

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Optimización funcional del tejido ecológico intraurbano de la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez, México

iD Isaac Farías-Moreno

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
g2346004@colima.tecnm.mx; ORCID: 0009-0003-0307-3379

iD Alicia Cuevas-Muñiz

Facultad de Ciencias, Universidad de Colima, México,
alicia_cuevas@uocol.mx; ORCID: 0000-0003-2910-6282

iD Angélica Lizeth Jiménez-Hernández

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad de Colima,
México, ajimenez19@uocol.mx; ORCID: 0000-0002-3413-4803

iD María Silvia del Rocío Covarrubias-Ruesga

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
maria.covarrubias@colima.tecnm.mx;
ORCID: 0000-0001-9120-7098

iD Peter Chung-Alonso

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
peter.chung@colima.tecnm.mx; ORCID: 0000-0002-3724-1938

iD Jorge Armando Gutiérrez-Valencia

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
jorge.gutierrez@colima.tecnm.mx; ORCID: 0009-0005-5394-064X

Doi: 10.36677/qret.v27i2.26221

Resumen: Los procesos acelerados de urbanización derivan en el riesgo de fragmentación y pérdida ecosistémica en torno a las ciudades. La conectividad ecológica es una estrategia para la vinculación entre áreas de valor ecológico, que promueve el fortalecimiento y consolidación del ambiente a través de una red o tejido ecológico. Esta investigación se centra en el modelado y optimización del tejido ecológico intraurbano de la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, incorporando criterios para determinar su eficiencia estructural y funcional, así como para la ponderación de los beneficios socioambientales. Para definir las áreas de origen ecológico, se utilizaron datos relacionados con la cobertura y uso del suelo, así como técnicas para el análisis morfológico y funcional del paisaje. El tejido ecológico se calculó con la aplicación de un modelo gravitacional que identifica los vínculos espaciales más eficientes entre dos áreas de origen a través del territorio urbano, de acuerdo con el potencial de conectividad del suelo urbano. Los resultados indican que la infraestructura verde genera los vínculos más eficientes (>90%) y cortos para la integración de áreas de origen ecológico, beneficiando al 28.34% de la población.

Palabras clave: ecología urbana, análisis del paisaje, bosques urbanos, desarrollo sustentable.

Recepción: 23 de abril, 2025

Aceptación: 02 de junio, 2025



RESEARCH SCIENTIFIC ARTICLES



Functional optimization of the intra-urban ecological network of the Colima-Villa de Álvarez metropolitan area, Mexico



Isaac Farías-Moreno

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
g2346004@colima.tecnm.mx; ORCID: 0009-0003-0307-3379



Alicia Cuevas-Muñiz

Facultad de Ciencias, Universidad de Colima, México,
alicia_cuevas@uacol.mx; ORCID: 0000-0003-2910-6282



Angélica Lizeth Jiménez-Hernández

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad de Colima,
México, ajimenez19@uacol.mx; ORCID: 0000-0002-3413-4803



María Silvia del Rocío Covarrubias-Ruesga

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
maria.covarrubias@colima.tecnm.mx;
ORCID: 0000-0001-9120-7098



Peter Chung-Alonso

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
peter.chung@colima.tecnm.mx; ORCID: 0000-0002-3724-1938



Jorge Armando Gutiérrez-Valencia

Tecnológico Nacional de México, Colima, México,
jorge.gutierrez@colima.tecnm.mx; ORCID: 0009-0005-5394-064X

Doi: 10.36677/qret.v27i2.26221

Abstract: Accelerated urbanization processes significantly increase the risk of fragmentation and ecosystem loss around cities. Ecological connectivity serves as a powerful strategy for linking areas of ecological value, effectively promoting environmental strengthening and consolidation through an ecological network. This paper decisively focuses on modeling and optimizing the intra-urban ecological fabric of the Colima-Villa de Álvarez Conurbation Zone, incorporating criteria that evaluate both structural and functional efficiency, while also assessing socio-environmental benefits. To define the areas of ecological origin, data related to land cover and use were implemented, as well as techniques for morphological and functional landscape analysis. The ecological network was calculated by applying a gravity model that identifies the most efficient spatial links between two areas of origin across the urban territory, according to the connectivity potential of urban land. The results indicate that green infrastructure generates the most efficient (>90%) and shortest links for the integration of areas of ecological origin, benefiting 28.34% of the population.

Keywords: urban ecology, landscape analysis, urban forests, sustainable development.

Introducción

El crecimiento acelerado, fragmentado e irregular de los asentamientos humanos provoca cambios drásticos en la cobertura del suelo urbano y periurbano. Estas variaciones tienen impactos profundos en la integridad y seguridad de los ecosistemas (Liu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021), así como en la disponibilidad, calidad y acceso a áreas verdes urbanas (He *et al.*, 2023; Staccione *et al.*, 2022); a su vez, estas influyen positivamente en el bienestar psicofísico, la salud ambiental, la conservación de la biodiversidad y la resiliencia ante los fenómenos derivados del cambio climático (Jato-Espino *et al.*, 2023; Syamili *et al.*, 2023; Veerkamp *et al.*, 2021).

Una de las principales estrategias destinadas al fortalecimiento, restauración y consolidación ecosistémica consiste en la identificación de vínculos espaciales entre áreas con alto valor ecológico-ambiental o corredores verdes urbanos, con la función de garantizar el flujo biótico e interacción entre zonas (Jamil *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2024). La estructuración y complementariedad de los vínculos derivan en una “red” o tejido ecológico, cuya eficiencia define el estado de conservación y protección y funcionalidad de los hábitats dentro o fuera de las ciudades (He *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

El análisis de la conectividad ecológica se basa en la identificación del trayecto óptimo para la unión de dos áreas de origen ecológico-ambiental (Wanghe *et al.*, 2020), cuya parametrización considera la aptitud localizada para el desplazamiento e interacción biótica a través del espacio (Kong *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2024). En los entornos urbanos, los estudios de la conectividad se orientan a la integración de zonas naturales o seminaturales de significancia ecoambiental, por medio de la infraestructura verde y el espacio público para construcción y estabilidad del tejido ecológico intraurbano (Jiang *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2019)

Los estudios en torno a la conectividad ecológica poseen altos índices de consolidación en la identificación de áreas de origen ecológico (Huang *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2019) y sobre la definición de modelos geoespaciales para la extracción de los vínculos más viables o eficientes (He *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2023). Sin embargo, existe un nicho de investigación relacionado con la integración de la eficiencia integral del tejido ecológico in-

traurbano, en donde se incorporen los impactos y beneficios socioambientales promovidos por la proximidad de los corredores verdes urbanos generados.

El objetivo de esta investigación es modelar el tejido ecológico intraurbano de la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez (ZCCVA). Para alcanzarlo, se han incorporado criterios que identifican áreas de origen ecológico-ambiental y se proponen parámetros estadísticos que definen escenarios diferenciados para el cálculo y estructuración de dicho tejido. Adicionalmente, se plantea un método geoestadístico que integra indicadores socioambientales, cuyo análisis establece la jerarquía funcional de los vínculos generados, en función de los beneficios que aportan en sus inmediaciones espaciales. Como resultado, la optimización propuesta permite detectar y priorizar los corredores verdes urbanos esenciales para la articulación del tejido ecológico.

Metodología

Área de estudio

La Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez (ZCCVA) se localiza en el estado de Colima, México, donde residen 265 770 habitantes sobre una superficie de 7 013.47 ha (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020; 2023), siendo una de las 453 ciudades en el Sistema Urbano Nacional. Con un clima cálido subhúmedo, la ZCCVA alberga tres cauces fluviales relevantes: el río Colima y los arroyos Pereyra y El Manrique, con flujos norte-sur (figura 1).

