es reemplazar a otros instrumentos, sino articularlos. Por ello, la acción concreta del ciclo se instrumenta operativamente mediante CEPA, mientras que el diseño sistémico se apoya en 9PE y la coordinación multiactor en GETEC.

3.2. CEPA en sus tres dimensiones funcionales

Si DPAV constituye la arquitectura de gobernanza estratégica, el ciclo **CEPA (Calcular, Entender, Planear, Actuar)** representa el núcleo operativo que permite traducir esa gobernanza en procesos concretos. CEPA organiza la transición desde el análisis hasta la acción, integrando información, comprensión, diseño e implementación en una secuencia adaptativa.

Como se muestra en la **Figura 5**, CEPA puede desplegarse en tres dimensiones funcionales complementarias, vinculadas con distintos niveles de conducción del sistema: gobernar, gestionar y administrar. La figura ayuda a comprender que no todas las acciones pertenecen al mismo nivel operativo y que la regeneración requiere distinguir entre orientación estratégica, articulación de procesos y ejecución de tareas

Estas tres dimensiones pueden describirse del siguiente modo:

- **CEPA técnico-estratégico:** vinculado principalmente con decidir y planear, integra datos, análisis, modelamiento y evaluación de escenarios para sustentar decisiones regenerativas.
- **CEPA creativo-innovador:** vinculado con planear y actuar, impulsa la generación de soluciones, la adaptación y la mejora continua a través de procesos de concebir, ejecutar, perfeccionar y adaptar.
- **CEPA participativo-educativo:** vinculado con actuar y valorar, transforma conocimiento en acción colectiva mediante procesos de comunicar, educar, participar y actuar [8].

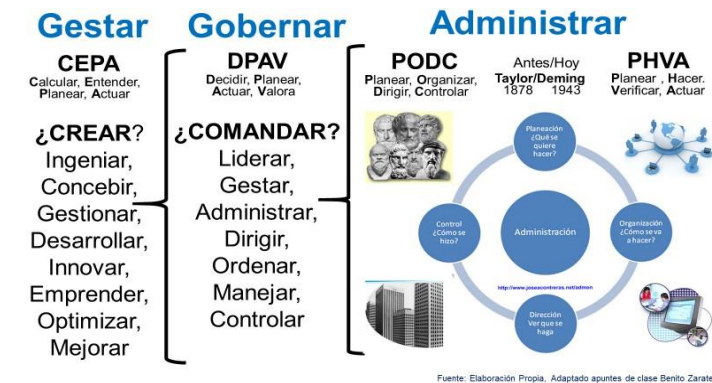


Figura 5. Ciclos operativos de gobernar, gestionar y administrar regenerativamente
Fuente: Adaptado de [14], [15]

La Figura 5 refuerza así una idea central del enfoque VxC: la operación regenerativa no es únicamente técnica, sino también creativa y participativa. Por eso, CEPA no debe verse como un procedimiento lineal, sino como un sistema operativo multidimensional que articula análisis, innovación y apropiación social del proceso..

3.3. TOC: Teoría de Restricciones aplicada a la regeneración

La regeneración no depende solamente de tener un buen propósito o una arquitectura metodológica; también requiere identificar y gestionar las restricciones que limitan el desempeño del sistema. En este punto, la **Teoría de Restricciones (TOC)**, adaptada de Goldratt [26], aporta una lógica útil para priorizar decisiones y enfocar esfuerzos de mejora.

Aplicada al marco VxC, esta lógica puede resumirse en cinco pasos:

1. definir la meta regenerativa del sistema;
2. identificar la restricción principal que limita su avance;
3. rediseñar o intervenir para superar esa restricción;
4. subordinar las demás decisiones a la meta y a la restricción prioritaria;
5. reiniciar el ciclo de mejora continua una vez superada la limitación dominante.

El valor de esta herramienta reside en que evita dispersar recursos y atención en múltiples frentes sin jerarquía clara. Bajo el enfoque regenerativo, la meta no es simplemente aumentar producción o reducir costos, sino regenerar vida y valor multicapital. Por ello, las restricciones deben identificarse no solo en términos técnicos o financieros, sino también en términos sociales, organizativos, energéticos y territoriales.

TOC complementa así a DPAV y CEPA: mientras DPAV orienta la gobernanza y CEPA organiza la operación, TOC ayuda a focalizar la intervención sobre los factores que realmente condicionan la trayectoria del sistema.

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

Una vez definido el propósito y reconocidas las restricciones principales, el sistema necesita una estructura que permita ordenar estratégicamente sus componentes. Esa función la cumple el **Lienzo de los 9 Pilares Estratégicos (9PE)**, que organiza el pensamiento regenerativo en una secuencia coherente de diseño, planificación y evaluación.

Como se observa en la **Figura 6**, el 9PE se estructura en tres bloques funcionales:

El 9PE estructura el pensamiento regenerativo en tres bloques funcionales:

3PPE: Propósito – Problemática – Potencialidades

3PPP: Personas – Propuesta – Procesos

3PPO: Proyecto – Presupuesto – Provecho

Esos tres bloques clave conformando ‘por nueve componentes no son una lista aislada de variables, sino una arquitectura relacional que conecta diagnóstico, articulación social y operación. En otras palabras, el 9PE permite pasar del reconocimiento del problema al diseño de una propuesta, y de allí a su concreción como proyecto con recursos y resultados.



