

ANEXO C Análisis estructural y análisis de proyección de escenarios de desarrollo del modelo del Sistema de Sustentabilidad de las Edificaciones e Infraestructuras (SSEI)



Introducción

En este informe se presenta un análisis estructural del modelo del Sistema de Sustentabilidad de las Edificaciones e Infraestructuras (de aquí en adelante SSEI). Se indican los procedimientos resumidos y los resultados de un estudio conducente a la identificación de variables clave dentro del sistema. En específico, se pretende identificar aquellas variables de sistema que, de ser intervenidas en forma crónica, ejerzan –a través de vías directas e indirectas– las mayores influencias sobre las variables objetivo del sistema. Finalmente, se presentan los procedimientos resumidos y los resultados de un estudio conducente a evaluar comparativamente la proyección del estado del SSEI si este es sometido a intervenciones crónicas en un subconjunto de sus elementos, provenientes de estrategias de intervención, entendidas como escenarios plausibles de desarrollos futuros del SSEI.

Los insumos básicos para la realización de este estudio se extraen fundamentalmente desde el modelo sistémico discursivo (MSD), como se explicará en la sección 1.1 y son:

- el conjunto de variables que componen el modelo del SSEI
- el conjunto de interrelaciones (influencias directas signadas) entre las variables del modelo del SSEI;
- el conjunto de pesos asignados a las interrelaciones;
- el valor normativo de las variables, es decir, si es deseable que estas aumenten o disminuyan de nivel en el futuro;
- las variables objetivo del sistema, que constituyen el blanco de manejo y actúan como indicadoras de la eficacia de una intervención;
- las estrategias de intervención sobre el SSEI que se desean proyectar.

En lo que sigue de esta sección, se expone el procedimiento de obtención de las variables y relaciones del sistema de estudio a partir del MSD, y luego se presenta el detalle de los insumos que sirven de base al análisis (secciones 1.1 y 1.2). Posteriormente, en la sección 2 se muestran los resultados del análisis estructural, mientras que en la sección 3 se muestran los resultados del análisis de proyección de las estrategias de intervención. Se finaliza con la lista de conclusiones en la sección 4.

Traducción del modelo discursivo al modelo formal

Un modelo sistémico discursivo es un “conjunto de elementos y sus relaciones recíprocas con una función”. En particular, el SSEI es un sistema social, es decir, sus elementos y relaciones se constituyen en la esfera de la sociedad.

Para conducir un análisis estructural cuantitativo de un modelo sistémico, se deben transformar: a) los elementos del MSD en elementos (variables) del modelo formal (grafo dirigido signado o sidigrafo), y b) las relaciones entre elementos del MSD en relaciones entre elementos del sidigrafo. Estas transformaciones se resumen en la Fig. 1.

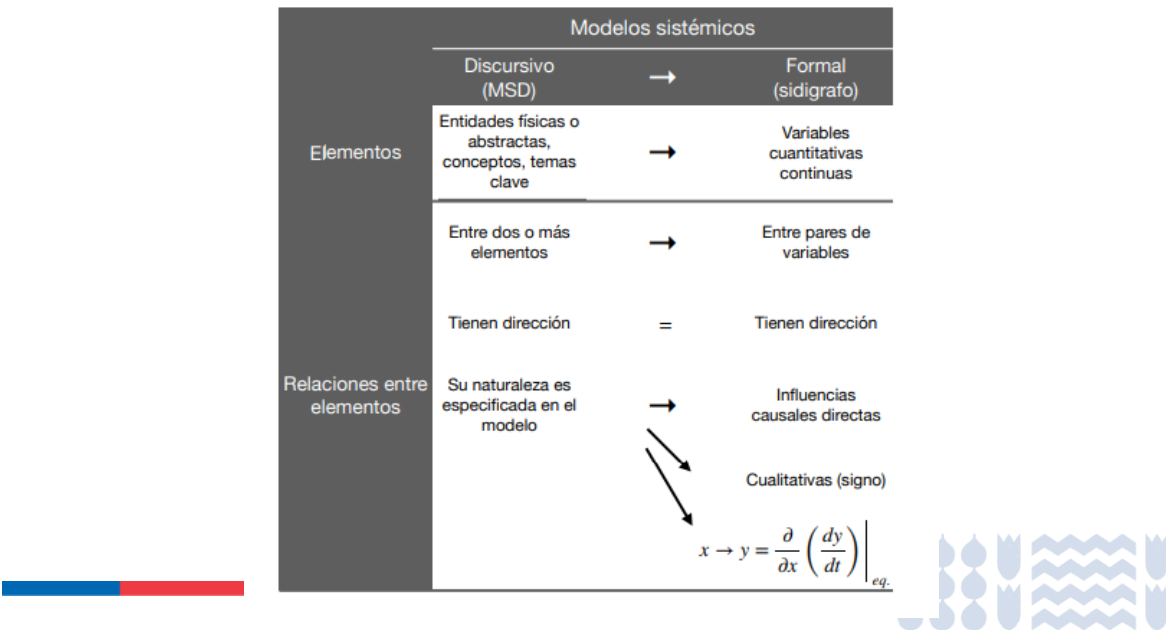


Figura 1: Transformaciones de elementos/relaciones del modelo discursivo a elementos/relaciones del modelo formal.

En el modelo formal, los elementos pueden ser entidades abstractas o físicas, pero deben representar variables cuantitativas continuas. Por otro lado, las relaciones deben representar influencias causales directas entre los elementos especificados. Estas relaciones deben tener dirección (desde el elemento de origen hacia el elemento de destino) y deben también poseer signo. Una relación positiva de x hacia y, indica formalmente que un incremento en el nivel de la variable x genera directamente (i.e.

manteniendo constantes el resto de las variables del sistema) un incremento en el nivel de la variable y, y que una disminución en el nivel de la variable x genera directamente una disminución del nivel de y. En oposición, una relación negativa de x hacia y, indica que un incremento en el nivel de la variable x genera directamente una disminución en el nivel de la variable y, y que una disminución en el nivel de la variable x genera directamente un aumento del nivel de y.

Insumos para el análisis estructural del SSEI

Las variables componentes del sistema formal, sus respectivas etiquetas y su valor normativo se muestran en el Cuadro 1. El valor normativo V n de una variable indica la dirección de cambio deseada para tal variable. Así, un valor normativo V n = 1 indica que es deseable que el nivel de dicha variable se incremente, V n = -1 indica que es deseable una disminución del nivel de dicha variable, y V n = 0 indica que su cambio es irrelevante para los propósitos de la gestión. Las interrelaciones entre las variables se muestran posteriormente en la sección 2.1 de Resultados. En el modelo, las relaciones entre variables se especifican inicialmente en su signo (+ ó -) pero no en su intensidad. Así, el modelo formal inicial se representa como un grafo dirigido signado (sidigrafo) sin peso, en que las variables del sistema se representan como vértices y sus interrelaciones como arcos. Posteriormente, en la sección 2.3 se incorporan pesos (intensidades) en las relaciones entre las variables del SSEI, para su posterior análisis.

Las variables objetivo del sistema, que son las indicadoras del estado del SSEI, se determinaron en función de los criterios de los Factores Críticos de Decisión

#	Descripción de la variable	V ⁿ	V.O.
1	Nivel de sustentabilidad en el uso de RH	1	←
2	Grado de cumplimiento normativo	1	
3	Nivel de utilización intensiva de RRNN	-1	←
4	Magnitud de impactos negativos en la población	-1	←
5	Emisiones GEI	-1	←
6	Resiliencia climática de edificaciones e infraestructuras	1	←
7	Eficiencia energética de edificaciones e infraestructura	1	←
8	Eficiencia en gestión de residuos	1	←
9	Volumen del mercado de materiales reciclables	1	
10	Productividad del sector construcción.	1	
11	Industrialización, digitalización y trazabilidad	1	
12	Magnitud de brechas de género en la industria	-1	
13	Nivel de competencias y calificaciones técnicas	1	
14	Nivel de desarrollo de una cultura de construcción sustentable	1	
15	Riesgo de inadecuación a entornos urbano-territorial y socio cultural	-1	←
16	Nivel de asentamiento de la política pública	1	
17	Nivel de integración de la gobernanza	1	
18	Disponibilidad de regulaciones e instrumentos de gestión	1	
19	Implementación de prácticas sustentables	1	
20	Costes de implementación	-1	
21	Volumen de incentivos de financiamiento	1	
22	Nivel de participación pública	1	
23	Solidez y consistencia de marco de referencia de la política climática	1	
24	Nivel conflictividad socio ambiental	-1	

Cuadro 1: Etiqueta (#), descripción y valor normativo (V n) de las variables del modelo SSEI. En la última columna se señalan con ← aquellas variables que corresponden a los objetivos de gestión (i.e. variables objetivo, V.O.)