Figura 1. Área de estudio

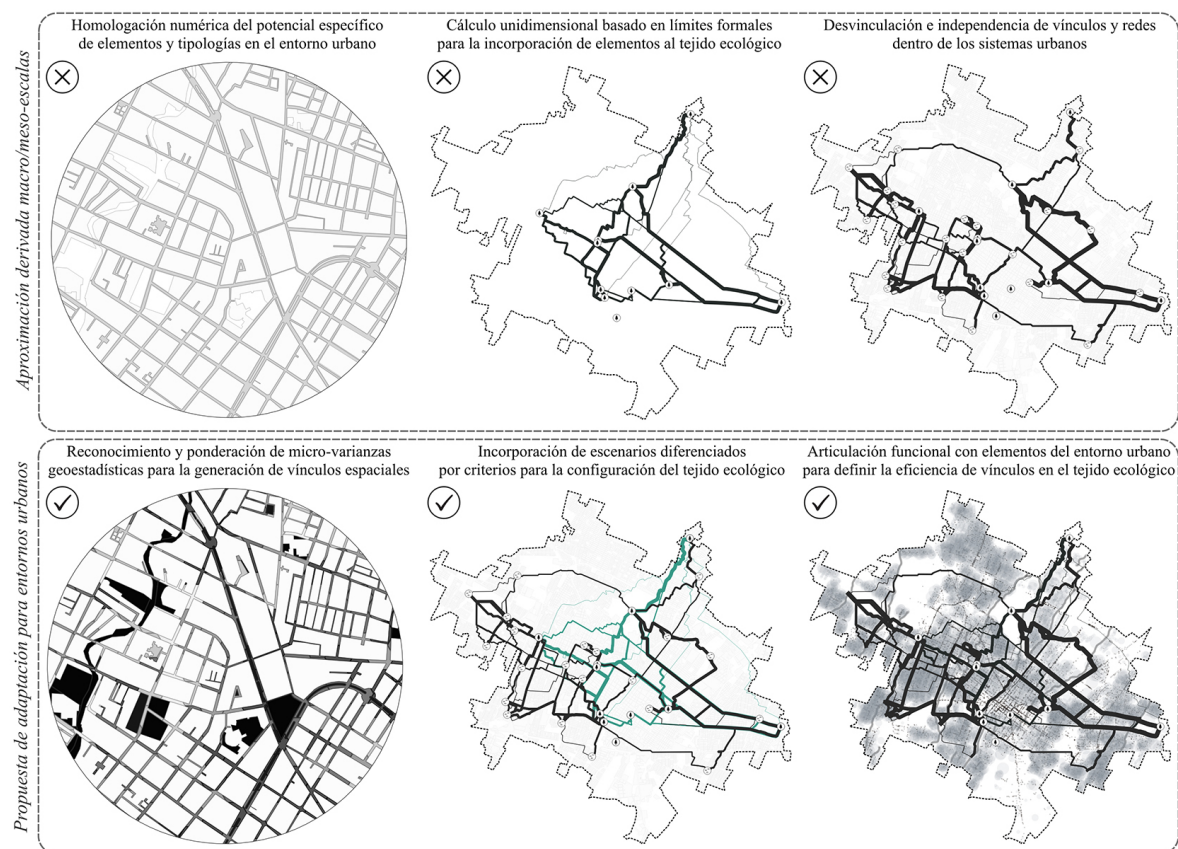


Fuente: Elaboración propia con base en datos vectoriales de INEGI (2023).

Modelado y optimización del tejido ecológico intraurbano

La construcción del tejido ecológico intraurbano desarrollada en la presente investigación parte del reconocimiento de las microvarianzas espaciales, definitorias de la aptitud y potencial para la conectividad e integración entre elementos y áreas de alto valor ecológico-ambiental al interior de la ZCCVA. Para ello, el desarrollo metodológico incorporó la ponderación de criterios y escenarios diferenciados para el cálculo del tejido ecológico, así como factores de ajuste para evaluar jerarquías funcionales entre los vínculos generados, de acuerdo con su articulación y beneficios sobre el entorno urbano (figura 2).

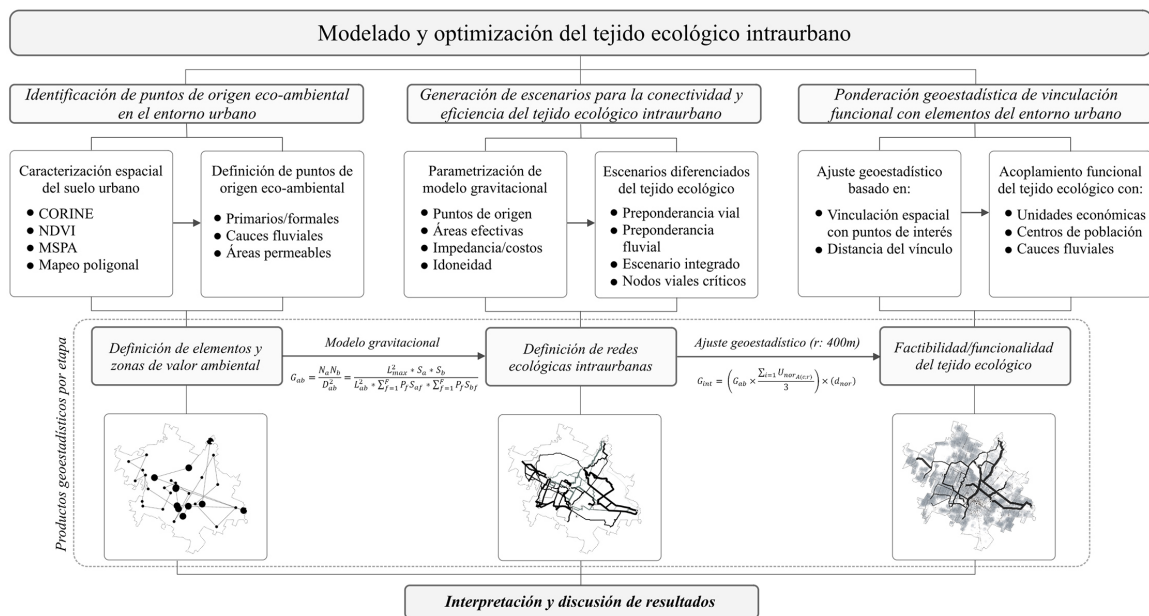
Figura 2. Principios y contribuciones metodológicas



Fuente: Elaboración propia.

La estructura de la investigación consideró tres etapas generales secuenciadas: 1) la identificación de áreas de alto valor ecológico-ambiental o de origen ecológico, derivados de la generación y procesamiento de datos relativos a la cobertura y uso del suelo urbano; 2) la construcción del tejido ecológico en escenarios diferenciados, a partir de la aplicación de un modelo gravitacional basado en la relación costo-eficiencia de cada vínculo y 3) el análisis de la articulación funcional y beneficios urbano-ambientales del tejido ecológico (figura 3).

Figura 3. Esquema metodológico



Fuente: Elaboración propia.

Identificación de puntos de origen ecológico-ambiental

Las áreas de origen ecológico representan nodos fundamentales para la articulación, integridad y seguridad ecosistémica (Huang *et al.*, 2021; Kirk *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024); tienen la función de dar soporte y conducto a procesos bióticos. Para su identificación, se utilizaron bases de datos relativas a la cobertura y uso del suelo (LULC) en la ZCCVA, considerando la categorización CORINE de Esri (2024), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de la European Space Agency (ESA, 2024) y un mapeo poligonal elaborado con base en el Marco Geoestadístico Nacional del INEGI (2023) (tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de cobertura; fuentes de datos

Tipo de datos	Descripción	Fuente
Clasificación de cobertura del suelo	Clasificación CORINE (ráster) de la cobertura y uso del suelo (LULC)	Esri (2024)
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada con resolución de 15 metros	ESA (2024)
Mapeo poligonal de cobertura del suelo	Clasificación manual del territorio urbano según categorías de cobertura y uso del suelo	Elaboración de los autores con base en MGN INEGI (2023)

Fuente: Elaboración propia.

El principio básico contemplado deriva del potencial localizado para la conectividad, de acuerdo con: a) la permeabilidad del suelo; b) la extensión y continuidad de los parches permeables; c) la protección y destino del suelo urbano. Los datos LULC posibilitaron la detección de áreas generales de aplicabilidad, en donde se clasificaron zonas de acuerdo con su uso público o privado como primer filtro. El segundo paso fue el cálculo del NDVI (ecuación 1).

Ecuación 1.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Dónde:

B4: Banda 4 Sentinel-2: Rojo.