Figura 6. Lienzo de los pilares claves 9PE
Fuente: MENS, Marco de Modelos Estratégicos de Negocios Sostenibles [10]

Esta herramienta cumple, por tanto, una doble función. Por un lado, ordena el diseño estratégico de las unidades VxC; por otro, facilita la trazabilidad entre propósito, actores, procesos, inversión y provecho. En consecuencia, el 9PE actúa como interfaz entre el nivel conceptual del modelo y su aplicación práctica en territorios, organizaciones o proyectos específicos..

3.5. GETEC: sistema de gobernanza regenerativa multiactor

El funcionamiento del modelo VxC requiere una estructura que no solo ordene componentes, sino que también articule actores, saberes y decisiones en torno a un propósito regenerativo. Esa función la cumple GETEC (Gobernanza Ecológica, Tecnológica, Económica y Científica), entendido como un sistema multiactor de coordinación para la regeneración.

Tal como se presenta en la Figura 7, GETEC organiza la gobernanza a partir de tres grandes ejes: propósito, participación y operación. El propósito se nutre de personas, problemáticas y potencialidades; la participación articula actores, propuestas y procesos; y la operación concreta proyectos, presupuestos y provechos. La figura es importante porque visualiza la relación dinámica entre estos niveles y muestra que la regeneración no puede sostenerse sin articulación entre ciencia, tecnología, organización social y viabilidad económica.

Desde esta perspectiva, GETEC no es un órgano aislado ni un simple esquema institucional, sino una arquitectura relacional que integra conocimiento experto, saber local, innovación y coordinación estratégica. Su valor radica en que permite estructurar plataformas territoriales de acción regenerativa verificable, donde cada actor aporta al objetivo común desde sus capacidades y responsabilidades.

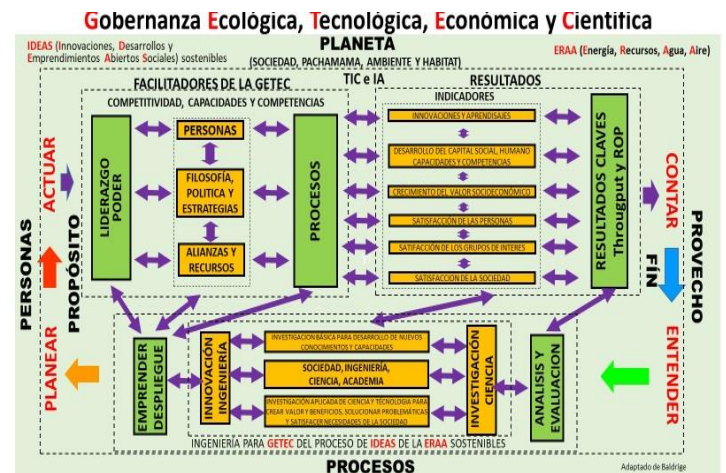


Figura 7. Sistema GETEC de la ERAA Sostenible
Fuente: Elaboración propia basada en VxC e IP, IDEAS [8]

En términos operativos, GETEC fortalece la transición desde procesos extractivos o fragmentados hacia sistemas regenerativos más organizados, participativos y multicapitales. Así, la gobernanza deja de reducirse a jerarquía o control y pasa a entenderse como capacidad de articulación para sostener procesos de transformación compartida.

3.6. Inversión estratégica regenerativa y provecho multicapital

Toda acción regenerativa exige inversión. Sin embargo, dentro del enfoque VxC, la inversión no debe interpretarse únicamente como gasto financiero, sino como activación deliberada de recursos, capacidades, energía y tiempo orientados a generar valor multicapital a lo largo del ciclo de vida del sistema [19].

Como se ilustra en la **Figura 8**, la inversión regenerativa acompaña todo el proceso, desde la definición del propósito y el diseño funcional hasta la ejecución técnica y la consolidación del provecho. La figura permite entender que la inversión no es un momento aislado del proyecto, sino una trayectoria en la que se acumulan decisiones, aprendizajes, riesgos y oportunidades.

Para orientar mejor esta lógica, conviene distinguir entre distintas categorías de inversión y condición sistémica:

- **Clave:** imprescindible para que el sistema exista y pueda operar.
- **Estratégico:** decisivo para orientar el sistema, aunque no necesariamente para su mera existencia.
- **Crítico:** aspecto cuya postergación compromete el rendimiento o la estabilidad.
- **Riesgo:** posibilidad de impacto negativo si no se gestiona adecuadamente.
- **Catástrofe:** consecuencia de omitir elementos clave del sistema.
- **Incertidumbre estructural:** fragilidad originada en deficiencias del diseño del sistema.

Esta clasificación permite priorizar inversiones con mayor sentido estratégico y evitar que la regeneración quede subordinada a lógicas de corto plazo. La Figura 8 refuerza precisamente esa idea: muestra que sin inversión orientada por propósito, aprendizaje y trazabilidad, no es posible sostener procesos regenerativos verificables.

En ese sentido, el provecho no debe concebirse como resultado meramente económico, sino como expresión acumulada del valor generado en distintas dimensiones: biomasa, cohesión social, servicios ecosistémicos, productividad, resiliencia e innovación. Así, la inversión regenerativa no solo busca retorno financiero, sino continuidad y fortalecimiento del sistema en el tiempo.



Figura 8. La inversión para innovar y desarrollar: ¿riesgo que vale o cuesta?

