

# Acoplamiento multirriesgo en el espacio urbano y respuestas resilientes mediante la planificación

PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, ZHANG Mengjie

**Resumen.** A medida que la población y las actividades urbanas continúan concentrándose a alta densidad, las ciudades afrontan desafíos crecientes derivados del acoplamiento de múltiples riesgos. El riesgo urbano ha entrado en una «fase 3.0», caracterizada por la coexistencia e interacción de presiones duraderas y perturbaciones repentinas cada vez más normalizadas. El acoplamiento multirriesgo se ha convertido así en un tema central de la investigación sobre resiliencia urbana. Ante los retos del desarrollo urbano futuro, este artículo examina las características y escenarios del acoplamiento multirriesgo, sus efectos espaciales, mecanismos y prácticas de planificación correspondientes. A continuación, identifica las principales dimensiones teóricas de la resiliencia bajo riesgos acoplados: la interacción entre resiliencia ecológica, social, ingenieril y económica; los ciclos largos y cortos; los umbrales de resiliencia; y la transmisión entre escalas. Sobre esta base, propone un marco de planificación territorial resiliente y precisa las prioridades de resiliencia para los planes maestros, detallados y especializados. Finalmente, presenta orientaciones técnicas para la planificación futura, entre ellas la recopilación y el procesamiento de información multifuente, la evaluación de la superposición y el acoplamiento de riesgos, la deducción de escenarios y la simulación, así como la planificación asistida por inteligencia artificial y el seguimiento de la implementación. El estudio ofrece referencias teóricas y orientaciones metodológicas para la planificación y construcción de ciudades resilientes en la nueva era.

**Palabras clave:** multirriesgo espacial urbano; acoplamiento de riesgos; resiliencia urbana; planificación espacial

Clasificación de la Biblioteca China: TU984 Código del documento: A DOI: 10.16361/j.upf.202405012  
Número del artículo: 1000-3363 (2024) 05-0088-10

\* Investigación financiada por el Programa General de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China, «Efectos espaciales, mecanismos de resiliencia y regulación mediante la planificación del acoplamiento multirriesgo en áreas urbanas de alta densidad: estudio de Wuhan» (proyecto n.º 52378057), y por el Programa de Apoyo a la Investigación Interdisciplinaria de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong, «Mecanismos de retroalimentación entre población y territorio, optimización espacial y regulación de políticas de los sistemas urbano-rurales en escenarios de inundación extrema: estudio del área metropolitana de Wuhan» (proyecto n.º 2023JCYJ020).

La incertidumbre asociada a los riesgos urbanos se intensifica en China, y el desarrollo espacial de alta calidad afronta crecientes desafíos de seguridad y resiliencia. Construir un espacio territorial resiliente capaz de responder a riesgos múltiples se ha convertido, por tanto, en una tarea importante de la planificación espacial al servicio de la modernización china.

La evolución de los riesgos espaciales puede dividirse, en términos generales, en tres etapas (figura 1). En la fase 1.0, el principal desafío de la resiliencia urbana eran los riesgos sostenidos: cómo hacer frente a presiones internas de largo plazo, como los cambios de la vegetación y la degradación ecológica. Se trataba de eventos relativamente previsibles, del tipo «rinoceronte gris». En la fase 2.0, la atención se desplazó hacia los eventos extremos o los riesgos repentinos —los «cisnes negros»—, incluidas catástrofes naturales como las lluvias extremas y los riesgos geológicos, así como desastres de origen humano, entre ellos los incendios urbanos y los accidentes con sustancias peligrosas. China ha entrado ahora en la fase 3.0, caracterizada por la normalización del riesgo. En la era pospandémica, el aumento de la densidad urbana hace coexistir presiones duraderas y perturbaciones súbitas. Su frecuencia temporal se vuelve habitual, mientras sus tipos espaciales se acoplan cada vez más. Los riesgos múltiples e inciertos

generan reacciones en cadena complejas: la interacción entre los factores de riesgo puede transformar una amenaza aislada en un daño sistémico y cíclico, con pérdidas mucho más graves.

Varias cuestiones científicas requieren, por tanto, atención sostenida en la planificación espacial actual y futura. En primer lugar, ¿qué distingue las características y regularidades del acoplamiento multirriesgo en el espacio urbano? En segundo lugar, ¿qué efectos espaciales y mecanismos genera? En tercer lugar, ¿cuáles son los principales elementos teóricos de la respuesta resiliente? En cuarto lugar, ¿cómo puede el sistema vigente de planificación espacial definir los contenidos prioritarios y las orientaciones técnicas de la resiliencia? Siguiendo la secuencia «fundamentos de investigación del acoplamiento multirriesgo – teoría de la resiliencia urbana ante riesgos acoplados – planificación espacial resiliente y orientaciones técnicas», el artículo revisa conceptos, escenarios, efectos espaciales, mecanismos y prácticas de planificación, y propone respuestas teóricas y planificadoras preliminares para la investigación y la práctica futuras.