B8: Banda 8 Sentinel-2: Infrarrojo cercano (NIR).

Para la detección de la aptitud del suelo urbano y la conectividad ecológica, se definió que los valores ≥ 0.16 del NDVI representan parches de valor ecológico-ambiental. Dichos píxeles ráster se utilizaron para el Análisis Espacial de Patrones Morfológicos (MSPA) (Soille y Vogt, 2008; Vogt *et al.*, 2022), para determinar la conectividad y significancia de las áreas por encima del umbral de arborización. Dicho proceso permitió definir un área mínima de cobertura

para seleccionar nodos significantes en la configuración del tejido ecológico (núcleos). Finalmente, se realizó un mapeo poligonal de la ZCCVA, de acuerdo con la cobertura, uso y protección de cada elemento urbano.

Parametrización de modelo gravitacional

El cálculo de las trayectorias más eficientes para la vinculación espacial del tejido ecológico intraurbano se derivó de la herramienta Gravity Model Toolbox en Arc-Map 10.8 (Wanghe *et al.*, 2020), tomando la base poligonal sobre la cobertura del suelo como datos de entrada (input). La definición del peso, impedancia y costo para la conectividad, se establecieron con base en dos escenarios, en donde se adaptaron los valores propuestos por Kong *et al.* (2010) y Wanghe *et al.*, (2020) al contexto urbano de la ZCCVA. El primer escenario otorga una preponderancia a la conectividad espacial por medio de la infraestructura verde urbana, principalmente en camellones arbolados, mientras que el segundo promueve la conectividad por medio de los cauces fluviales locales; asimismo, se definió un rango de valores (mínimos/máximos) ponderados por el NDVI promedio sobre cada polígono, considerando valores máximos y mínimos en cada clasificación (tabla 2).

Tabla 2. Parametrización de valores de cobertura según escenarios

Componente	Peso	Escenario 1		Escenario 2	
		Impedancia	Costo	Impedancia	Costo
Espacios públicos	0.66	1.00-10.00	47.20-73.60	1.00-10.00	47.20-73.60
Áreas residuales	0.40	0.20-0.50	68.00-84.00	0.20-0.500	68.00-84.00
Camellones	0.10	0.125-0.50	47.20-60.40	0.125-0.50	47.20-60.40
Cauces fluviales	0.10	1.00	99.00	0.10	20.00
Manzanas urbanas	0.14	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Vialidades	0.14	60.00-100.00	86.00-88.00	60.00-100.00	86.00-88.00

Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 definen el sustento estadístico aplicado por el modelo gravitacional, ajustadas por Wanghe *et al.* (2020) a partir del trabajo de Kong *et al.* (2010). Su aplicación en el área de estudio consideró una microescala para el procesamiento unitario básico, con una precisión de 2.5 metros [$1.4 \cdot 10^{-6}$ grados] para el cálculo y definición de vínculos en el tejido ecológico intraurbano. Con base en los datos [multipuntos] resultantes, se definieron segmentos vectoriales a mediante los cuales se evaluó la articulación funcional de cada escenario y componente.

Ecuación 2.1

$$G_{ab} = \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} = \frac{L_{max}^2 * S_a * S_b}{L_{ab}^2 * \sum_{f=1}^F P_f S_{af} * \sum_{f=1}^F P_f S_{bf}}$$

Ecuación 2.2

$$N_a = \frac{S_a}{\sum_{f=1}^F P_f * S_{af}}$$

Ecuación 2.3

$$D_{ab} = \frac{L_{ab}}{L_{max}}$$

Dónde:

- G_{ab} = Interacción entre los nodos a-b
- (a,b) = Nodos a y b (origen ecológico-ambiental)
- $N_{a/b}$ = Peso adscrito al nodo a o b
- $S_{a/b}$ = Área adscrita al nodo a o b
- $P_{af/bf}$ = Impedancia/resistencia del nodo a o b
- L_{ab} = Impedancia acumulada entre los nodos a-b

De manera complementaria, se utilizaron datos resultantes de la impedancia del suelo urbano, para la conectividad en relación con el análisis de la concentración espacial de los trayectos más eficientes (McRae *et al.*, 2008) Se consideró el parámetro de corriente acumulada obtenido en Circuitscape (McRae *et al.*, 2016), con el propósito de la definición de la preponderancia y jerarquía de tramos/nodos viales que resulten críticos en la conectividad.

Vinculación funcional del tejido ecológico

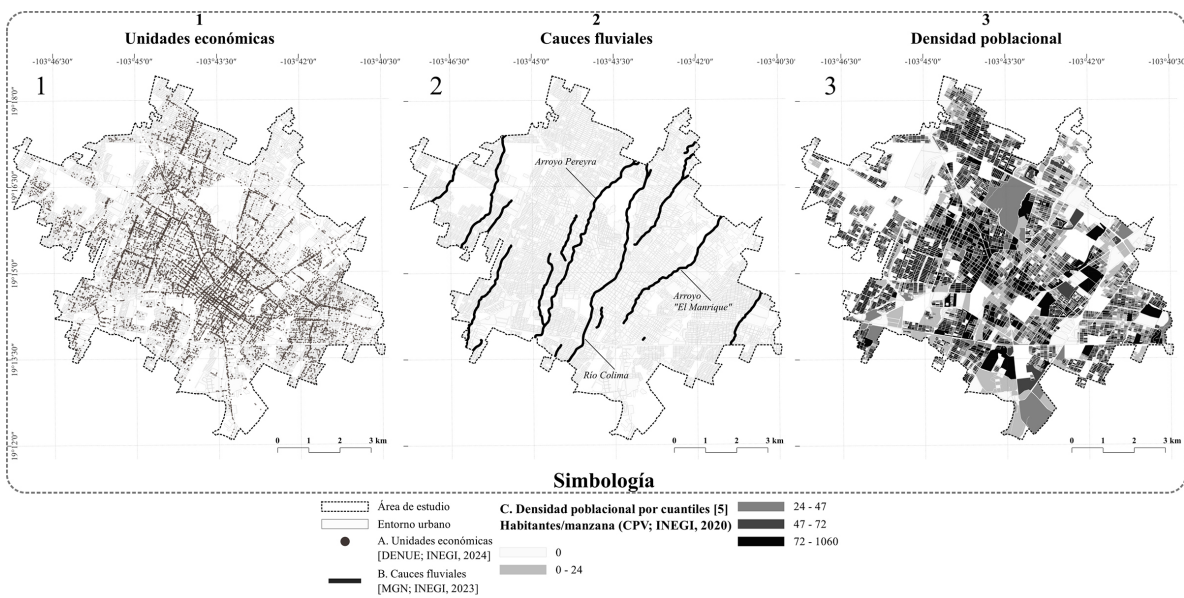
La definición de los vínculos con mayor articulación funcional en el entorno urbano se definió por medio de la ponderación y ajuste geoestadístico de acuerdo con los servicios/beneficios brindados por el tejido ecológico, considerando indicadores de la población beneficiada, su conectividad comercial e incidencia sobre el fortalecimiento de la red fluvial local (tabla 3 y figura 4).

Tabla 3. Vinculación funcional del tejido ecológico; fuentes de datos

Tipo de datos		Descripción	Fuente
1	Densidad poblacional	Población total por manzana urbana	Censo de Población y Vivienda INEGI (2020)
2	Conectividad comercial	Unidades económicas en el entorno urbano	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) INEGI (2024)
3	Conectividad fluvial	Centro geométrico (vectores) de cauces fluviales locales	Marco Geoestadístico Nacional (MGN) INEGI (2023)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Distribución de indicadores socioambientales



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020; 2023; 2024)

Su cálculo se derivó del desempeño diferenciado de los vínculos que configuran el tejido ecológico en cada escenario, en donde se consideró un área de influencia efectiva de 400 metros para el procesamiento geoestadístico de los indicadores contemplados, mismo que se define por las ecuaciones 3.1 y 3.2.

Ecuación 3.1

$$AF_{soc_i} = \sum_{U \in A(V;R)_i} UG_{Pol}(Pob)$$

Ecuación 3.2

$$AF_{eco,amb_i} = \sum_{U \in A(V;R)_i} UG_{Pun}$$

Dónde:

AF_{soc,eco,amb_i} = Articulación funcional (social/económica/ambiental) del vínculo i.