Fuente: Elaboración propia basada en CEPA eIP.IDEAS.S [8], [20]

3.7. Cierre operativo: de la gobernanza al proceso regenerativo verificable

En conjunto, el marco operativo muestra que la gobernanza regenerativa participativa VxC no descansa en un solo instrumento, sino en la articulación de varios niveles metodológicos. DPAV orienta la conducción estratégica; CEPA organiza la operación adaptativa; TOC focaliza las

restricciones prioritarias; el 9PE estructura el diseño del sistema; GETEC articula a los actores; y la inversión estratégica habilita la continuidad del proceso.

Las Figuras 5 a 8 permiten visualizar esta arquitectura de manera progresiva. La Figura 5 muestra la diferenciación entre gobernar, gestionar y administrar; la Figura 6 ordena el diseño estratégico; la Figura 7 representa la articulación multiactor; y la Figura 8 explica la lógica temporal y estratégica de la inversión regenerativa. En conjunto, estas figuras no cumplen una función meramente ilustrativa, sino que sostienen el argumento de que la regeneración requiere una arquitectura operativa coherente, relacional y verificable.

Desde esta perspectiva, gobernar no significa imponer decisiones desde una jerarquía cerrada, sino orientar procesos de cocreación con propósito, evidencia, participación y aprendizaje. El resultado esperado no es únicamente la ejecución de actividades, sino la transformación progresiva de procesos y territorios en sistemas más organizados, resilientes y regenerativos.

Este marco operativo prepara así el tránsito hacia el marco aplicativo, donde las herramientas aquí descritas se ponen en relación con simulación, prospectiva y evaluación exergética para analizar trayectorias de convergencia regenerativa

IV. Marco aplicativo a la gobernanza participativa regenerativa VxC

Para que los principios regenerativos se traduzcan en acciones concretas y verificables, se requiere una estructura metodológica que permita su aplicación en contextos territoriales y multiactor. El presente marco aplicativo cumple esa función al integrar herramientas de simulación, medición y evaluación capaces de operacionalizar la regeneración desde criterios científicos, ingenieriles y participativos.

A diferencia del marco conceptual, que define los fundamentos del modelo, y del marco operativo, que organiza sus ciclos e instrumentos de actuación, este capítulo se orienta a la aplicación analítica de la gobernanza regenerativa. Su propósito es mostrar cómo la Ingeniería VxC puede emplearse para interpretar el comportamiento de sistemas complejos, proyectar escenarios de transición, evaluar trayectorias de convergencia y estimar resultados físicos, energéticos y económicos en el tiempo.

Con este fin, el capítulo se organiza en cuatro componentes: el fundamento exergético y sistémico del análisis, la modelación de transiciones bajo incertidumbre, la evaluación prospectiva mediante PT4P y cadenas de Márkov, y la integración de métricas físicas, exergéticas y financieras para valorar la viabilidad regenerativa del sistema.

4.1. Fundamento Exergético y Dinámica Circular de los Sistemas

Para establecer una gobernanza regenerativa funcional, es imprescindible operar bajo los principios de la termodinámica y reconocer que la economía circular no constituye solo una aspiración normativa, sino una realidad física condicionada por flujos de energía, materia y trabajo útil. En este sentido, los procesos naturales, sociales y económicos deben diseñarse para transformar energía en organización funcional, reducir entropía y aprovechar de manera más efectiva la exergía disponible [4], [24].

Como se observa en la **Figura 9**, la gobernanza regenerativa puede analizarse mediante una estructura que vincula principios exergéticos con la interacción entre factores del sistema. La figura muestra que la dinámica del desarrollo no depende únicamente de variables económicas aisladas, sino de la relación entre dimensiones que influyen simultáneamente en la capacidad del sistema para regenerar o deteriorar valor.

En esta perspectiva, la interacción entre **Planeta, Personas, Procesos y Provecho (PT4P)** configura los escenarios y resultados de los sistemas vivos. Cuando una de estas dimensiones se deteriora o pierde articulación con las demás, el sistema tiende a generar drenajes, ineficiencias y pérdida de valor útil. Por el contrario, cuando estas dimensiones se coordinan de forma más equilibrada, el sistema puede orientar sus flujos hacia trayectorias de regeneración.

La Figura 9 cumple aquí una función clave, ya que permite visualizar que la evaluación exergética no se limita a medir energía disponible, sino que busca comprender cómo esa energía, junto con materia, organización y decisiones, puede traducirse en trabajo útil, estabilidad sistémica y valor multicapital. De este modo, la exergía se convierte en una base analítica para la gobernanza regenerativa del desarrollo



Figura 9. Evaluación Exergética de la Gobernanza Regenerativa basada en los Principios de Leóntiev, Márkov y KLEM. Fuente: Elaboración propia [25]

4.2. Transiciones hacia la certidumbre regenerativa

Los sistemas sociales y ecológicos operan bajo condiciones de incertidumbre dinámica. Por ello, no resulta suficiente aplicar esquemas deterministas o lineales para comprender su evolución. En contextos de alta complejidad, es necesario incorporar herramientas que permitan representar trayectorias probables, estados intermedios y escenarios de convergencia o deterioro en función de las decisiones adoptadas [3], [22], [28].

Bajo este enfoque, las **cadena de Márkov** ofrecen una herramienta pertinente para modelar probabilísticamente las transiciones del sistema entre distintos estados posibles. Su utilidad no reside en predecir con certeza el futuro, sino en representar cómo un sistema puede evolucionar, dependiendo tanto de su estado previo como de la estructura de decisiones e intervenciones que inciden sobre él.