Los resultados del análisis estructural se presentan en la siguiente sección, divididos en tres etapas: 1) visualización del sistema, 2) medidas de centralidad y 3) análisis de proyección de influencias totales.



Análisis estructural del SSEI

Influencias directas entre variables del SSEI

Matriz de adyacencia: El sidigrafo del modelo de sistema se representa mediante su matriz de adyacencia A (Fig. 2), en que sus elementos $(A)_{ij}$ indican las influencias directas desde la variable ubicada en la columna j hacia la variable ubicada en la fila i. Así, las influencias directas positivas se indican como $(A)_{ij} = 1$, las influencias directas negativas como $(A)_{ij} = -1$, mientras que elementos $(A)_{ij} = 0$ indican la ausencia de influencia directa de j hacia i.

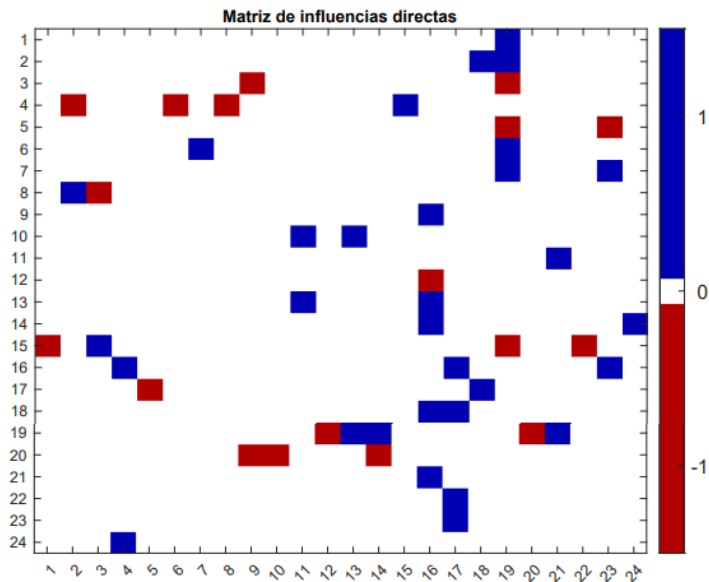


Figura 2: Matriz de adyacencia **A** del SSEI. Las celdas de la matriz indican el signo (azul: positivo, rojo: negativo, blanco; cero) de la influencia directa ejercida por la variable en columna *j* sobre la variable en fila *i*.

Centralidad topológica

La importancia de cada vértice para el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de una red puede aproximarse, de forma simple, mediante las métricas de centralidad topológica (ver Ramos-Jiliberto, 2020 para una explicación detallada de estas métricas). Estas medidas caracterizan la posición de cada vértice dentro de la topología de la red. En el Cuadro 2, se entregan los valores de las medidas de centralidad más utilizadas para sidigrafos, para las variables del SSEI.

#	G	G _{in}	G _{out}	CI	C _{in}	C _{out}
1	2	1	1	0.0000	0.0116	0.0096
2	4	2	2	38.7121	0.0145	0.0120
3	4	2	2	21.3667	0.0141	0.0100
4	6	4	2	238.3030	0.0169	0.0149
5	3	2	1	55.8636	0.0125	0.0133
6	3	2	1	45.2121	0.0130	0.0116
7	3	2	1	6.0000	0.0130	0.0096
8	3	2	1	15.3333	0.0123	0.0116
9	3	1	2	24.4273	0.0114	0.0118
10	3	2	1	3.0000	0.0105	0.0102
11	3	1	2	3.0000	0.0095	0.0114
12	2	1	1	12.6500	0.0114	0.0122
13	4	2	2	52.6500	0.0125	0.0137
14	4	2	2	53.4561	0.0120	0.0130
15	5	4	1	82.5455	0.0154	0.0116
16	9	3	6	260.9212	0.0145	0.0196
17	6	2	4	103.8636	0.0128	0.0185
18	4	2	2	51.0000	0.0127	0.0147
19	12	5	7	216.9667	0.0147	0.0159
20	4	3	1	31.3333	0.0128	0.0123
21	3	1	2	34.6500	0.0114	0.0149
22	2	1	1	5.1667	0.0104	0.0096
23	4	1	3	8.0000	0.0101	0.0169
24	2	1	1	20.5788	0.0128	0.0104

Cuadro 2: Valores de centralidad de cada variable (#) del SSEI: centralidad de grado total (G), centralidad de grado de entrada (G_{in}), centralidad de grado de salida (G_{out}), centralidad de intermediación (CI), centralidad de cercanía de ingreso (C_{in}) y centralidad de cercanía de salida (C_{out}).

Incorporación de pesos en las influencias directas

En base a la opinión independiente de 17 expertos (pertenecientes a IDIEM, MINVU, MOP, Ministerio de Energía, Ministerio de Vivienda y Urbanismo), se establecieron pesos (magnitudes) a cada una de las influencias directas no nulas entre las variables del SSEI. El procedimiento de asignación de pesos fue el siguiente:

1. Cada experto asignó magnitudes a las influencias no nulas entre las diferentes variables del modelo SSEI, $a_{ij} \neq 0$ con $i \neq j$. La escala utilizada contempla cuatro niveles (1, 2, 3, 4), respetando el signo de la influencia.
2. Se asigna el valor de la mediana de las valoraciones de los expertos a cada influencia $a_{ij} \neq 0$: $\bar{a}_{ij} = med(a_{ij})$.
3. Se re-escalan los valores de $\bar{a}_{ij}$ a fin de modular las diferencias entre los pesos, mediante $\hat{a}_{ij} = sign(a_{ij}) \cdot |\bar{a}_{ij}|^b$, con $b \geq 0$. Con $b = 0$ las influencias recuperan sus valores sin peso: -1, 0 y 1. Con $b = 1$ las influencias mantienen la escala de pesos original. Con $b > 1$ las diferencias entre los pesos son amplificadas. Aquí se utiliza $b = 3$.
4. Se normalizan los valores de $\hat{a}_{ij}$ mediante $a_{ij}^w = \hat{a}_{ij}/s$, donde $s = max\left(max\sum_i |\hat{a}_{ij}|, max\sum_j |\hat{a}_{ij}|\right)$. Se obtiene así la matriz de adyacencia con pesos $\mathbf{A}^w$ (Fig. 3).



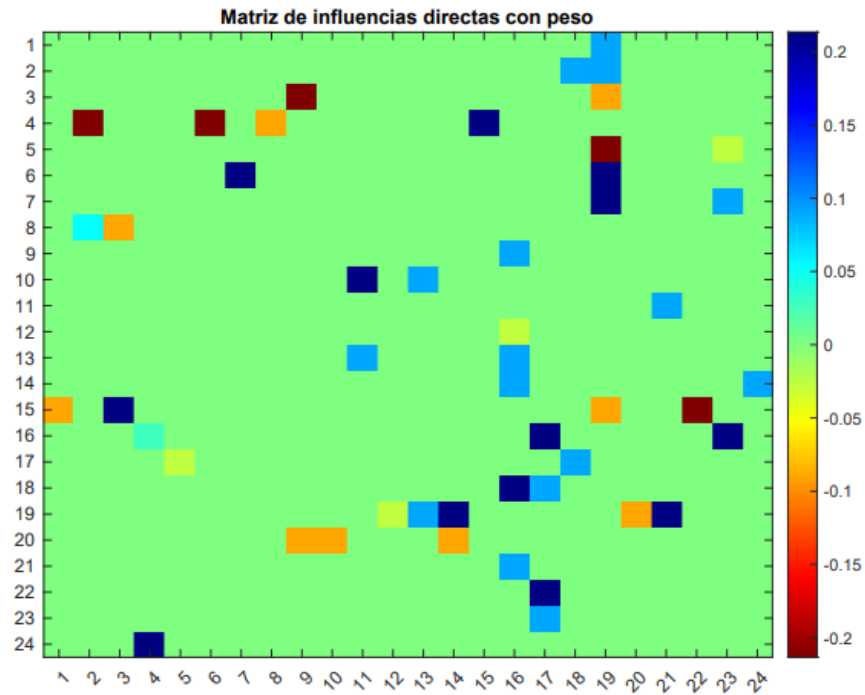


Figura 3: Matriz de adyacencia con pesos, A^w , del SSEI. Las celdas de la matriz indican, según la escala de colores de la derecha, la magnitud de la influencia directa ejercida por la variable en columna j sobre la variable en fila i .