$UG_{Pol}(Pob)$ = Población total en la Unidad Geoestadística poligonal (manzanas).

UG_{Pun} = Unidades Geoestadísticas puntuales (Unidades económicas, puntos a lo largo de cauces fluviales)

$U \in A(V; R)_i$ = Unidades Geoestadísticas U dentro del área A definida por un vector V y un radio R del vínculo i.

Los valores resultantes fueron normalizados (0-1) para la integración geoestadística de la articulación funcional de cada vínculo, tomando los datos del modelo gravitacional, incorporando un ajuste ponderado por la distancia. Esto posibilitó la identificación de la estructura jerárquica del tejido ecológico en la ZCCVA; se define por las ecuaciones 4.1 y 4.2.

Ecuación 4.1

$$AF_{int_i} = \frac{AF_{soc_i}^{norm} + AF_{eco_i}^{norm} + AF_{amb_i}^{norm}}{3}$$

Ecuación 4.2

$$G_{ab}(int)_i = \left(G_{ab_i} \times AF_{int_i} \right) \times d_i^{norm}$$

Dónde:

$AF_{soc,eco,amb_i}^{norm}$ = Valores normalizados de la articulación funcional (social/económica/ambiental) del vínculo i.

G_{ab} = Interacción entre los nodos a-b

$G_{ab}(int)_i$ = Interacción integral entre los nodos a-b

Resultados

Estructura espacial del tejido ecológico

La tabla 4 detalla los puntos de origen ecológico-ambiental identificados en la ZCCVA, resultado del análisis del uso y cobertura del suelo, junto con la aplicación del MSPA basada en el NDVI (figura 5 y tabla 5). Para la definición de escenarios, el criterio principal fue el uso público del suelo urbano y la protección institucional de las áreas, según su estatus —zonas arqueológicas, parques ecológicos, cauces fluviales—, factores que determinan su vinculación y viabilidad como nodos del tejido ecológico. Se encontró que solo el 4.69 % del área de estudio (7 019.49 ha) es apta como zona de origen, destacando “La Campana” (112.85 ha) como la mayor reserva ecológica.

Tabla 4. Puntos de origen ecológico-ambiental

Nombre	Puntos de origen	Área		Tipo de protección
	(#)	(ha)	(%)*	
Parque Arqueológico La Campana	1	112.85	34.08 %	Federal
Zona Arqueológica El Chanal	1	3.60	1.09 %	Federal
Parque Regional Metropolitano Griselda Álvarez	2	21.39	6.46 %	Estatad
Parque Huertas del Cura Arzac	2	1.31	0.40 %	Municipal
Parque El Rodeo	1	12.16	3.67 %	Estatad
Parque Ecológico El Topocharco	1	1.33	0.40 %	Municipal
Ex Zona Militar del municipio de Colima	1	14.90	4.50 %	Estatad
Parque Hidalgo	1	5.60	1.69 %	Municipal

Nombre	Puntos de origen	Área		Tipo de protección
	(#)	(ha)	(%)*	
Jardín Núñez	1	1.99	0.60 %	Estatat
Arroyo Pereyra	3	25.61	7.73 %	Federal
Río Colima	5	44.90	13.56 %	Federal
Arroyo El Manrique	2	29.32	8.86 %	Federal
Cauces fluviales secundarios	11	56.17	16.96 %	Federal

*Nota: Porcentaje del total de áreas con valor ecológico-ambiental en la ZCCVA (297.67ha).

Fuente: Elaboración propia.

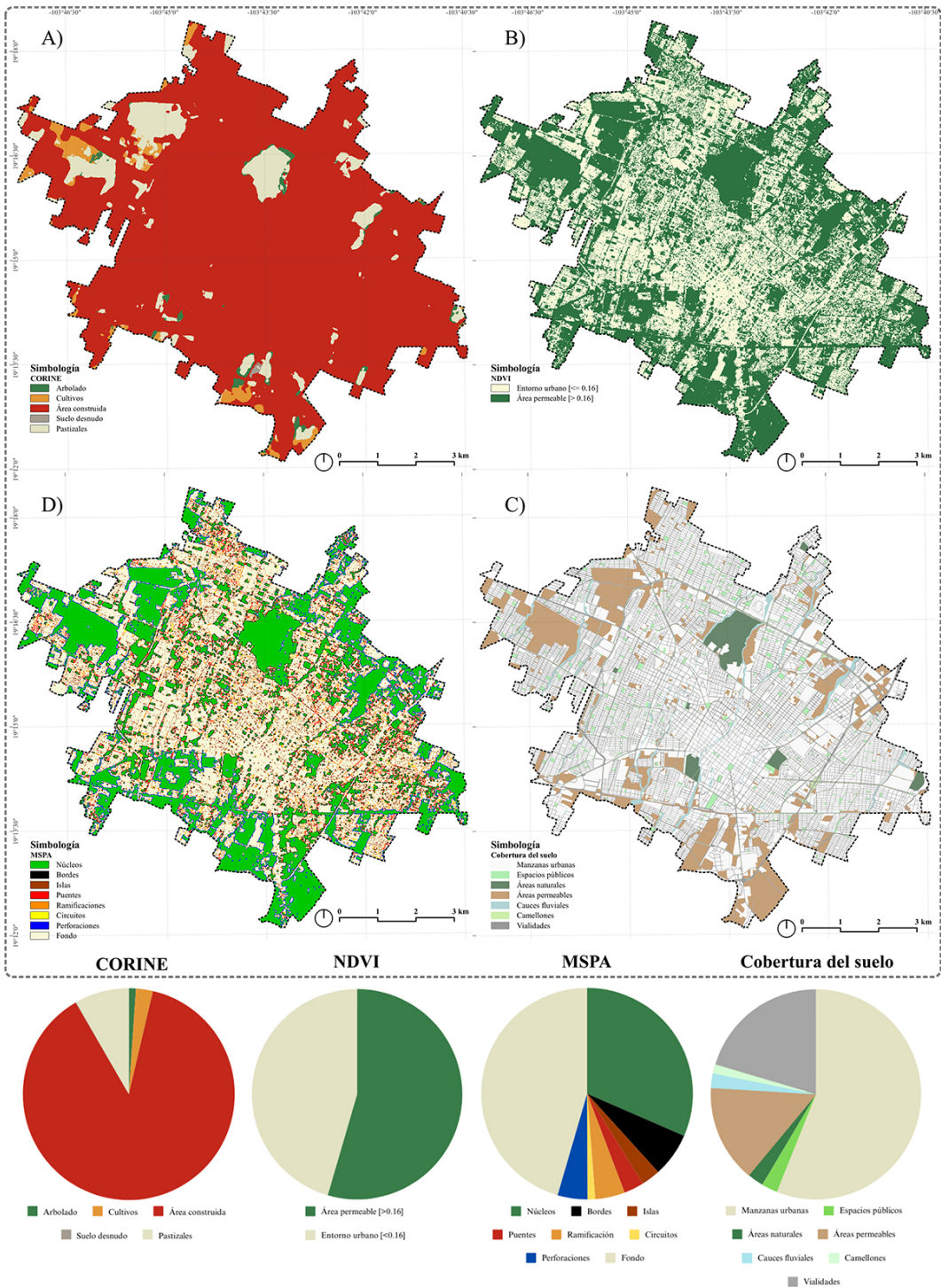
Tabla 5. Síntesis estadística: cobertura del suelo urbano según fuentes

Fuente	Clasificación	Unidades*	Cobertura	
		(#)	(ha)	(% AE)
Clasificación CORINE de la cobertura del suelo	Arbolado	7 620	76.2	1.08 %
	Cultivos	18 179	181.79	2.58 %
	Área construida	620 169	6 201.69	87.98 %
	Suelo desnudo	568	5.68	0.08 %
	Pastizales	58 383	583.83	8.28 %
NDVI (Sentinel-2)	Área permeable [>0.16]	384 256	3 842.56	54.51 %
	Entorno urbano [<0.16]	320 663	3 206.63	45.49 %
MSPA	Núcleos	222 279	2 222.79	31.53 %
	Bordes	47 581	475.81	6.75 %
	Islas	20 463	204.63	2.90 %
	Puentes	21 453	214.53	3.04 %
	Ramificación	31 988	319.88	4.54 %
	Circuitos	8 286	82.86	1.18 %
	Perforaciones	32 206	322.06	4.57 %
	Fondo	320 663	3 206.63	45.49 %