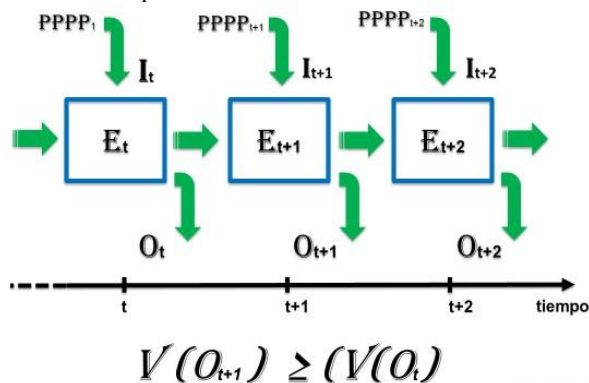


Figura 10. Transiciones de un proceso con estados de incertidumbre a certidumbre estable y sostenible

Fuente: Adaptado de Cepal Gallopín 2001

Tal como ilustra la **Figura 10**, un sistema sometido a incertidumbre puede transitar hacia estados más organizados y sostenibles cuando las decisiones, inversiones y mecanismos de aprendizaje se orientan de forma coherente. La figura permite entender que la gobernanza regenerativa no busca eliminar la incertidumbre, sino conducirla hacia trayectorias en las que el valor futuro del sistema sea igual o superior al valor presente.

Este punto es crucial porque desplaza la lógica de análisis desde una visión estática del sistema hacia una visión dinámica y prospectiva. Así, la gobernanza deja de consistir únicamente en administrar condiciones dadas y pasa a entenderse como la capacidad de influir sobre las probabilidades de transición, fortaleciendo la convergencia hacia estados regenerativos más estables.

4.3. Evaluación Prospectiva con PTF y Márkov: Escenarios de convergencia regenerativa

Para gobernar estratégicamente en contextos inciertos, no basta con describir el estado actual del sistema; es necesario anticipar su comportamiento futuro. En este sentido, el modelo VxC propone integrar tres herramientas analíticas complementarias: las cadenas de Márkov, la Productividad Total de los Factores (PTF) reinterpretada en clave regenerativa, y la evaluación mediante los componentes **PT4P**: Planeta, Personas, Procesos y Provecho.

Esta integración permite analizar no solo el estado del sistema, sino también la **calidad de sus trayectorias**. El uso de Márkov permite simular cambios de estado; la PTF adaptada permite observar si el sistema está orientado a regenerar o a consumir valor; y el esquema PT4P facilita distinguir en qué dimensiones se concentran las fortalezas o debilidades del proceso [24], [25], [28].

Cabe precisar que cada componente del PT4P representa una dimensión compleja con comportamientos propios, tendencias marginales y capacidades de respuesta diferenciadas. Sin embargo, la convergencia regenerativa no depende de la mejora aislada de uno de ellos, sino de la articulación de los cuatro dentro de una trayectoria sistémica coherente. En otras palabras, el sistema puede mejorar parcialmente en una dimensión y aun así mantenerse inestable o degradativo si no logra coordinar sus demás componentes.

Sobre esta base, se distinguen tres escenarios prospectivos:

4.3.1. Escenario inicial: tendencia degradativa

La Figura 11 representa la situación base del sistema, caracterizada por altas tendencias marginales a consumir capital natural y por una débil capacidad de regeneración. En este escenario, los componentes del PT4P muestran un patrón de funcionamiento en el que el crecimiento de algunas actividades económicas o procesos no compensa el deterioro del planeta ni la fragilidad de la organización social.

La figura permite interpretar este escenario como una configuración cercana a un estado estable degradativo. Es decir, no se trata solo de una situación problemática transitoria, sino de una trayectoria que tiende a reproducirse si no se introducen intervenciones regenerativas deliberadas. Bajo esta lógica, el sistema mantiene crecimiento en ciertos componentes, pero lo hace a costa del deterioro ecosistémico y del consumo progresivo de la base que sostiene su continuidad.

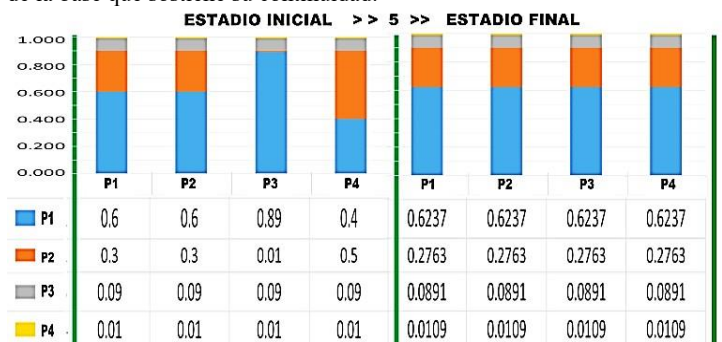


Figura 11. Escenario inicial – Prospectiva PTF.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Escenario alternativo: intervención parcial

La **Figura 12** representa un escenario en el que se introducen intervenciones parciales o descoordinadas. En este caso, se observan mejoras relativas en algunos componentes —particularmente en procesos y provechos—, pero sin una articulación suficiente con las personas y con el planeta. Como resultado, la capacidad de transformación del sistema sigue siendo limitada.

Este escenario es especialmente importante porque muestra que no toda mejora parcial conduce a una transición regenerativa estable. De hecho, cuando las personas no reducen suficientemente su tendencia marginal a consumir el planeta, o cuando los cambios se concentran solo en medidas técnicas o normativas, la trayectoria inducida puede volverse inestable y regresar a patrones de deterioro.