Análisis de proyección de influencias totales

El análisis de proyección de influencias totales requiere que el sistema se encuentre en un equilibrio estable. Para satisfacer el supuesto de estabilidad, modificamos, aproximadamente dentro del intervalo $[-1, 0]$, el nivel de autorregulación de las variables, dado por los valores de la diagonal de la matriz A^w , $a^{w_{ij}}$, y calculamos la probabilidad de que el sistema sea localmente estable. La estabilidad local del sistema se satisface si todos los autovalores de A^w tienen parte real negativa. Para calcular la probabilidad de que el sistema sea estable, perturbamos los valores no-nulos de A^w fuera de la diagonal, escogiendo sus valores aleatoriamente desde una distribución uniforme en el intervalo $[1/2, 2]$, manteniendo el signo original. Para cada valor de la diagonal probado, se obtienen 300 réplicas aleatorias de A^w y se establece si ellas son estables o no. La Fig. 4 muestra la fracción de matrices estables para cada valor de la diagonal. Desde aquí escogemos el máximo valor de la diagonal (i.e. mínimo valor absoluto) que asegure una probabilidad de estabilidad igual a 1. El valor obtenido para la diagonal, aproximado por exceso al décimo, fue de -0.4, el que será utilizado para los subsecuentes análisis.



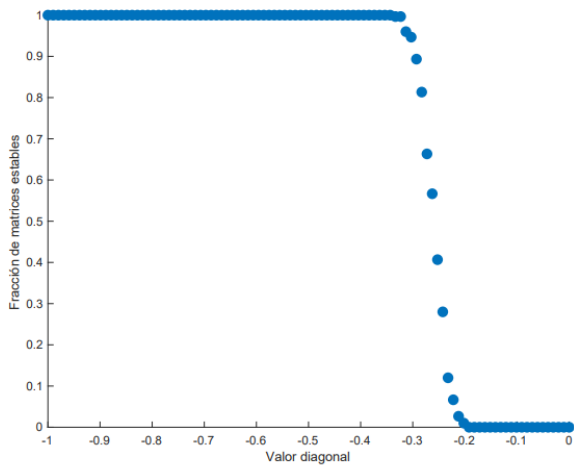


Figura 4: Estabilidad local del sistema en función del nivel de autorregulación de las variables, especificado en la diagonal de la matriz Aw. Para cada valor de autorregulación se corrieron 300 réplicas con perturbación aleatoria de los parámetros no-nulos fuera de la diagonal de Aw.

Matriz de influencias totales

El cálculo de la matriz de sensibilidad S, que contiene las influencias totales proyectadas entre las variables del sistema, se realizó mediante

$$S = (-A^w)^{-1}$$

donde cada elemento (S)ij corresponde a la influencia total que ejercería un aumento crónico del nivel de la variable j sobre el valor de equilibrio de la variable i. La influencia total de j sobre i integra todas las vías directas e indirectas, con su signo y magnitud, por las que j afecta a i. Los valores de las influencias totales obtenidas se muestran en la Fig. 5.

Matriz de influencias totales

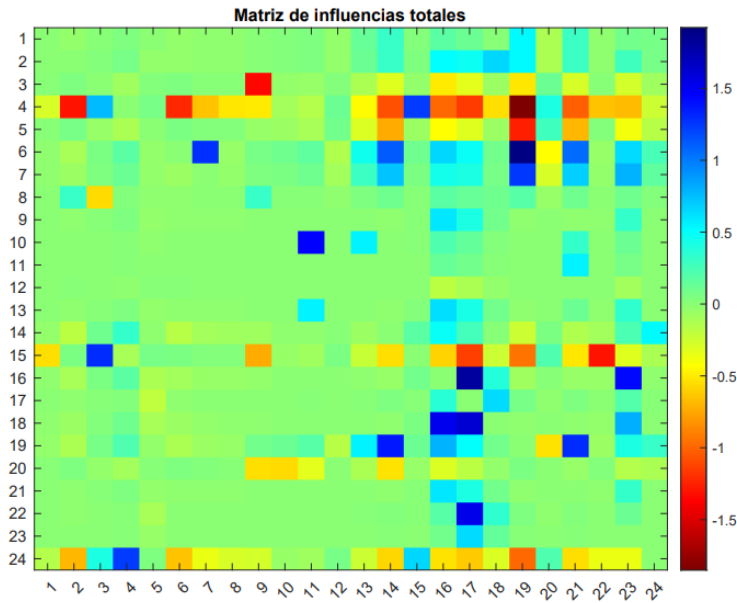


Figura 5: Matriz S de influencias totales. El elemento (celda) (N)ij indica el efecto de elevar el nivel de la variable j sobre el nivel futuro de equilibrio de la variable i.



Centralidad dinámica

Las métricas centralidad dinámica que se presentan en esta sección permiten evaluar la importancia de las variables del sistema sobre la base de las influencias totales que ejercen unas sobre otras, sin considerar variables objetivo específicas. Siguiendo a Ramos-Jiliberto, 2020, se presentan cuatro medidas de centralidad dinámica:

1. Sensibilidad neta: Z_i indica la propensión de la variable i a ser afectada directa o indirectamente por las otras variables del sistema.
2. Reactividad positiva: $R_i \in [-1, 1]$ indica la propensión de la variable x_i a ser incrementada por cambios valorados positivamente en otras variables del sistema o reducida por cambios valorados negativamente.
3. Efectividad: K_i indica la capacidad de la variable i para ejercer cambios, por vías directas o indirectas, en las otras variables del sistema.
4. Virtuosismo: $U_j \in [-1, 1]$ indica la capacidad de la variable x_j de transmitir cambios valorados positivamente en las otras variables del sistema. Es decir, es la capacidad de la variable x_j de, dado un aumento en ella, aumentar el valor de las variables valoradas positivas y disminuir el valor de las variables valoradas negativas.

Los valores de centralidad dinámica de las variables de nuestro modelo SSEI se muestran en el Cuadro 3 y en la Fig. 6.

#	Z	R	K	U
1	0.0470	0.7654	0.0255	0.6580
2	0.0814	0.8370	0.0712	0.4046
3	0.0934	-0.8532	0.0779	-0.6954
4	0.3478	-0.9696	0.0665	0.1961
5	0.1163	-0.7695	0.0231	-1.0000
6	0.2051	0.8305	0.0601	0.3634
7	0.1283	0.8007	0.0592	0.6800
8	0.0501	0.9191	0.0261	0.3241
9	0.0357	0.7607	0.0896	0.9286
10	0.0637	0.9539	0.0263	0.9675
11	0.0202	0.9061	0.0733	0.9825
12	0.0106	-0.7535	0.0187	-0.9306
13	0.0521	0.8332	0.0806	0.9526
14	0.0734	-0.3910	0.1716	0.9769
15	0.2021	-0.9139	0.0609	-0.3445
16	0.1011	0.6100	0.2418	1.0000
17	0.0383	0.8542	0.2901	1.0000
18	0.0978	0.7951	0.0903	1.0000
19	0.1583	0.6834	0.2296	0.9143
20	0.0714	-0.6939	0.0629	-0.9387
21	0.0356	0.7619	0.1762	0.9522
22	0.0538	0.9483	0.0607	0.6525
23	0.0217	0.9421	0.1853	1.0000
24	0.2094	-1.0000	0.0473	0.9812

Cuadro 3: Valores de Sensibilidad neta (Z), Reactividad positiva (R), Efectividad (K) y Virtuosismo (U) para las variables del sistema