Fuente	Clasificación	Unidades*	Cobertura	
		(#)	(ha)	(% AE)
Mapeo poligonal de la cobertura del suelo	Manzanas urbanas	6 699	3 951.65	56.06 %
	Espacios públicos	451	174.826	2.48 %
	Áreas naturales	11	175.13	2.48 %
	Áreas permeables	389	1 054.1654	14.95 %
	Cauces fluviales	135	156.003	2.21 %
	Camellones	1 220	97.9856	1.39 %
	Vialidades	7 622	1 439.43	20.42 %

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Coberturas y usos del suelo urbano

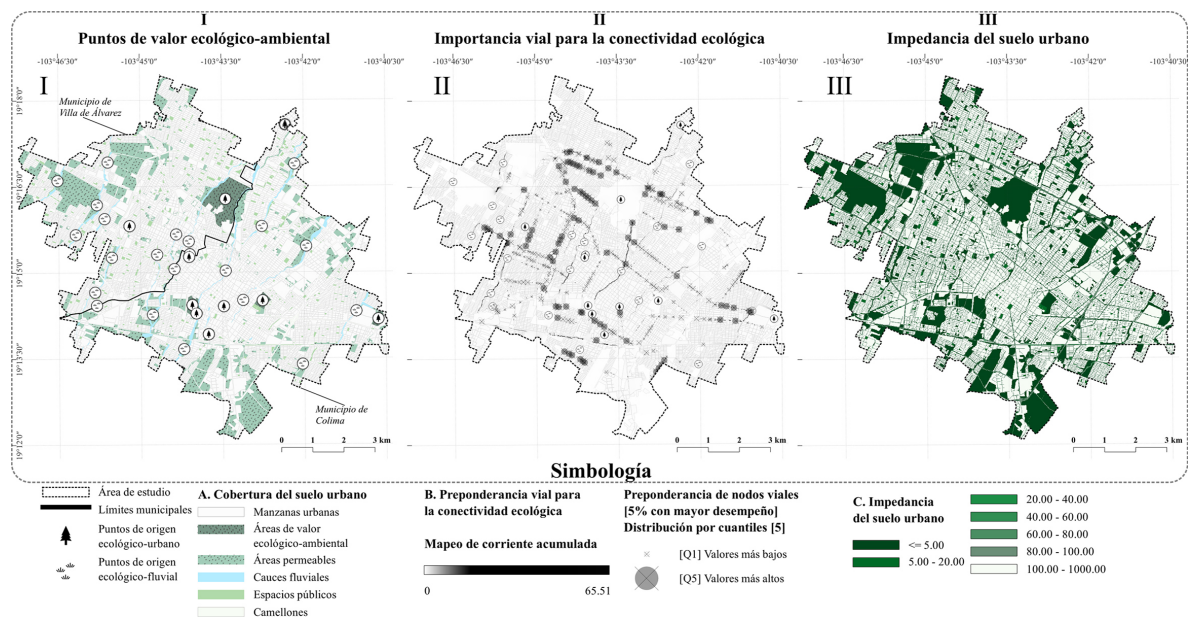


Fuente: Elaboración propia con base en datos de Esri (2024), ESA (2024) e INEGI (2023).

A pesar de la variabilidad en los índices de permeabilidad del suelo, que oscilan entre el 12.02 % (CORINE), el 54.51 % (NDVI), el 31.51 % (MSPA) y el 23.52 % (mapeo poligonal), la fragmentación de los parches arborizados en el área de estudio señala un aislamiento espacial y funcional del tejido ecológico en la ZCCVA. Además, se detecta un potencial de conectividad del 7.58 % en la morfología (534.41 ha, correspondiente a puentes y ramificaciones según el MSPA) y del 3.87 % en la infraestructura verde de la ZCCVA (272.81 ha, incluyendo espacios públicos y camellones arbolados). Estas áreas funcionan, parcial o totalmente, como vínculos espaciales o corredores verdes dentro del tejido ecológico.

La figura 6 muestra la ubicación de los puntos de origen ecológico, distinguiéndolos por su carácter urbano o fluvial. A partir del análisis de la impedancia del suelo urbano para la conectividad ecológica, basado en los valores de la tabla 2, se identificaron los tramos viales y camellones arbolados en la ZCCVA, que son críticos para determinar la articulación espacial y la jerarquía de la infraestructura vial y los corredores verdes. Este análisis incluyó una muestra del 5.75 % de los polígonos (439 de los 7 622 tramos) con la mayor corriente acumulada.

Figura 6. Parámetros para el modelado de la conectividad ecológica intraurbana



Fuente: Elaboración propia.

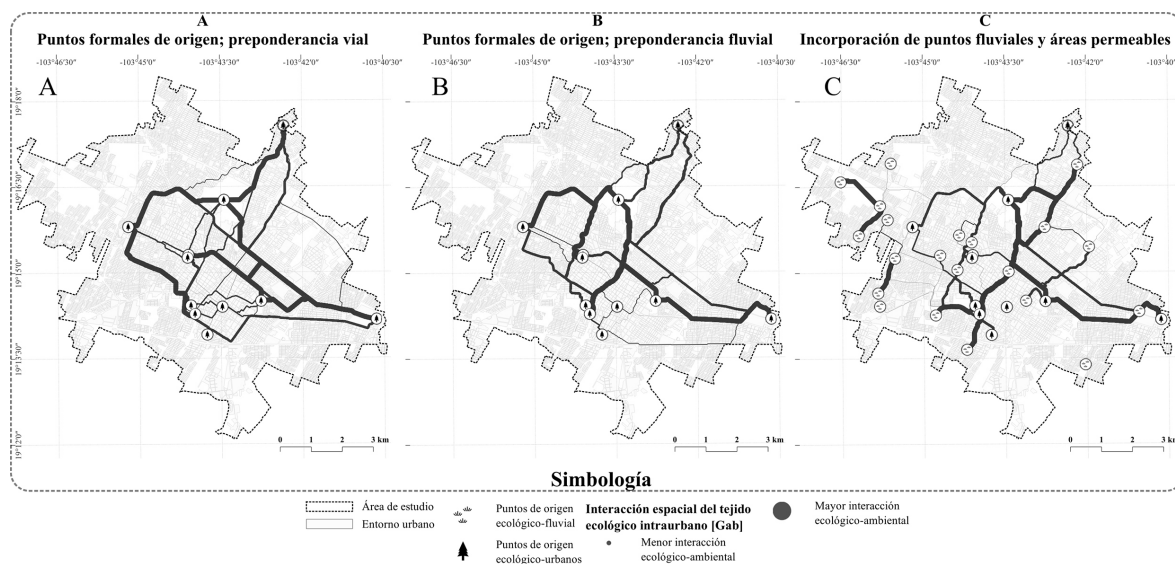
Integración funcional del tejido ecológico

La interacción espacial entre dos puntos de origen ecológico (G_{ab}), derivada del modelo gravitacional, se calculó en tres escenarios:

- Puntos formales, con preponderancia vial en la parametrización inicial.
- Puntos formales, con preponderancia fluvial.
- Incorporación de cauces fluviales y áreas permeables como áreas de origen.

Los resultados del modelo, basados en su desempeño sistémico, se ilustran en la figura 7. En esta, se observa una varianza significativa en el trazo de los corredores generados. Específicamente, el escenario A se estructura a partir de los camellones arbolados, mientras que los escenarios B y C toman el río Colima como eje rector para la vinculación espacial.