El análisis basado en Márkov sugiere precisamente que esta intervención parcial no genera una convergencia robusta. Aunque contiene temporalmente algunos daños, no logra modificar de fondo la lógica del sistema. La Figura 12 ayuda a visualizar esa situación intermedia: hay movimiento, pero no una reconfiguración estructural suficiente para sostener un cambio regenerativo en el tiempo

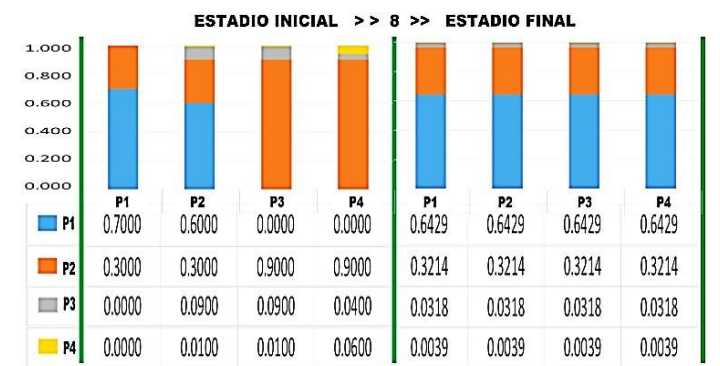


Figura 12. Escenario alternativo – Intervención parcial
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Escenario deseable: convergencia hacia el equilibrio regenerativo

La Figura 13 representa el escenario deseable, en el que la mejora simultánea de los cuatro factores del PT4P refleja una transición estructural hacia un sistema regenerativo. A diferencia del escenario alternativo, aquí no solo mejoran los procesos o los provechos, sino también la articulación social y la relación del sistema con la base planetaria que lo sostiene.

La figura permite mostrar que la convergencia regenerativa depende de inducir tendencias positivas en las personas y de reducir activamente las tendencias a consumir el planeta tanto en los procesos como en los provechos. Bajo esta condición, el sistema no solo alcanza mayor estabilidad, sino que además requiere menos iteraciones para aproximarse a un estado sostenible.

Este escenario confirma una idea central del modelo: la transición regenerativa no puede sostenerse exclusivamente mediante normas o tecnologías. Requiere una gobernanza participativa capaz de alinear decisiones, aprendizajes y compromisos colectivos en torno al bien común. Sin esa dimensión social y cultural, el cambio puede iniciarse, pero difícilmente consolidarse.

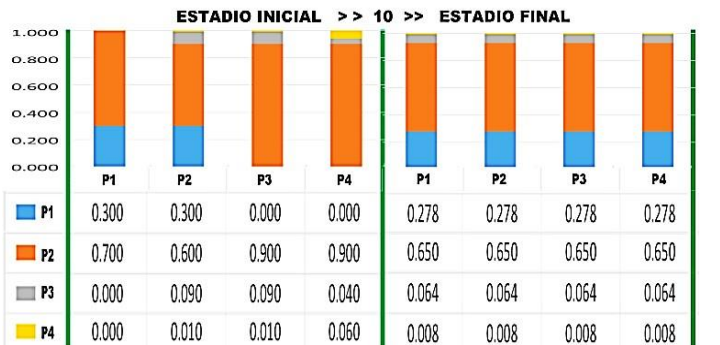


Figura 13. Escenario deseable – Convergencia hacia el equilibrio.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Métricas para la gobernanza regenerativa y evaluación exergética integrada

La aplicación del modelo VxC requiere complementar la prospectiva con un conjunto de métricas que permitan evaluar el rendimiento del sistema en términos físicos, energéticos y regenerativos. Esta necesidad responde a una limitación frecuente de los enfoques convencionales, que suelen medir el desempeño principalmente con indicadores monetarios, sin captar adecuadamente la calidad biofísica de las transformaciones en curso.

En el marco VxC, tres indicadores resultan particularmente relevantes:

- ROP (Rendimiento Operativo del Proceso):** evalúa cuánta salida de valor útil genera el sistema por unidad de recurso o inversión movilizada.
- BM (Beneficio Marginal):** representa el valor adicional generado por cada unidad incremental de intervención.
- PTF (Productividad Total de los Factores):** reinterpretada mediante PT4P, permite observar si la estructura del sistema está orientada a regenerar vida o a consumirla.

Estos indicadores constituyen la base de una **evaluación exergética integrada**, ya que permiten estimar con mayor precisión la eficiencia con la que el sistema transforma materia, energía y recursos en valor útil y regenerativo. La exergía, en este contexto, no se entiende solo como energía disponible, sino como capacidad real del sistema para realizar trabajo útil y sostener organización.

A partir de ello, la evaluación puede proyectarse en el tiempo mediante un **flujo de valor exergético acumulado**, el cual articula rendimiento operativo, regeneración multicapital y viabilidad económica. En este punto, la integración con herramientas financieras como la **Tasa Interna de Retorno (TIR)** resulta especialmente útil, ya que permite traducir parte del valor regenerativo a métricas comprensibles para tomadores de decisión sin perder de vista su base física y sistémica.