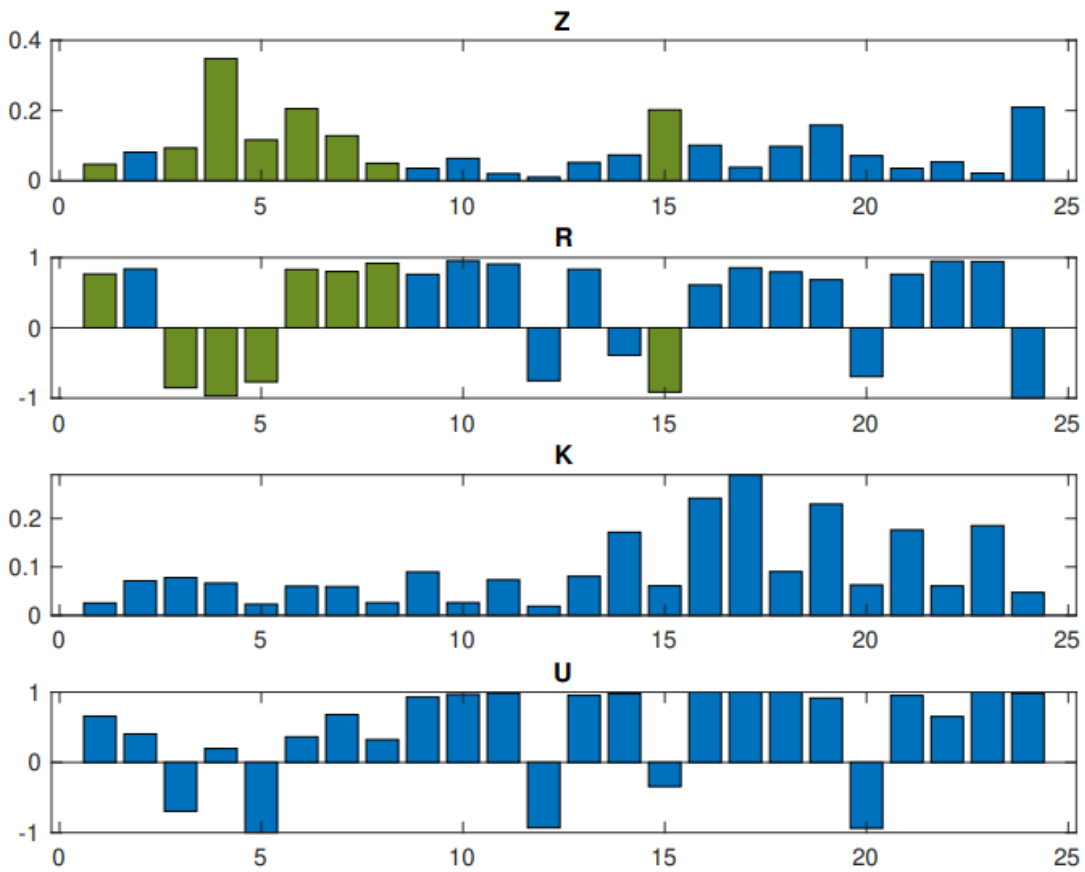


Figura 6: Valores de *Sensibilidad neta* (Z), *Reactividad positiva* (R), *Efectividad* (K) y *Virtuosismo* (U) para las variables del sistema. Para Z y R, las barras de color verde indican las variables objetivo del sistema.

Las variables objetivo muestran valores relativamente altos de sensibilidad Z. Es decir, las variables objetivo muestran en general una alta propensión ser movilizadas, comparado con las otras variables del SSEI. Desde la perspectiva de identificar variables capaces de movilizar al resto del sistema, es informativo notar que las variables 17, 16, 19, 23, 21 y 14 son las que (en orden decreciente) presentan los mayores valores de efectividad K.

Importancia dinámica de las variables sobre variables objetivo

En esta sección se analiza el rol de las variables del sistema como potenciales impulsoras de cambio en los niveles de las variables objetivo definidas (ver Cuadro 1). En la Fig. 7 se muestran solamente los efectos totales (matriz S) ejercidos sobre las variables objetivo.



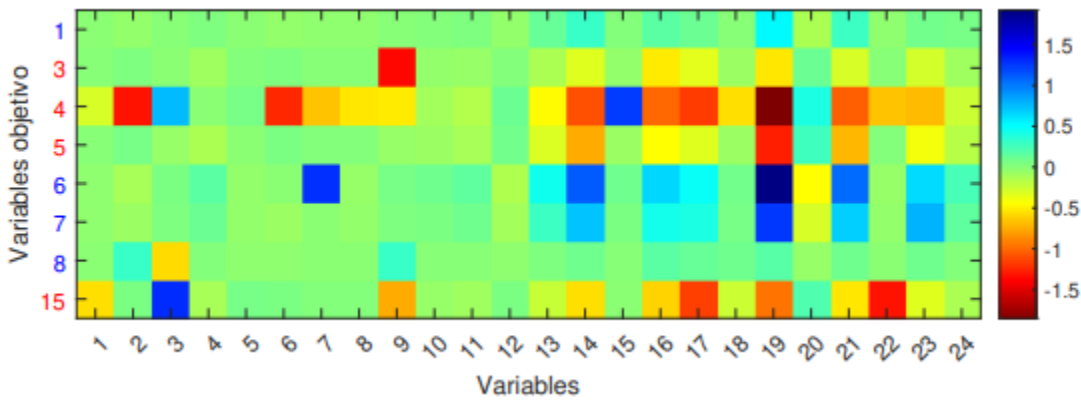


Figura 7: Influencias totales de cada variable (en columnas) sobre las variables objetivo (en filas). El color del índice de las variables objetivo indica su valor normativo; azul: positivo; rojo: negativo.

La importancia dinámica I_j de una variable j del modelo se define como el efecto neto esperado en las variables objetivo del sistema, tras un pequeño aumento en el nivel de la variable j . Para calcular I_j a partir de $\mathbf{N}$, primero se asignan valores de objetivo ω_i a cada variable del sistema, en este caso de 1 para las variables objetivo y 0 para el resto de las variables. Luego se realiza una suma con pesos para cada columna j de $\mathbf{S}$, $I_j = \sum_i \omega_i v_i(\mathbf{S})_{ij}$, donde v_i es el valor normativo de la variable i . Los valores obtenidos de I_j se ordenan para obtener el ranking R de importancia dinámica de las variables del sistema. El valor de $R = 1$ se asigna a la variable con mayor importancia dinámica, es decir, a aquella variable que genera el mayor valor de la suma de las magnitudes de los efectos dinámicos deseados en el sistema (definido por el valor objetivo y el valor normativo de las variables) y, por lo tanto, es la mejor candidata a ser intervenida. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.

R^*	#	Descripción de la variable	I^*
1	19	Implementación de prácticas sustentables	8.4595
2	14	Nivel de desarrollo de una cultura de construcción sustentable	4.9400
3	21	Volumen de incentivos de financiamiento	4.6644
4	17	Nivel de integración de la gobernanza	4.0894
5	16	Nivel de asentamiento de la política pública	3.9791
6	23	Solidez y consistencia de marco de referencia de la política climática	3.2746
7	9	Volumen del mercado de materiales reciclables	3.0661
8	3	Nivel de utilización intensiva de RRNN	-2.4694
9	13	Nivel de competencias y calificaciones técnicas	1.9997
10	20	Costes de implementación	-1.9034
11	7	Eficiencia energética de edificaciones e infraestructura	1.8338
12	22	Nivel de participación pública	1.8004
13	2	Grado de cumplimiento normativo	1.2493
14	18	Disponibilidad de regulaciones e instrumentos de gestión	1.2012
15	24	Nivel conflictividad socio ambiental	1.1115
16	6	Resiliencia climática de edificaciones e infraestructuras	0.9711
17	15	Riesgo de inadecuación a entornos urbano-territorial y socio cultural	-0.9321
18	1	Nivel de sustentabilidad en el uso de RH	0.7654
19	11	Industrialización, digitalización y trazabilidad	0.6784
20	4	Magnitud de impactos negativos en la población	0.6626
21	12	Magnitud de brechas de género en la industria	-0.5640
22	10	Productividad del sector construcción.	0.4283
23	8	Eficiencia en gestión de residuos	0.3751
24	5	Emisiones GEI	-0.2518

Cuadro 4: Ranking de importancia dinámica de las variables del sistema. Las columnas del Cuadro muestran lo siguiente: 1: posición de la variable j dentro del ranking; 2: etiqueta de la variable j ; 3: descripción de la variable; 4: valor signado de importancia dinámica de la variable j . El signo de I^* indica la dirección de la perturbación crónica (intervención) ejercida sobre la variable j que resulta en el valor absoluto de su importancia dinámica.