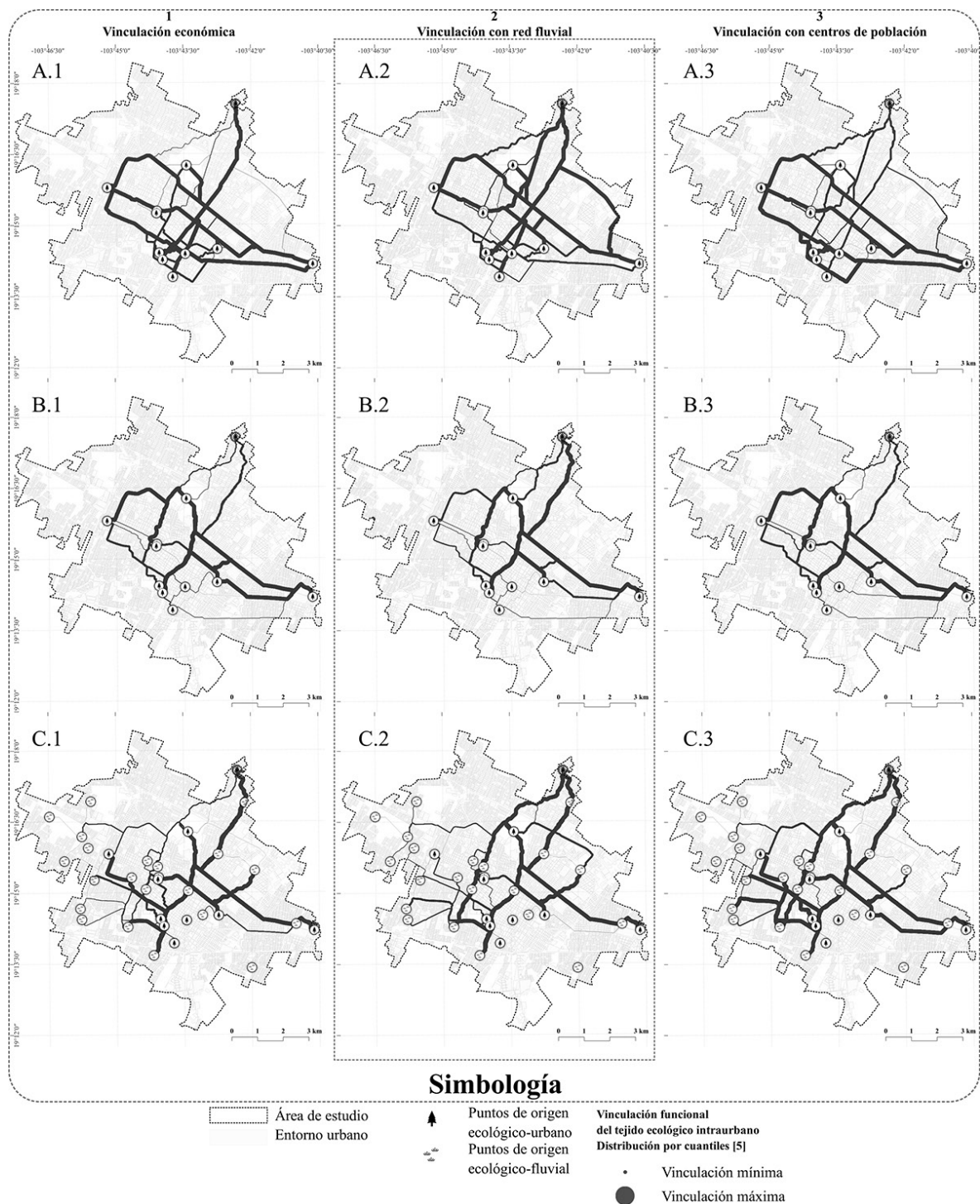
Figura 7. Resultados del modelo gravitacional



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Gravity Model Toolbox (Wanghe *et al.* 2020).

La vinculación funcional de los nexos en cada escenario, calculada mediante las ecuaciones 3.1 y 3.2, se ilustra en la figura 8. Se observa una tendencia de centralización espacial en los indicadores socioeconómicos (1 y 3), asociada a los mayores índices de consolidación en el núcleo urbano en comparación con las periferias. En cuanto a la vinculación de los vínculos con la red fluvial, se destaca la preponderancia del Río Colima y el Arroyo Pereyra como nexos efectivos entre las zonas norte y sur de la ZCCVA. Además, se registra un aislamiento funcional de los sectores sur y poniente.

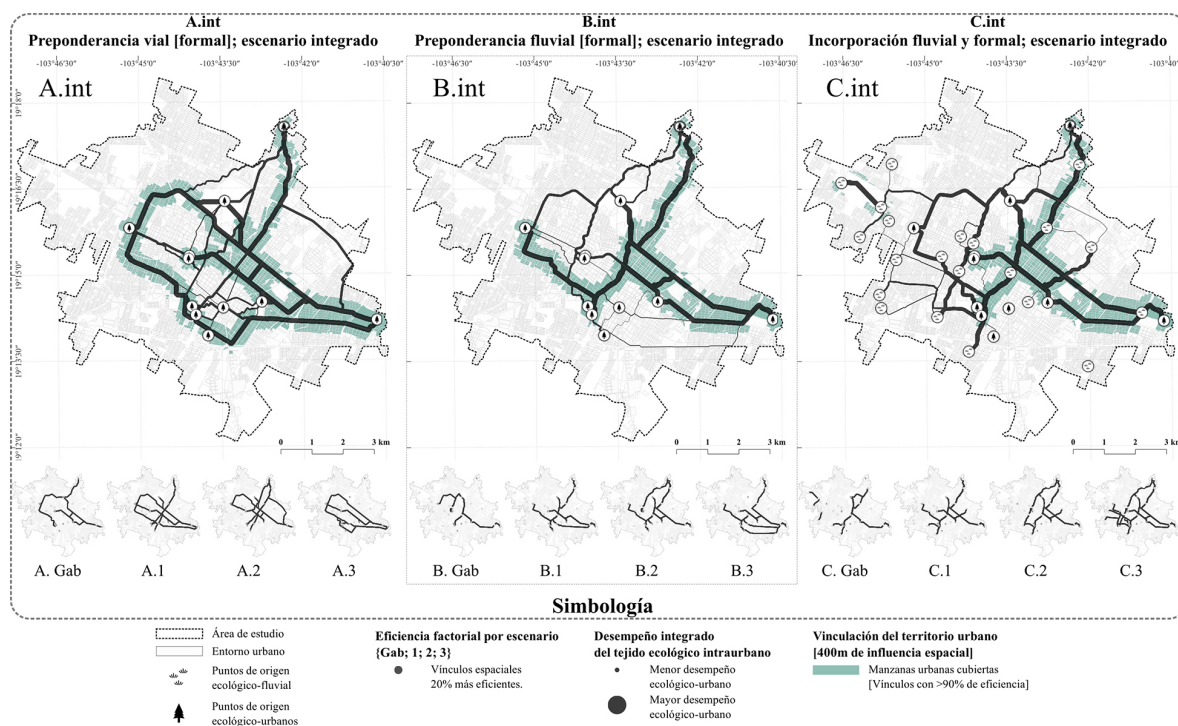
Figura 8. Vinculación funcional del tejido ecológico según escenarios



Fuente: Elaboración propia

La ponderación integrada del tejido ecológico, calculada mediante las ecuaciones 4.1 y 4.2, se ilustra en la figura 9, detallando el desempeño de los extremos estadísticos (<10%, >90%) en la tabla 6. Los datos demuestran una varianza significativa en la cobertura territorial de los vínculos con mayor desempeño, así como en la estructura y geometría de sus componentes (G_{ab} e indicadores 1-3). Los vínculos más eficientes del escenario A presentan una mayor articulación socioeconómica, con un incremento del 36.90 % en la población cubierta, en vínculos 54.39 % más cortos, mientras que los escenarios B y C incorporan una longitud 48.33 % mayor de red fluvial local.