Figura 1. Tres fases del desarrollo del riesgo urbano y sus desafíos para la resiliencia

## 1 Fundamentos teóricos y experiencias de planificación relacionados con el acoplamiento multirriesgo en el espacio urbano

### 1.1 Características conceptuales y escenarios del acoplamiento multirriesgo

El concepto más estrechamente relacionado con el riesgo es el de peligro, aunque la literatura no ha alcanzado un consenso pleno sobre la diferencia entre ambos. Un peligro urbano es una perturbación inducida por un factor dañino que provoca pérdidas físicas dentro de un ámbito espacio-temporal determinado. El riesgo urbano, en cambio, alude a la probabilidad de que las complejas relaciones de acoplamiento entre el medio natural, la estructura funcional, la sociedad humana y otros sistemas urbanos generen eventos perjudiciales [1]. Por tanto, el peligro se centra en el evento, su evolución y las pérdidas ocasionadas; el riesgo se refiere a la incertidumbre de las pérdidas y puede cuantificarse hasta cierto punto [2-3].

Los investigadores han observado desde hace tiempo la coexistencia de varios riesgos en determinados lugares y periodos [4]. El multirriesgo espacial urbano describe una situación en la que varias fuentes de peligro y diversos elementos vulnerables se superponen en el tiempo o el espacio [5-6]. Se caracteriza por la diversidad de ámbitos y la coexistencia temporal (tabla 1). La diversidad abarca riesgos naturales, tecnológicos, económicos, sociales y políticos; la coexistencia temporal incluye presiones de largo plazo y perturbaciones repentinas [7].

Las interacciones entre riesgos múltiples han recibido una atención considerable durante la última década, y se han logrado avances importantes en el estudio de la evolución y las características de las cadenas de desastres típicas [15-17]. Entre las reacciones en cadena frecuentes en las ciudades chinas figuran «tifón – lluvia extrema – anegamiento/inundación», «terremoto – deslizamiento/corriente de detritos», «alta temperatura – sequía – degradación del suelo/plagas y enfermedades» y «ola de frío –

desastre por nieve/daño biológico por congelación». Desde una perspectiva espacial, el entorno urbano determina en gran medida las vías de transmisión y las formas de acoplamiento de los riesgos, ampliando así los efectos potenciales de los desastres [18-19]. Las ciudades difieren en su exposición a los peligros y en la sensibilidad de sus entornos espaciales, por lo que la evolución dinámica del riesgo también varía. Las cadenas de desastres, la coincidencia de peligros, los efectos en cascada, inducidos y dominó son manifestaciones del acoplamiento multirriesgo [18,20-23]. Expresan relaciones de influencia y dependencia entre factores dentro de un sistema de riesgo complejo y pueden intensificar su evolución y las pérdidas potenciales.

Según el modo de activación, el acoplamiento multirriesgo puede ser acumulativo o repentino. Según el tipo, puede producirse entre riesgos naturales, entre riesgos de origen humano o entre riesgos naturales y antropogénicos. La investigación sobre este último tipo sigue siendo relativamente escasa, aunque los riesgos naturales-tecnológicos (Natech) y naturales-sociales están fuertemente interrelacionados y pueden generar pérdidas secundarias muy graves [18]. Los factores de riesgo considerados por separado no tienen por qué ser extremos; su interacción puede producir un evento extremo. Los escenarios en los que varios eventos ocurren simultánea o sucesivamente se denominan eventos extremos compuestos. Debido al acoplamiento inherente entre riesgos, sus efectos espaciales suelen superar la simple suma de eventos extremos aislados y plantean mayores amenazas a los distintos subsistemas vitales urbanos [24-26].