La relación entre métricas físicas y métricas financieras se resume en la **Tabla 2**, que muestra la lógica de la simulación financiera aplicada al Programa ATA. En ella, el flujo de caja proyectado a diez años, construido a partir de indicadores como ROP, BM y consumo marginal, presenta una tendencia positiva y una TIR del 424 %, sugiriendo que es posible alinear el retorno económico con procesos de regeneración verificable

Tabla 2: Proyección del flujo exergético y TIR del sistema ATA
Fuente: Elaboración propia

IRR (Tasa Interna de Retorno) Programa ATA

% / Mil. / Año	Inv	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TIRE 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	
TIRA 2595% - 0.07	2	5	15	44	130	389	1,163	3,484	10,438	31,288	

La tabla resulta relevante porque cumple una doble función. Por un lado, permite observar que la regeneración puede expresarse en términos económicamente inteligibles. Por otro, muestra que la viabilidad financiera no surge desconectada del sistema físico, sino como consecuencia de un proceso que reorganiza energía, materia, capacidades y valor a lo largo del tiempo.

En este mismo marco, la combinación entre **Márkov y Leóntiev** fortalece el análisis aplicado. Márkov permite representar trayectorias probables de cambio de estado; Leóntiev, por su parte, ayuda a modelar relaciones entre entradas y salidas desde una lógica insumo-producto. Integradas, ambas herramientas permiten proyectar no solo trayectorias del sistema, sino también flujos físicos, energéticos y financieros, aportando evidencia más robusta para la gobernanza regenerativa [26], [29]

4.5. Nota crítica sobre la gobernanza regenerativa participativa

Uno de los hallazgos más relevantes que emerge de la aplicación del enfoque VxC es la necesidad de redefinir la noción misma de gobernanza. En modelos tradicionales, gobernar suele asociarse con directivas, normas o decisiones impuestas desde niveles jerárquicos. En contraste, la gobernanza regenerativa participativa propone una lógica facilitadora, colaborativa y estratégica.

No se trata de imponer una visión única desde el poder institucional, sino de habilitar procesos compartidos de decisión sustentados en evidencia científica, conocimiento local y propósito común. Esta diferencia es

especialmente significativa en espacios académicos y científicos como LACCEI, cuyo papel no consiste en dictar normas, sino en articular capacidades y conocimientos que contribuyan a la transformación regenerativa de los territorios.

Desde esta perspectiva, la verdadera gobernanza regenerativa no se basa en el control, sino en la corresponsabilidad; no en la imposición, sino en la participación; no en la norma aislada, sino en la cocreación de soluciones capaces de regenerar vida, valor y sostenibilidad desde la acción.

4.6. Cierre del marco aplicativo

En conjunto, el marco aplicativo muestra que la Ingeniería VxC puede operar como una herramienta de análisis y conducción de trayectorias regenerativas en sistemas complejos. La **Figura 9** aporta la base exergética y sistémica del análisis; la **Figura 10** introduce la lógica de transición bajo incertidumbre; las **Figuras 11 a 13** permiten comparar escenarios prospectivos de degradación, intervención parcial y convergencia regenerativa; y la **Tabla 2** integra la dimensión física con la financiera a través del flujo de valor exergético proyectado.

Esta articulación confirma que la regeneración no debe evaluarse únicamente como ideal normativo, sino como una trayectoria susceptible de modelarse, medirse y proyectarse. Así, el capítulo demuestra que la gobernanza regenerativa puede apoyarse en herramientas rigurosas para anticipar escenarios, evaluar eficiencia sistémica y respaldar decisiones estratégicas con base en evidencia.

5. V. Conclusiones, recomendaciones, trabajos futuros

El desarrollo del presente estudio ha permitido articular un marco conceptual, operativo y aplicativo para la gobernanza regenerativa participativa VxC, integrando fundamentos físico-químicos, criterios exergéticos y herramientas de análisis prospectivo. A lo largo de los capítulos anteriores se ha demostrado que la regeneración puede abordarse no solo como una aspiración normativa, sino como un proceso susceptible de diseño, modelamiento, implementación y evaluación verificable en sistemas territoriales complejos.

En particular, el marco aplicativo ha evidenciado que la transición hacia trayectorias regenerativas puede analizarse mediante herramientas como las cadenas de Márkov, el enfoque PT4P y la evaluación exergética integrada, permitiendo distinguir entre escenarios degradativos, intervenciones parciales y procesos de convergencia sostenible. Estos resultados refuerzan la idea de que la sostenibilidad efectiva depende de la articulación entre base biofísica, gobernanza participativa y capacidad de transformar procesos en el tiempo.

Sobre esta base, el presente capítulo sintetiza los principales hallazgos del estudio, formula recomendaciones orientadas a la aplicación del modelo y propone líneas de trabajo futuro para profundizar su desarrollo teórico y operativo.

5.1. Conclusiones

La presente investigación permitió desarrollar y estructurar la Ingeniería VxC como una propuesta de gobernanza regenerativa participativa basada en fundamentos físico-químicos, criterios exergéticos y herramientas de análisis prospectivo. A partir del marco conceptual, operativo y aplicativo desarrollado, es posible extraer las siguientes conclusiones principales.

En primer lugar, el enfoque VxC demuestra que la sostenibilidad puede ser reformulada como un proceso activo de regeneración y no solo como mitigación, compensación o cumplimiento normativo. Al fundamentarse en el CRFC, el modelo propone una interpretación en la que el carbono deja de ser considerado únicamente como pasivo climático y pasa a concebirse como insumo estructural dentro de procesos capaces de generar biomasa, organización y valor multicapital [7], [8]. Esta reformulación constituye uno de los aportes centrales del trabajo, pues desplaza la discusión desde la reducción del daño hacia la capacidad de rediseñar sistemas para producir resultados positivos y verificables.