Figura 9. Escenarios integrados: vinculación funcional del tejido ecológico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Comparativa estadística: desempeño funcional de corredores ecológicos

Escenario	G_{ab} (Int) (#)	Unidades económicas (#)	Población (habitantes)	Cauces fluviales (km)	Longitud (km)
A	Máx. >90 %	286.59	2 168.67	29 884.70	3.02
	Min. <10 %	0.04	1 512.00	6 755.17	1.28
B	Máx. >90 %	240.36	2 088.67	18 858.50	6.25
	Min. <10 %	0.02	1 567.33	7 483.17	1.58
C	Máx. >90 %	451.42	2 137.70	20 059.70	6.14
	Min. <10 %	0.66	381.70	7 247.30	1.80

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del 10 % más eficiente de la influencia territorial-urbana, según cada escenario, se detalla en la tabla 7. En esta tabla, el escenario A destaca como el más eficiente en términos de población beneficiada, mostrando un incremento del 25.12 % (19 905 habitantes) al 35.43 % (28 077 habitantes) en comparación con los escenarios B y C. Además, se observa una mayor extensión territorial en el escenario A, con diferencias del 24.99 % (300.11 ha) al 29.80 % (357.85 ha) en la misma comparación. Estas condiciones evidencian una clara diferenciación en la consolidación del tejido ecológico intraurbano: corredores verdes en el escenario A y recuperación de cauces fluviales en los escenarios B y C.

Tabla 7. Cobertura poblacional y territorial de vínculos con mayor desempeño

Escenario		Cobertura poblacional		Cobertura territorial	
		(habitantes)	(% área de estudio)	(ha)	(% área de estudio)
A	Valores máximos (>90%)	79 229	29.81 %	1 200.72	17.12 %
B		59 324	22.32 %	900.601	12.84 %
C		51 152	19.24 %	842.864	12.02 %

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Importancia del análisis y consolidación del tejido ecológico intraurbano

Esta investigación abordó la construcción de escenarios para la conectividad y eficiencia del tejido ecológico en la ZCCVA, considerando criterios y parámetros para su optimización estructural a microescala, así como para ponderar los beneficios socioambientales y su cobertura territorial-urbana. La metodología propuesta contribuye al reconocimiento de la función integral de los servicios ecosistémicos derivados de la consolidación, el fortalecimiento o la preservación de los vínculos que configuran el tejido ecológico intraurbano. Por lo tanto, resulta de gran utilidad y aplicación para la gestión de los recursos ambientales, así como para la definición de criterios en la planificación de subsistemas de infraestructura verde.

La identificación de zonas de origen para la generación de escenarios diferenciados, mediante el uso de datos del NDVI y la aplicación del MSPA, son técnicas ampliamente utilizadas en los estudios de conectividad ecológica (Jiang *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024). No obstante, para garantizar la precisión del modelo en sistemas urbanos, resulta necesario incorporar criterios de cobertura y uso del suelo (LULC) (He *et al.*, 2023; Jamil *et al.*, 2024; Wanghe *et al.*, 2020). Consecuentemente, el presente estudio consideró micro-varianzas espaciales (≤ 3 metros) para el mapeo poligonal requerido por el modelo gravitacional (figura 2), mismo que permitió un alto grado de precisión y fiabilidad en el cálculo de cada uno de los vínculos en los escenarios contemplados.

El reconocimiento de los elementos urbanos que estructuran el tejido ecológico, a través de corredores verdes urbanos (como camellones arbolados y espacios públicos), es de especial importancia para mitigar el aislamiento y fragmentación del paisaje ecológico urbano y sus áreas de origen o conservación ambiental (Huang *et al.*, 2021; Jamil *et al.*, 2024). Por lo tanto, es indispensable garantizar su continuidad y eficiencia a través del territorio urbano, con la finalidad de optimizar la integración de zonas y sectores. Esto contrasta con lo registrado en la ZCCVA (figura 9.C), donde se observa una desvinculación derivada de la deficiencia estructural/espacial de la infraestructura verde en patrones de urbanización con alta densidad y carácter periférico; ello, denota una desigualdad distributiva de los servicios ecosistémicos a través del territorio urbano.

La literatura del análisis del paisaje y la ecología urbana ha registrado esta inequidad en la distribución, acceso y calidad de las áreas verdes de significancia ecológico-ambiental. Principalmente, esto es atribuible a particularidades de la geografía humana, donde las ciudades, en sus diversas escalas, se disponen y

adaptan al territorio en una diversidad de patrones y relaciones con respecto al suelo de conservación o protección ambiental.

Los trabajos de Hu *et al.* (2022), Huang *et al.* (2021), Shi *et al.* (2021) y Wanghe *et al.* (2020) coinciden en la preponderancia jerárquica de los cauces fluviales en la configuración ecológica del paisaje, así como en su fragmentación derivada de la producción intensiva del suelo urbano. En el caso de la ZCCVA, se observa una centralización en las áreas de origen ecológico, así como una marcada asimetría en la presencia y continuidad del sistema fluvial local, con mayor cobertura en el Municipio de Colima (figuras 4.1 y 5). Esto indica la necesidad de acciones compensatorias para el ordenamiento ecológico del territorio, enfocadas en la generación de áreas de reserva y conservación como recursos clave para la sustentabilidad en la planeación y el desarrollo urbano a mediano y largo plazo.

La definición formal de la estructura espacial de subsistemas ecológicos y del paisaje natural permitió demostrar la relevancia de la red fluvial, principalmente del río Colima y el arroyo Pereyra, como los elementos naturales con mayor jerarquía y centralidad en el territorio urbano. Dentro de los estudios de la ecología del paisaje, los cauces fluviales son preponderantes en estrategias para la protección y restauración de la biodiversidad, así como en la provisión de servicios ecosistémicos y el sostenimiento de los asentamientos humanos (Jiang *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024; Staccione *et al.*, 2022). Pese a ello, en la ZCCVA se observan altos índices de fragmentación, aunados a la discontinuidad y la reducción en las dimensiones de sus cauces fluviales; lo cual, torna necesario plantear la importancia de estrategias para la recuperación, saneamiento y renaturalización de los ecosistemas riparios urbanos para fortalecer la salubridad medioambiental, promover la biodiversidad y mejorar los servicios ecosistémicos asociados a las redes fluviales (Kirk *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2021).

Asimismo, la investigación destaca la relevancia de articular y complementar las reservas ecológicas del paisaje urbano respecto a dos subsistemas de origen antrópico: el conjunto de espacios públicos y la infraestructura verde vial. Si bien, las características inherentes al origen, las dimensiones y la función de dichos subsistemas imposibilitan la consideración de sus componentes como áreas de origen ecológico, su disposición continua e integrada a través del territorio urbano posibilita el fortalecimiento de la estructura y funcionalidad del tejido ecológico. En ese sentido, la optimización de los subsistemas que dan sostenimiento y conducción a los flujos naturales y humanos establece parámetros para el ordenamiento y gestión sustentable del paisaje urbano, así como la profundización de la relación humano-naturaleza en las ciudades (He *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2021; Jato-Espino *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2024; Veerkamp *et al.*, 2021).

Las implicaciones sobre las prácticas de planificación urbana e implementación de políticas públicas asociadas a gestionar los recursos ecológicos en contacto con los asentamientos humanos, poseen dos directrices relacionadas con el método desarrollado y resultados descritos. Primeramente, el pleno reconocimiento de la interdependencia entre sistemas ecológicos para la salubridad y seguridad medioambiental, y su vinculación efectiva con la estructura socioeconómica de las ciudades (Jiang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024). Por otro lado, la incorporación efectiva de parámetros para garantizar la equidad social del acceso y contacto con espacios verdes urbanos, con el objetivo de mejorar el bienestar psicofísico de sus poblaciones (He *et al.*, 2023; Syamili *et al.*, 2023).

Conclusiones

Esta investigación, aplicada en la Zona Conurbada Colima-Villa de Álvarez, se centró en optimizar el modelado del tejido ecológico intraurbano. Para lograr su integración efectiva en el entorno urbano, se incorporaron criterios que ponderan indicadores socioeconómicos y ambientales, definiendo su articulación funcional con base en su cobertura y beneficios diferenciados. Los resultados indican altos índices de fragmentación en el paisaje urbano, lo que deriva en tres escenarios para la conectividad ecológica. En estos escenarios, se identificó que la infraestructura verde vial son los conductos más eficientes para generar vínculos espaciales entre áreas de origen ecológico-ambiental.