Tabla 1. Conceptos y significados relacionados con el multirriesgo

| Concepto            | Definición                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Fuentes                                                                                                                |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Peligro             | Fenómeno físico que causa daños a la economía urbana, las infraestructuras, la vida de los habitantes, los servicios sociales o el medio ecológico.                                                                                                                                                              | UNISDR, 2009; IPCC, 2012; Gallina et al., 2016.                                                                        |
| Riesgo              | Expresión cuantitativa de las consecuencias potenciales de un evento peligroso para el espacio urbano, formulada en términos probabilísticos o semicuantitativos.                                                                                                                                                | IPCC, 2012; Gallina et al., 2016.                                                                                      |
| Multiamenaza        | Eventos peligrosos que amenazan a los mismos elementos expuestos e interactúan de distintas maneras; peligros asociados con el mismo espacio, que ocurren simultáneamente o se suceden en un intervalo breve.                                                                                                    | Saarinen et al., 1973; Carpignano et al., 2009; Marzocchi et al., 2012; Komendantova et al., 2014; Terzi et al., 2019. |
| Riesgo multiamenaza | Riesgo generado por múltiples factores peligrosos, generalmente sin considerar las correlaciones entre los niveles de vulnerabilidad.                                                                                                                                                                            | Kappes et al., 2012; Ward et al., 2022.                                                                                |
| Multirriesgo        | Riesgo generado por factores peligrosos independientes o interdependientes y por varios elementos vulnerables que se superponen en el tiempo y el espacio. Un riesgo modifica la probabilidad, frecuencia o magnitud de otro, y normalmente se consideran las correlaciones entre los niveles de vulnerabilidad. | Carpignano et al., 2009; Kappes et al., 2012; Marzocchi et al., 2012; de Ruiter et al., 2020; Ward et al., 2022.       |

Fuente: elaboración propia a partir de las referencias [5-6, 8-14].

## 1.2 Prácticas de planificación frente a riesgos múltiples

El acoplamiento multirriesgo ha recibido atención en la planificación espacial urbana internacional. Las estrategias de implementación abarcan plataformas de información, comunidades resilientes,

infraestructuras urbanas y otras dimensiones. Algunos planes, incluidos los de Los Ángeles y Londres, distinguen entre presiones de largo plazo y perturbaciones súbitas y organizan la prevención de riesgos en consecuencia. Sin embargo, las teorías y métodos para la evaluación y gestión multirriesgo siguen siendo insuficientes, y los planes espaciales existentes rara vez examinan en profundidad los efectos del acoplamiento (tabla 2).

Desde 2015, los programas piloto de ciudades esponja y ciudades adaptadas al clima han favorecido en China el desarrollo gradual de una planificación espacial orientada a la resiliencia. La mayoría de las ciudades considera actualmente la seguridad resiliente como un asunto central del plan maestro. El Plan Espacial Especializado de Pekín para una Ciudad Resiliente (2022-2035), por ejemplo, incorpora respuestas a varios riesgos. No obstante, la práctica de planificación ante riesgos acoplados sigue siendo exploratoria (tabla 3).

Tabla 2. Prácticas representativas de planificación espacial frente a riesgos múltiples en el mundo

| Ciudad      | Política de resiliencia                               | Año  | Riesgos típicos                                                                                     | Objetivos y ámbitos prioritarios                                                                                                                                    | Respuesta multirriesgo                                                                                                                                                                                                                |
|-------------|-------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Róterdam    | Estrategia de Resiliencia de Róterdam                 | 2017 | Elevación del nivel del mar, inundaciones, lluvias extremas                                         | Establecer sistemas de control de inundaciones y drenaje; mejorar el intercambio seguro de datos urbanos; promover la innovación social y la participación.         | Se centra en los peligros naturales relacionados con el agua, en especial las inundaciones, y en la adaptación climática.                                                                                                             |
| Los Ángeles | Resilient Los Angeles                                 | 2018 | Terremotos, incendios, corrientes de detritos, olas de calor                                        | Liderazgo y participación pública; preparación y recuperación ante desastres; seguridad económica; adaptación climática; modernización de las infraestructuras.     | Construye una plataforma de información multiamenaza orientada a los residentes; reforma la cooperación gubernamental; fortalece y protege las comunidades para afrontar catástrofes inesperadas y presiones latentes de largo plazo. |
| Nueva York  | OneNYC 2050: construir una ciudad fuerte y equitativa | 2019 | Calentamiento climático, inundaciones, marejadas, elevación del nivel del mar, olas de calor urbano | Abordar el cambio climático a largo plazo; eliminar la dependencia de los combustibles fósiles; alimentar edificios, transporte y economía con energías renovables. | Analiza riesgos urbanos compuestos, como la crisis climática, el riesgo económico y la presión social.                                                                                                                                |
| Londres     | Estrategia de Resiliencia Urbana de Londres 2020      | 2020 | Inundaciones persistentes, sequía, calor extremo                                                    | Responder a desastres súbitos y desarrollar una capacidad urbana más amplia y duradera para resistir riesgos.                                                       | Examina los riesgos a corto y largo plazo; identifica impactos y presiones. El cambio climático es el principal impacto, mientras la desigualdad y la falta de integración social son presiones fundamentales.                        |