Desde el Cuadro 4, puede verificarse que las variables con mayor importancia dinámica dentro del sistema, y por lo tanto las mejores candidatas a intervención son, en primer lugar la 19, y en menor medida la 14, la 21, la 17 y la 16. Una intervención positiva (incremento crónico) sobre cualquiera de estas variables logra movilizar más eficazmente al conjunto de variables objetivo (descontadas las variables intervenidas mismas) en la dirección deseada.

Entre las medidas de centralidad topológica, la que mejor explica la importancia dinámica de las variables del SSEI es la centralidad de grado de salida ($R^2 = 0,64$). Entre las medidas de centralidad dinámica, la que mejor explica la importancia

dinámica de las variables del SSEI es la *efectividad K* ($R^2 = 0,70$), ver Fig. 8.

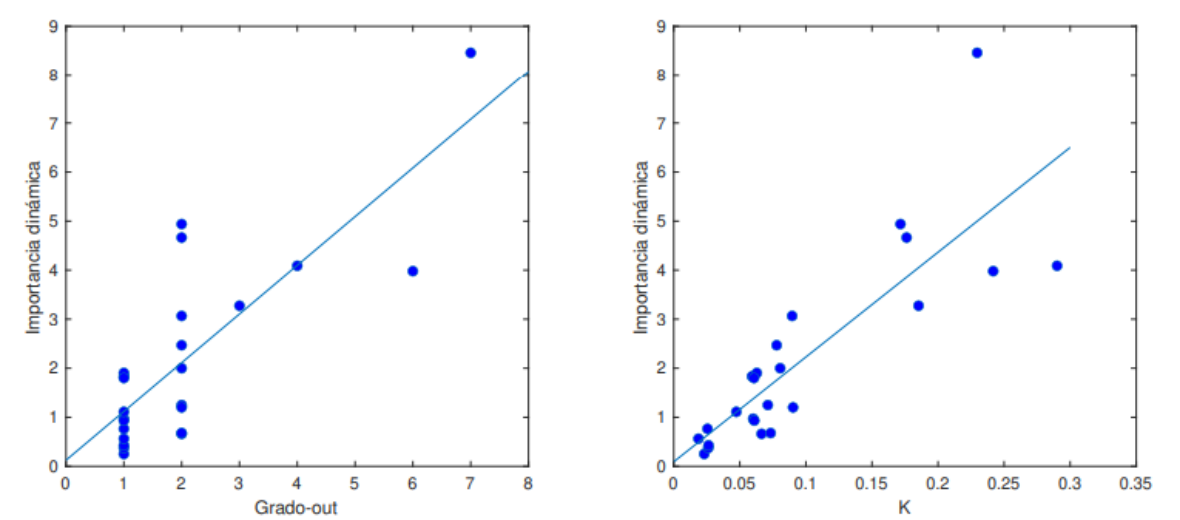


Figura 8: Relación entre valores de centralidad de grado de salida (Grado-out) y efectividad (K) con el valor de importancia dinámica de las variables del SSEI. Las rectas muestran el mejor ajuste por mínimos cuadrados.

Análisis de proyección de escenarios de desarrollo del SSEI

Estrategias de intervención

Se analiza aquí la evolución proyectada del SSEI al ser sometido a impactos crónicos sobre un subconjunto de sus variables, definidos como dos estrategias de intervención alternativas: OD1 y OD2, más una intervención tendencial: ODT. Cada estrategia de intervención se representa como un vector de impacto P , donde cada elemento p_i corresponde a la intensidad relativa del impacto parcial ejercido sobre la variable i del SSEI. Para cada vector de impacto, la suma de los valores absolutos de sus elementos es igual a 1, para fines de comparabilidad entre escenarios. Las estrategias de intervención y sus respectivos impactos se presentan en el Cuadro 5

#	Descripción de la variable	OD1	OD2	ODT
1	Nivel de sustentabilidad en el uso de RH	0	0	0
2	Grado de cumplimiento normativo	0.0326	0	0
3	Nivel de utilización intensiva de RRNN	0	0	0
4	Magnitud de impactos negativos en la población	0	0	0
5	Emisiones GEI	0	0	0
6	Resiliencia climática de edificaciones e infraestructuras	0	0	0
7	Eficiencia energética de edificaciones e infraestructura	0	0	0
8	Eficiencia en gestión de residuos	0	0	0
9	Volumen del mercado de materiales reciclables	0.0326	0.0946	0
10	Productividad del sector construcción.	0	0.0405	0
11	Industrialización, digitalización y trazabilidad	0.1196	0.0811	0.3333
12	Magnitud de brechas de género en la industria	0	0	0
13	Nivel de competencias y calificaciones técnicas	0.3261	0.3649	0
14	Nivel de desarrollo de una cultura de construcción sustentable	0.1304	0	0
15	Riesgo de inadecuación a entornos urbano-territorial y socio cultural	0	0	0
16	Nivel de asentamiento de la política pública	0	0	0
17	Nivel de integración de la gobernanza	0.0543	0.0946	0
18	Disponibilidad de regulaciones e instrumentos de gestión	0.0652	0.0135	0
19	Implementación de prácticas sustentables	0	0	-0.3333
20	Costes de implementación	0	0.0405	0
21	Volumen de incentivos de financiamiento	0.0652	0.2703	0
22	Nivel de participación pública	0.0652	0	0
23	Solidez y consistencia de marco de referencia de la política climática	0.0652	0	0.3333
24	Nivel conflictividad socio ambiental	0.0435	0	0

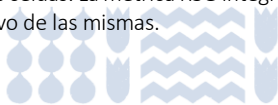
Cuadro 5: Estrategias de intervención OD1, OD2 y ODT. Las tres últimas columnas muestran los impactos sobre las variables del SSEI que componen las tres estrategias de intervención

Análisis de respuestas a intervenciones

Para el cálculo de la influencia total T que ejerce una estrategia de intervención P sobre una respuesta observada R del sistema, se resuelve:

$$T = R \cdot S \cdot P$$

donde R es la matriz de respuesta, que tiene tantas filas como respuestas independientes quieran observarse, y tantas columnas como variables tenga el sistema, $S = (-A^w)^{-1}$ es la matriz de sensibilidad del sistema, y P es vector columna de impactos que representa una estrategia de intervención (ver Fig. 9 para una explicación más intuitiva). En particular, cuando se desea observar la influencia total de una intervención sobre cada variable del sistema por separado, $T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n]$, R debe ser igual a la matriz de identidad, con 1 en la diagonal principal y 0 en el resto de las celdas. Cuando se quiere obtener la respuesta sistémica global ($T=RSG$), R es una fila con unos en las posiciones de las variables objetivo con valor normativo positivo, -1 en las posiciones de las variables objetivo con valor normativo negativo, y 0 en el resto de las celdas. La métrica RSG integra los cambios proyectados en el conjunto de variables de sistema, ponderados por el valor objetivo de las mismas.



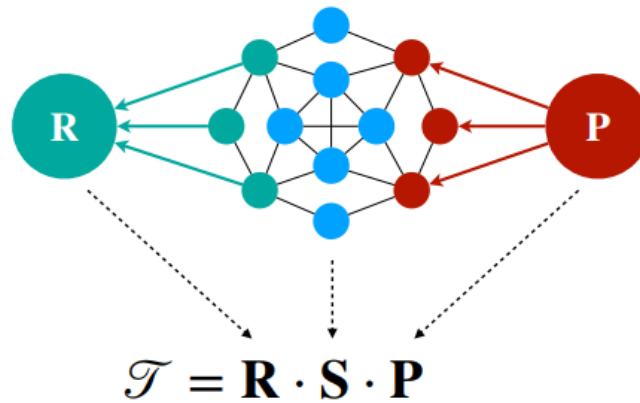


Figura 9: Representación gráfica del cálculo de las influencias totales T que ejerce una estrategia de intervención sobre las respuestas observadas de un sistema. La intervención P se compone de un conjunto de impactos crónicos sobre las variables de intervención (en rojo) del sistema (red al centro de la figura). Estos impactos se transmite por múltiples vías directas e indirectas –definidas por la sensibilidad S del sistema– hacia las variables objetivo (en verde), que conforman la respuesta observada R del sistema.