La metodología desarrollada y sus resultados son significativos para la identificación e inventariado de los recursos ambientales críticos en la articulación del tejido ecológico intraurbano. A partir de ello, se generan pautas para la elaboración de políticas públicas, planes y programas destinados a la estructuración, el fortalecimiento y la protección de los componentes que configuran el sistema ecológico dentro de las ciudades. Similarmente, se destaca la importancia de garantizar la continuidad y conectividad espacial de los elementos que vinculan las áreas de valor ecológico a través del territorio urbano, cuya efectividad requiere la coordinación y complementariedad interadministrativa para la generación de estrategias sustentables en la gestión de los recursos naturales en torno a los asentamientos humanos de cualquier localización, escala y grado de integración funcional (conurbaciones, zonas metropolitanas, etcétera).

Lo anterior, de especial interés en la gobernanza ambiental para el ordenamiento territorial, dentro del marco de acciones destinadas a la protección de la biodiversidad, la mitigación de los riesgos frente al cambio climático y la reducción de las desigualdades en el acceso a las áreas verdes públicas en las ciudades.

Esto, mediante la elaboración de planes de manejo destinados a la designación, protección y eficiencia de reservas territoriales para estabilizar la integralidad ecosistémica del paisaje urbano, así como para definir acciones enfocadas a mitigar o revertir la fragmentación de elementos cruciales para la conectividad ecológica, principalmente cauces fluviales y sus riberas protegidas; asimismo, mediante la definición de sectores, trayectos o tramos prioritarios orientadas a la implementación de soluciones basadas en la naturaleza para el mejoramiento funcional del entorno natural y transformado.

Entre las limitaciones del estudio, que pueden servir como líneas de investigación futuras, se incluye la incorporación de datos sobre la biodiversidad, estado de conservación y riesgo asociados a cada área de origen, como factores de ajuste para determinar su jerarquía y prioridad de conservación en el entorno urbano. En el mismo sentido, se pueden abordar criterios para ponderar la vulnerabilidad de cada área ante impactos antrópicos o naturales, con el fin de evaluar la resiliencia sistémica del tejido ecológico a nivel urbano.

Referencias

- European Space Agency [ESA]. (2024). *Copernicus Browser: Copernicus Sentinel-2-L2A Imagery Data*. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
- Esri. (2024). *Sentinel-2 Living Atlas: Sentinel-2 Land Cover Explorer*. Resolución de 10m. <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/>
- He, M., Wu, Y., Liu, X., Wu, B. y Fu, H. (2023). Constructing a multi-functional small urban green space network for green space equity in urban built-up areas: A case study of Harbin, China. *Heliyon*, 9(11), e21671. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21671>
- Hu, C., Wang, Z., Wang, Y., Sun, D. y Zhang, J. (2022). Combining MSPA-MCR Model to Evaluate the Ecological Network in Wuhan, China. *Land*, 11(2), 213. <https://doi.org/10.3390/land11020213>
- Huang, X., Wang, H., Shan, L. y Xiao, F. (2021). Constructing and optimizing urban ecological network in the context of rapid urbanization for improving landscape connectivity. *Ecological Indicators*, 132, 108319. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108319>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Subsistema de Información Demográfica y Social. Datos Abiertos. Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos_abiertos
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2023). *Geografía y Medio Ambiente. Marco Geoestadístico Nacional: diciembre_2023 Colima*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2024). *Sistemas de consulta. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) 011_2024*. <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/ficha.html?tit=2027433yag=6yf=shp>
- Jamil, R., Julian, J. P., Jensen, J. L. R. y Meitzen, K. M. (2024). Urban Green Infrastructure Connectivity: The Role of Private Semi-Natural Areas. *Land*, 13(8), 1213. <https://doi.org/10.3390/land13081213>

- Jato-Espino, D., Capra-Ribeiro, F., Moscardó, V., Del Pino, L. E. B., Mayor-Vitoria, F., Gallardo, L. O., Carracedo, P. y Dietrich, K. (2023). A systematic review on the ecosystem services provided by green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 127998. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127998>
- Jiang, J., Cai, J., Peng, R., Li, P., Chen, W., Xia, Y., Deng, J., Zhang, Q. y Yu, Z. (2024). Establishment and optimization of urban ecological network based on ecological regulation services aiming at stability and connectivity. *Ecological Indicators*, 165, 112217. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112217>
- Kirk, H., Soanes, K., Amati, M., Bekessy, S., Harrison, L., Parris, K., Ramalho, C., Van de Ree, R. y Threlfall, C. (2023). Ecological connectivity as a planning tool for the conservation of wildlife in cities. *MethodsX*, 10, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101989>
- Kong, F., Yin, H., Nakagoshi, N. y Zong, Y. (2010). Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 95(1-2), 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.11.001>
- Li, X., Ou, X., Sun, X., Li, H., Li, Y. y Zheng, X. (2024). Urban biodiversity conservation: A framework for ecological network construction and priority areas identification considering habit differences within species. *Journal of Environmental Management*, 365, 121512. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121512>
- Liu, C., Li, W., Xu, J., Zhou, H., Li, C. y Wang, W. (2022). Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 137, 108734. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108734>
- Liu, Z., Yin, H., Wang, Y., Cheng, Q. y Wang, Z. (2024). Research progress on animal habitat constructions from the perspective of urban biodiversity improvement. *Frontiers In Environmental Science*, 11, 1133879. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1133879>
- McRae, B. H., Dickson, B. G., Keitt, T. H. y Shah, V. B. (2008). Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution and conservation. *Ecology*, 89(10), 2712-2724. <https://doi.org/10.1890/07-1861.1>
- McRae, B.H., Shah, V. B. y Edelman, A. (2016). Circuitscape: Modeling Landscape Connectivity to Promote Conservation and Human Health. *The Nature Conservancy, Fort Collins, CO*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4265.1126>

- Shi, X., Qin, M., Li, B. y Zhang, D. (2021). A Framework for Optimizing Green Infrastructure Networks Based on Landscape Connectivity and Ecosystem Services. *Sustainability*, 13(18), 10053. <https://doi.org/10.3390/su131810053>
- Soille, P. y Vogt, P. (2008). Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 30(4), 456-459. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.10.015>
- Staccione, A., Candiago, S. y Mysiak, J. (2022). Mapping a Green Infrastructure Network: a framework for spatial connectivity applied in Northern Italy. *Environmental Science y Policy*, 131, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.017>
- Syamili, M. S., Takala, T., Korrensalo, A. y Tuittila, E.-S. (2023). Happiness in urban green spaces: A systematic literature review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 128042. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128042>
- Veerkamp, C. J., Schipper, A. M., Hedlund, K., Lazarova, T., Nordin, A. y Hanson, H. I. (2021). A review of studies assessing ecosystem services provided by urban green and blue infrastructure. *Ecosystem Services*, 52, 101367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101367>
- Vogt, P., Riitters, K., Rambaud, P., D'Annunzio, R., Lindquist, E. y Pekkarinen, A. (2022). GuidosToolbox Workbench: spatial analysis of raster maps for ecological applications. *Ecography*, 2022(3). <https://doi.org/10.1111/ecog.05864>
- Wang, S., Wu, M., Hu, M., Fan, C., Wang, T. y Xia, B. (2021). Promoting landscape connectivity of highly urbanized area: An ecological network approach. *Ecological Indicators*, 125, 107487. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107487>
- Wanghe, K., Guo, X., Wang, M., Zhuang, H., Ahmad, S., Khan, T. U., Xiao, Y., Luan, X. y Li, K. (2020). Gravity model toolbox: An automated and open-source ArcGIS tool to build and prioritize ecological corridors in urban landscapes. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01012. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01012>
- Zhang, M., Li, J., Wang, L., Xu, B. y Nie, W. (2024). The impact of connectivity in natural protected areas on the resilience of urban ecological networks: A research framework based on hierarchical disturbance scenario simulation. *Ecological Indicators*, 164, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112144>

- Zhang, Z., Meerow, S., Newell, J. P y Lindquist, M. (2019). Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 305-317. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.014>
- Zhao, S., Ma, Y., Wang, J. y You, X. (2019). Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, 126479. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126479>
- Zhou, Y., Yao, J., Chen, M. y Tang, M. (2023). Optimizing an Urban Green Space Ecological Network by Coupling Structural and Functional Connectivity: A Case for Biodiversity Conservation Planning. *Sustainability*, 15(22), 15818. <https://doi.org/10.3390/su152215818>

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por su apoyo financiero mediante el programa de becas para estudios de posgrado.