En segundo lugar, la investigación confirma que la regeneración no puede sostenerse únicamente desde la dimensión técnica, sino que requiere

una arquitectura de gobernanza capaz de articular propósito, participación, decisión y operación. En ese sentido, la integración entre DPAV, CEPA, 9PE y GETEC muestra que el modelo VxC no es solo una formulación conceptual, sino una estructura metodológica coherente para diseñar, gobernar e implementar procesos regenerativos con trazabilidad física, social y territorial [8], [16], [21]. Este hallazgo refuerza la idea de que la gobernanza regenerativa exige distinguir entre administrar, gestionar y gobernar, así como reconocer el papel central de la participación en la sostenibilidad de las trayectorias de cambio.

En tercer lugar, el uso combinado de herramientas como las cadenas de Márkov, la lógica PT4P, el análisis exergético y la referencia a relaciones insumo-producto permite mostrar que la transición hacia estados regenerativos puede modelarse, compararse y evaluarse con mayor rigor. Los escenarios prospectivos desarrollados evidencian que no toda mejora parcial conduce a una convergencia sostenible: la estabilidad regenerativa depende de la articulación simultánea entre planeta, personas, procesos y provecho [23], [24], [28], [29]. En particular, el análisis sugiere que las trayectorias más robustas son aquellas en las que la dimensión social no queda subordinada a medidas normativas o tecnológicas, sino que participa activamente en la transformación del sistema.

En cuarto lugar, el modelo permite integrar métricas físicas, energéticas y económicas dentro de una misma lógica de evaluación. Indicadores como ROP, BM y PTF, articulados con el flujo de valor exergético acumulado y con la TIR proyectada, muestran que es posible relacionar regeneración y viabilidad económica sin reducir la primera a una mera traducción monetaria. Esto constituye un aporte relevante, ya que permite dialogar tanto con enfoques biofísicos como con necesidades prácticas de evaluación para tomadores de decisión.

En quinto lugar, la validación territorial del enfoque a través del sistema ATA sugiere que la Ingeniería VxC posee potencial de aplicabilidad en territorios complejos como la Amazonía, donde confluyen desafíos ecológicos, sociales, energéticos e institucionales. Más que ofrecer una solución cerrada, el modelo propone una plataforma de análisis y actuación capaz de adaptarse a diferentes contextos territoriales, siempre que se mantenga la coherencia entre base biofísica, diseño estratégico, articulación multiactor y evaluación verificable.

En síntesis, la investigación confirma la hipótesis de trabajo planteada: la sostenibilidad efectiva no puede alcanzarse únicamente mediante la mitigación o compensación de impactos, sino a través del rediseño de procesos para transformar drenajes y consumos marginales en beneficios regenerativos verificables, en coherencia con los principios físicos, bioquímicos y sociales que sostienen la vida.

5.2. Recomendaciones.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda profundizar la difusión y posicionamiento del CRFC y de la Ingeniería VxC como base científico-técnica de una gobernanza regenerativa capaz de articular carbono, energía, biomasa y valor multicapital en un mismo marco de análisis y actuación. Esta difusión no debería orientarse solo a espacios académicos, sino también a instituciones públicas, actores territoriales y organizaciones interesadas en rediseñar procesos con criterios regenerativos.

Asimismo, se recomienda promover la creación y fortalecimiento de redes de gobernanza territorial basadas en VxC, articulando actores institucionales, académicos, comunitarios y productivos alrededor de propósitos compartidos de regeneración. La aplicabilidad del enfoque depende, en buena medida, de su capacidad para traducirse en procesos colaborativos y no únicamente en esquemas analíticos o normativos.

Del mismo modo, conviene impulsar pilotos territoriales adicionales en contextos estratégicos, especialmente en ecosistemas y territorios donde la degradación socioambiental, la fragilidad institucional y la necesidad de innovación hagan visible la utilidad de un enfoque regenerativo. La Amazonía constituye un punto de partida relevante, pero no el único; el modelo podría explorarse también en sistemas agroforestales, gestión hídrica, bioeconomía territorial e infraestructura verde.

También se recomienda fortalecer la formación técnica e institucional en gobernanza regenerativa participativa. La incorporación de herramientas como DPAV, CEPA, 9PE, GETEC y los instrumentos prospectivos del modelo en programas de educación superior, capacitación territorial y planificación pública contribuiría a ampliar la base de actores capaces de diseñar y operar procesos regenerativos con mayor rigor.

Por último, se recomienda consolidar enfoques de evaluación que integren métricas físicas, energéticas, sociales y económicas, evitando reducir la regeneración a simples marcos declarativos o de reporte. En particular, la articulación entre exergía, PT4P, cadenas de Márkov, análisis insumo-provecho e indicadores operativos ofrece una base prometedora para fortalecer la evaluación estratégica del desarrollo sostenible.

5.3. Trabajos futuros

Como línea futura de investigación, resulta pertinente profundizar en el desarrollo teórico-operativo del CRFC como fundamento físico-químico de la Ingeniería VxC, explorando con mayor precisión sus alcances, límites y posibilidades de adaptación a diferentes escalas territoriales, productivas y organizacionales. Este esfuerzo permitiría fortalecer la consistencia conceptual del modelo y ampliar su capacidad explicativa.