Con el fin de obtener resultados robustos frente a cambios cuantitativos moderados en los valores estimados de las relaciones entre los elementos del sistema, se perturbaron aleatoriamente los valores positivos y negativos de las celdas de la matriz de influencias A_w . En cada aleatorización, se multiplicaron estos valores por un número al azar tomado de una distribución uniforme dentro del intervalo $[0,8, 1,2]$. Esto resulta en una modificación independiente de $\pm 20\%$ de las celdas de A_w , manteniendo su signo original. Los ceros, además, se mantienen inalterados, respetando así la estructura cualitativa del sistema. Se efectuaron 1000 aleatorizaciones, calculando T para cada una de estas instancias para obtener su promedio y dispersión.

La Fig. 10 muestra las influencias totales de las estrategias de intervención OD1, OD2 y ODT sobre cada variable del SSEI. La inspección cualitativa de estos resultados indica que las estrategias OD1 y OD2 logran movilizar favorablemente (esto es, aumentar el valor de las variables con valor normativo positivo y disminuir el valor de las variables con valor normativo negativo) en todos los casos, con la excepción de la variable 14 en OD2, en que esta muestra una reducción mínima. De modo diferente, la estrategia tendencial ODT proyecta una disminución de 6 (de un total de 17) variables con valor normativo positivo, junto a un aumento en 5 (de un total de 7) variables con valor normativo negativo. Respecto de las variables objetivo, OD1 y OD2 movilizan favorablemente al 100 % de estas, mientras ODT no moviliza favorablemente a ninguna de las variables objetivo.



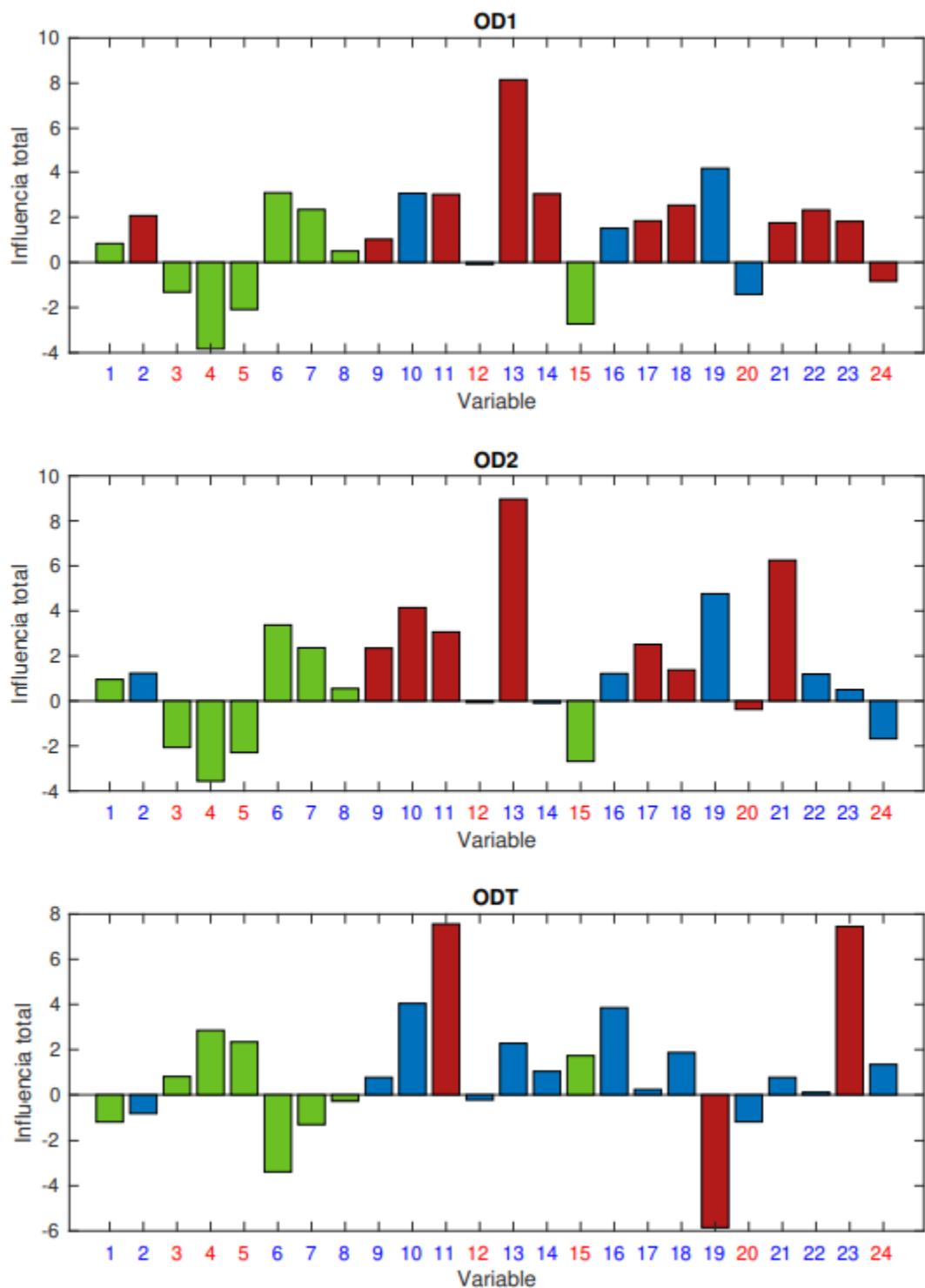


Figura 10: Influencias totales de las estrategias de intervención OD1 (gráfico superior), OD2 (gráfico intermedio) y ODT (gráfico inferior) calculadas sobre cada variable del SSEI. Columnas en rojo: variables intervenidas. Columnas en verde: variables objetivo. El color de las etiquetas del eje-x indican el valor normativo de las variables; azul: positivo; rojo: negativo. Promedios sobre 1000 aleatorizaciones.

La Fig. 11 muestra comparativamente la respuesta sistémica global (RSG) del SSEI frente a las estrategias de intervención OD1, OD2 y ODT. La OD2 mostró una efectividad positiva, ligeramente superior a OD1, mientras que ODT mostró una efectividad negativa.

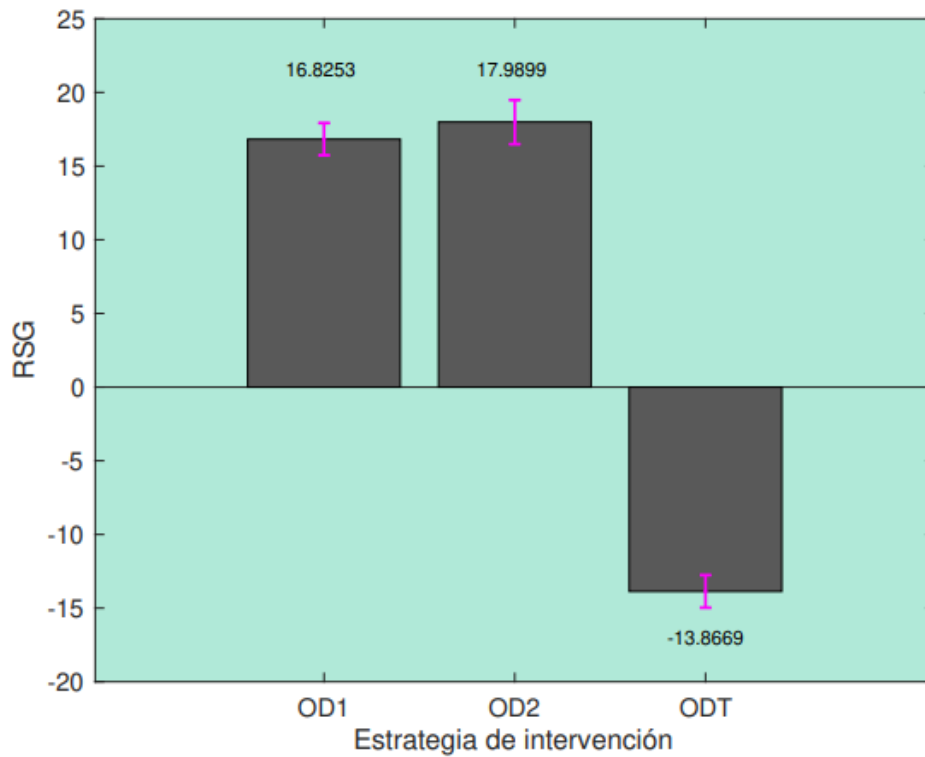


Figura 11: Respuesta sistémica global (RSG) generada por los tres escenarios de intervención evaluados: OD1, OD2 y ODT. Las columnas muestran promedios sobre 1000 aleatorizaciones. Las barras de error muestran ± 1 desviación estándar.

Deconstrucción y optimización de las estrategias de intervención

Con el fin de estimar la contribución de cada variable impactada que compone una estrategia de intervención sobre la RSG, se calculó la RSG frente a impactos en cada variable intervenida, en cada una de las estrategias de intervención. Estos resultados se muestran en la Fig. 12. Se observa que las contribuciones de los impactos que componen una estrategia de intervención son heterogéneas, con variables que contribuyen de forma muy menor al impacto global de cada intervención. Esto sugiere que es posible minimizar el número de variables de intervención, para obtener una RSG similar a la obtenida con los impactos completos.



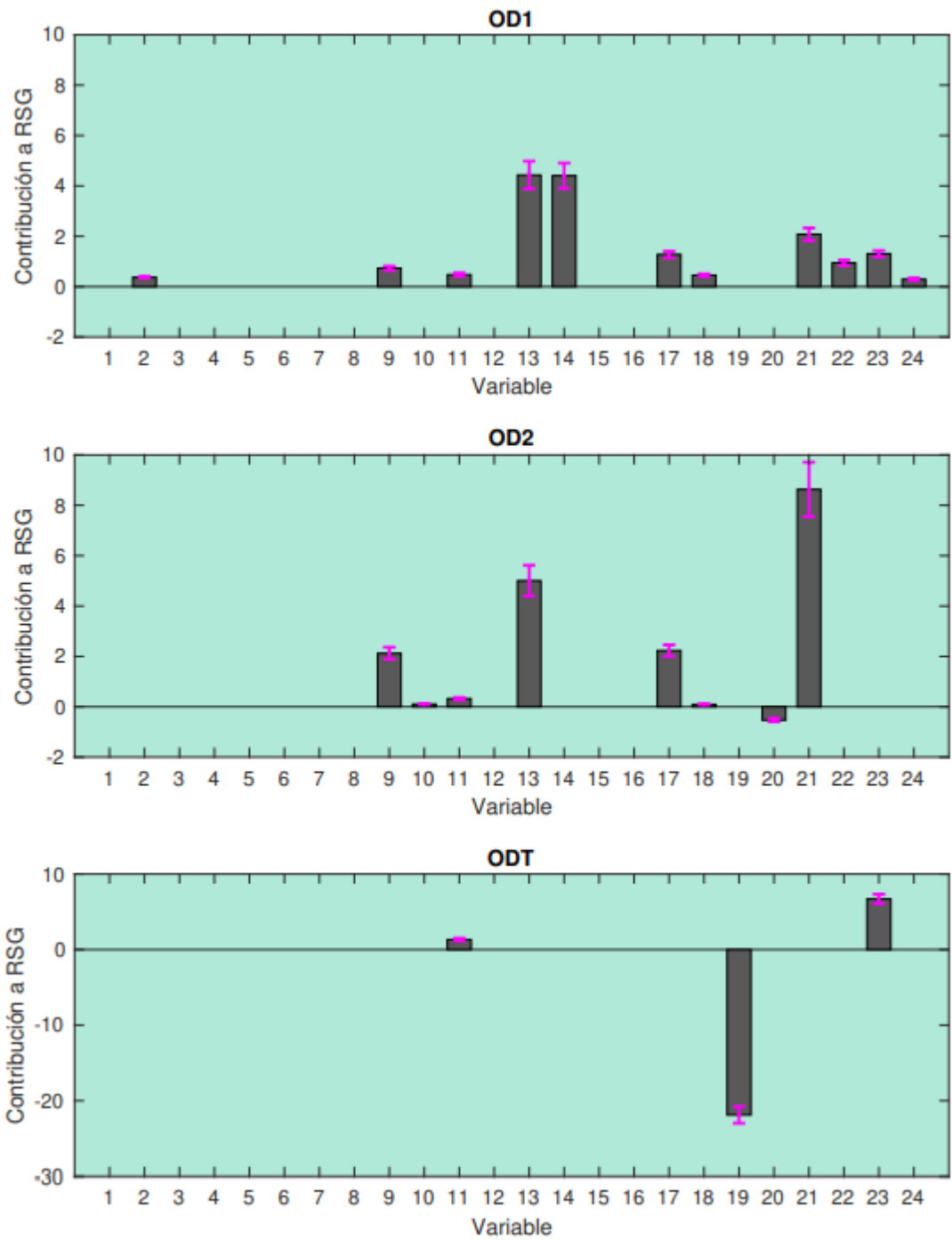


Figura 12: Contribución de cada variable de intervención a la respuesta sistémica global (RSG) generada por cada estrategia de intervención evaluada: OD1, OD2 y ODT. Las columnas muestran promedios sobre 1000 aleatorizaciones. Las barras de error muestran ± 1 desviación estándar.

Para construir una versión optimizada de las estrategias de intervención, se redujo la cantidad de variables de intervención a aproximadamente la mitad en cada escenario (de 11 a 6 para OD1 y de 8 a 4 para OD2), redistribuyendo el esfuerzo de intervención entre estas. Las variables seleccionadas para los escenarios optimizados fueron las que presentaron mayores contribuciones a la RSG (Fig. 12), y se detallan en el Cuadro 6.

#	Descripción de la variable	OD1	OD2
9	Volumen del mercado de materiales reciclables		✓
13	Nivel de competencias y calificaciones técnicas	✓	✓
14	Nivel de desarrollo de una cultura de construcción sustentable	✓	
17	Nivel de integración de la gobernanza	✓	✓
21	Volumen de incentivos de financiamiento	✓	✓
22	Nivel de participación pública	✓	
23	Solidez y consistencia de marco de referencia de la política climática	✓	

Cuadro 6: Variables de intervención del modelo SSEI en escenarios OD1 y OD2 optimizados.

Se calcularon las influencias totales de las estrategias optimizadas sobre las variables del SSEI (Fig. 13) y luego se calcularon las RSG con las estrategias optimizadas (Fig. 14).