Asimismo, se plantea como línea prioritaria el diseño e implementación de una plataforma de trazabilidad multicapital que permita monitorear procesos VxC en tiempo real mediante indicadores como ROP, BM, CM y PTF, integrando simulación estocástica, balances exergéticos y modelamiento con cadenas de Márkov. Un desarrollo de esta naturaleza facilitaría tanto la evaluación aplicada como la comparabilidad entre experiencias territoriales.

Otra línea de trabajo futuro consiste en ampliar la validación empírica del modelo en contextos diversos. La aplicación en sectores como agricultura regenerativa, recuperación de suelos, infraestructura verde, restauración hídrica y bioeconomía circular permitiría contrastar la robustez del enfoque frente a sistemas con dinámicas distintas y fortalecer su capacidad de generalización.

También resulta relevante desarrollar estudios comparativos entre VxC y marcos tradicionales de sostenibilidad, tales como GRI, ASG, PHVA u otros instrumentos de gestión y reporte. Este tipo de comparación permitiría precisar con mayor claridad qué aporta específicamente la Ingeniería VxC en términos de trazabilidad, cocreación, rendimiento multicapital y prospectiva regenerativa.

Finalmente, se considera pertinente explorar la conformación de redes territoriales y observatorios de aplicación de VxC que articulen gobiernos locales, comunidades, academia y sectores productivos. Ello permitiría no solo validar el modelo en diferentes entornos, sino también generar aprendizaje acumulativo, intercambio metodológico y fortalecimiento de capacidades para la gobernanza regenerativa en América Latina.

Referencias

- [1] IPCC, *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- [2] A. Bárcena, J. L. Samaniego, W. Peres y J. E. Alatorre, *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020, Libros de la CEPAL, No. 160, LC/PUB.2019/23-P.
- [3] D. H. Meadows, D. L. Meadows y J. Randers, *Limits to Growth: The 30-Year Update*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, 2004.
- [4] V. Smil, *Energy: A Beginner's Guide*. Oxford: Oneworld Publications, 2006.
- [5] J. Elkington, "25 Years Ago I Coined the Phrase 'Triple Bottom Line.' Here's Why It's Time to Rethink It," *Harvard Business Review*, Jun. 25, 2018.
- [6] FAO, *Photosynthesis and Biomass Productivity: A Global Perspective*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.
- [7] C. A. S. Hall y K. A. Klitgaard, *Energy and the Wealth of Nations: Understanding the Biophysical Economy*. New York: Springer, 2012.
- [8] J. Lu-Chang-Say, "Process engineering for sustainably, IP.IDEAS (Innovation, Development and Entrepreneurship to Act Social)," in *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2023.
- [9] Global Reporting Initiative, *GRI Standards*. Amsterdam: Global Reporting Initiative.
- [10] International Organization for Standardization, "ISO 14000 family — Environmental management." Geneva: ISO.
- [11] United Nations Development Programme, *Human Development Report 2023/2024: Breaking the Gridlock: Reimagining Cooperation in a Polarized World*. New York: UNDP, 2024.
- [12] R. Lazarus, "Emissions and Evaluation: Measuring the Immeasurable in Sustainability," *Environmental Systems Journal*, vol. 45, no. 3, pp. 331–349, 2018.
- [13] D. Diskienė, B. Galiniene y A. Marčinskas, "A Strategic Management Model for Economic Development," *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 14, no. 3, pp. 375–387, 2008. doi: 10.3846/1392-8619.2008.14.375-387.
- [14] W. E. Deming, *Out of the Crisis*. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [15] F. W. Taylor, *The Principles of Scientific Management*. New York: Harper & Brothers, 1911.
- [16] P. Checkland y J. Poulter, *Soft Systems Methodology in Action*. Chichester: Wiley, 2010.
- [17] D. Victor y P. Agamuthu, "Strategic Environmental Assessment Policy Integration Model for Solid Waste Management in Malaysia," *Environmental Science & Policy*, vol. 33, pp. 233–245, 2013. doi: 10.1016/j.envsci.2013.06.008.
- [18] P. Freire, *Pedagogía del oprimido*. Buenos Aires: Siglo XXI Editores, 1970.
- [19] J. D. Sachs, *The Age of Sustainable Development*. New York: Columbia University Press, 2015.
- [20] S. A. Kauffman, *A World Beyond Physics: The Emergence and Evolution of Life*. New York: Oxford University Press, 2019.
- [21] J. W. Forrester, *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [22] B. Walker, C. S. Holling, S. R. Carpenter y A. Kinzig, "Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems," *Ecology and Society*, vol. 9, no. 2, art. 5, 2004. doi: 10.5751/ES-00650-090205.
- [23] C. Folke, S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin y J. Rockström, "Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability," *Ecology and Society*, vol. 15, no. 4, art. 20, 2010. doi: 10.5751/ES-03610-150420.
- [24] R. U. Ayres y B. Warr, *The Economic Growth Engine: How Energy and Work Drive Material Prosperity*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2009.
- [25] N. Georgescu-Roegen, *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.
- [26] E. M. Goldratt, *La meta: Un proceso de mejora continua*. Madrid: Díaz de Santos, 1990.
- [27] United Nations Environment Programme, *Global Environment Outlook GEO-6: Regional Assessments*. Nairobi: UNEP, 2016. **Nota:** conviene confirmar si desea citar la edición regional o el informe general definitivo.
- [28] J. G. Kemeny y J. L. Snell, *Finite Markov Chains*. New York: Springer-Verlag, 1976.
- [29] W. Leontief, "Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach," *The Review of Economics and Statistics*, vol. 52, no. 3, pp. 262–271, 1970. doi: 10.2307/1926294.