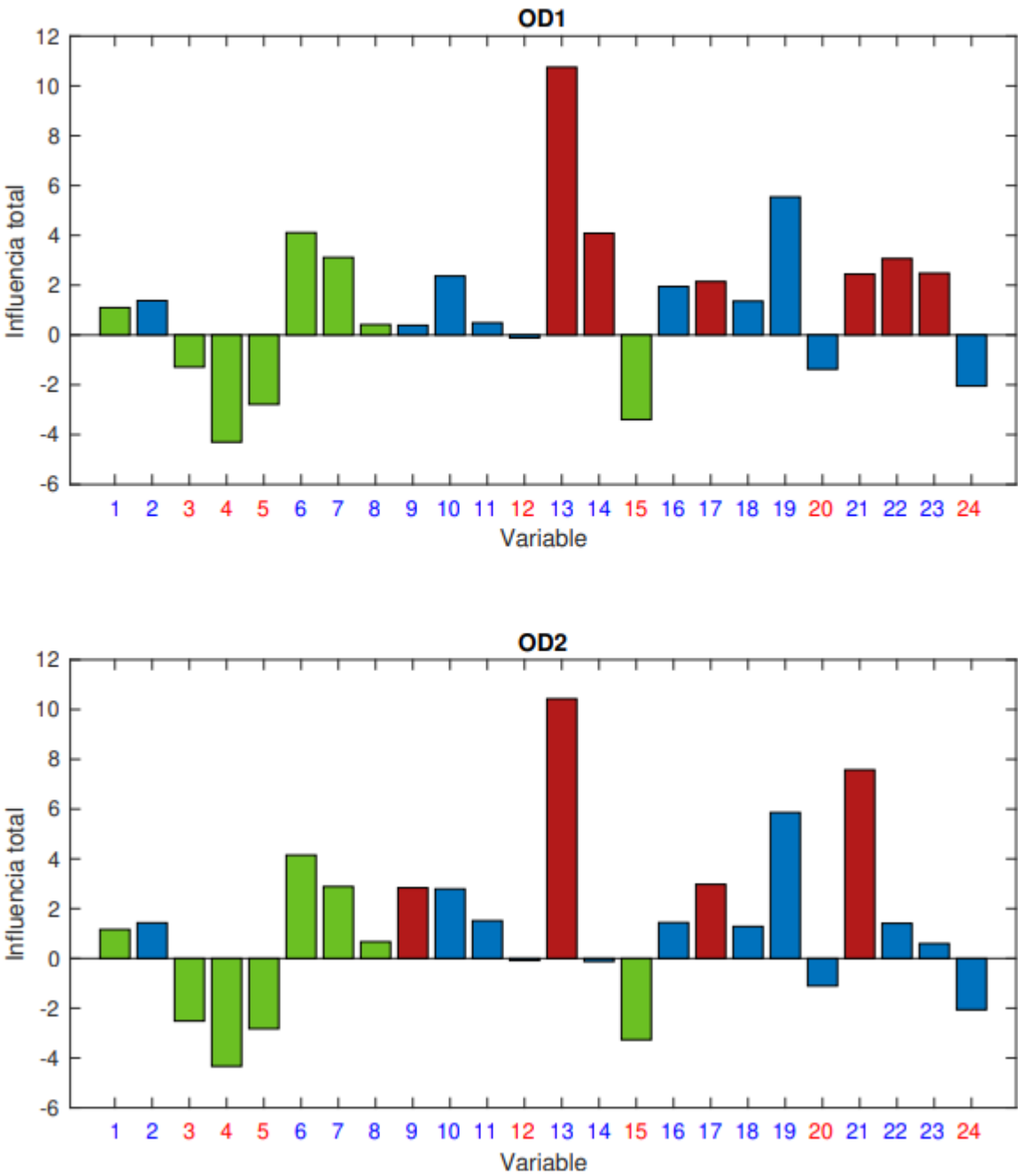


Figura 13: Influencias totales de las estrategias de intervención optimizadas OD1 (gráfico superior) y OD2 (gráfico inferior) calculadas sobre cada variable del SSEI. Columnas en rojo: variables intervenidas. Columnas en verde: variables objetivo. El color de las etiquetas del eje-x indican el valor normativo de las variables; azul: positivo; rojo: negativo. Promedios sobre 1000 aleatorizaciones.

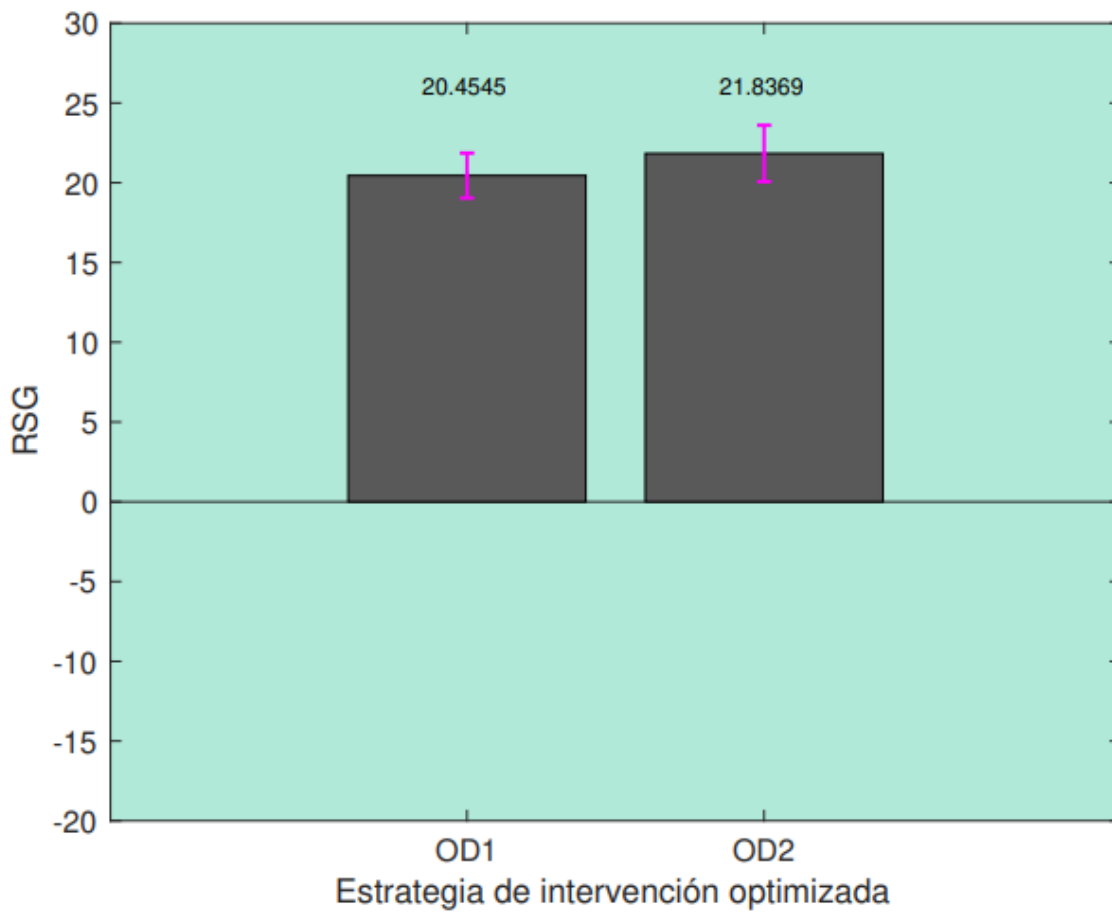


Figura 14: Respuesta sistémica global (RSG) generada por los escenarios de intervención OD1 y OD2 optimizados. Las columnas muestran promedios sobre 1000 aleatorizaciones. Las barras de error muestran ± 1 desviación estándar.

Puede verificarse en la Fig. 14 que con las estrategias OD1 y OD2 optimizadas, se logra no solo mantener sino incrementar la respuesta sistémica global (RSG) del SSEI (Fig. 14, comparar con Fig. 11). Los aumentos en la RSG promedio generados por la optimización de los escenarios fueron de 21,6 % para OD1 y de 21,4 % para OD2. Con las estrategias de intervención optimizadas, la OD2 se mantiene como la estrategia más eficaz para promover cambios favorables en las variables objetivo del SSEI.



Conclusiones

1. El sistema modelo SSEI está compuesto por 24 variables y 49 relaciones dirigidas con pesos entre las variables. Del total de relaciones, 18 corresponden a influencias negativas y 31 a influencias positivas.
2. En el sistema se definieron 8 variables objetivo en el SSEI.
3. La centralidad de grado de salida es la medida de centralidad topológica que mejor explica la importancia dinámica de las variables del SSEI, con un coeficiente de determinación (proporción de la varianza explicada) de 0.64.
4. La efectividad K es la medida de centralidad dinámica que mejor explica la importancia dinámica de las variables del SSEI, con un coeficiente de determinación (proporción de la varianza explicada) de 0.70.
5. Las variables identificadas como las de mayor importancia dinámica dentro del sistema, y por lo tanto las mejores candidatas a intervenir o sostener, son la 19 (Implementación de prácticas sustentables), seguida de la 14 (Nivel de desarrollo de una cultura de construcción sustentable), la 21 (Volumen de incentivos de financiamiento), la 17 (Nivel de integración de la gobernanza) y la 16 (Nivel de asentamiento de la política pública). Una intervención positiva (incremento crónico) sobre cualquiera de estas variables logra movilizar favorablemente al conjunto de variables objetivo.
6. Las estrategias de intervención OD1 y OD2 se muestran considerablemente más eficaces en promover cambios favorables en el SSEI, comparado con el escenario tendencial ODT.
7. La estrategia de intervención OD1 muestra una eficacia superior a la OD2.
8. Una optimización de las estrategias de intervención, consistente en reducir en un $\approx 50\%$ el número de variables intervenidas, genera un aumento de la respuesta sistémica global RSG de un 21,6 % y de un 21,4 % para OD1 y OD2, respectivamente.

Referencias

Ramos-Jiliberto, R. (2020). Deja a la estructura hablar: Modelización y análisis de sistemas naturales, sociales y socio- ecológicos. Ediciones Universidad Mayor.