| Ciudad   | Política de resiliencia                  | Año  | Riesgos típicos                                                                         | Objetivos y ámbitos prioritarios                                                                                                                                  | Respuesta multirriesgo                                                                                                                                                                                                |
|----------|------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Singapur | Singapore Green Plan 2030                | 2021 | Lluvias extremas, sequía, epidemias                                                     | Cinco pilares: ciudad en la naturaleza, transición energética, vida sostenible, economía verde y futuro resiliente.                                               | Refuerza la resiliencia frente a los cambios ambientales y las lluvias/inundaciones mediante espacios verdes y medidas como el programa Cooling Singapore.                                                            |
| Chicago  | Chicago Climate Action Plan              | 2022 | Veranos calurosos, inviernos extremos, niebla, inundaciones, lluvias intensas, tornados | Reducir los efectos de la incertidumbre futura y adaptarse de forma duradera y equitativa al cambio climático.                                                    | Identifica riesgos conjuntamente más allá de las fronteras municipales y con distintos socios, y formula planes para inundaciones, clima invernal extremo, tornados y otros peligros naturales.                       |
| Tokio    | Plan Fundamental de Resiliencia Nacional | 2023 | Terremotos, tsunamis, tifones, inundaciones, incendios, epidemias                       | Proteger a las personas; mantener las funciones vitales; reducir las pérdidas de bienes nacionales e instalaciones públicas; recuperar y reconstruir con rapidez. | Fortalece la capacidad local de prevención, aplica activamente tecnologías digitales y otras innovaciones y mejora tanto la respuesta a desastres naturales como la ejecución de la política nacional de resiliencia. |

Fuente: elaboración propia a partir de información pública disponible en Internet.

Tabla 3. Ejemplos de prácticas chinas de planificación espacial frente a riesgos múltiples

| Ciudad | Documento de planificación                                                              | Año  | Riesgos típicos                                        | Objetivos y ámbitos prioritarios                                                                                                                                   | Respuesta multirriesgo                                                                                   |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pekín  | Plan Maestro de Pekín (2016-2030)                                                       | 2016 | Inundaciones, incendios forestales, riesgos geológicos | Propone vías para construir una ciudad resiliente desde las perspectivas del sistema urbano y la gestión de la resiliencia.                                        | Establece un sistema unificado de evaluación, seguimiento y alerta temprana de riesgos de desastre.      |
| Pekín  | Opiniones orientativas sobre la aceleración de la construcción de una ciudad resiliente | 2021 | Inundaciones, incendios forestales, riesgos geológicos | Coordina la ampliación de la resiliencia espacial, refuerza la resiliencia ingenieril, mejora la resiliencia de la gestión urbana y cultiva la resiliencia social. | Refuerza el análisis de peligros simultáneos y cadenas de desastre y mejora los mapas urbanos de riesgo. |
| Pekín  | Plan Espacial Especializado de Pekín para una Ciudad Resiliente                         | 2024 | Inundaciones, incendios forestales, riesgos            | Construye un sistema de gobernanza espacial de la capital seguro, fiable, transformable, de                                                                        | Responde a riesgos extremos complejos, promueve instalaciones de doble uso ordinario y de emergencia y   |

| Ciudad    | Documento de planificación                                                       | Año  | Riesgos típicos                                           | Objetivos y ámbitos prioritarios                                                                                                     | Respuesta multirriesgo                                                                                                                                                                              |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | (2022-2035)                                                                      |      | geológicos                                                | recuperación rápida, orgánicamente organizado y adaptado al futuro.                                                                  | utiliza simulaciones de desastre para anticipar medidas espaciales.                                                                                                                                 |
| Shanghái  | Plan Maestro de Shanghái (2017-2035)                                             | 2018 | Tifones, calor, inundaciones                              | Construye una ciudad ecológica más sostenible y resiliente.                                                                          | Mejora los mecanismos de seguimiento y alerta temprana para múltiples peligros urbanos.                                                                                                             |
| Shenzhen  | Plan Espacial de Evacuación y Rescate de Emergencia de Shenzhen (2021-2035)      | 2023 | Lluvias extremas, tifones, terremotos, riesgos geológicos | Analiza sistemáticamente los riesgos de desastres naturales, accidentes, emergencias sanitarias e incidentes de seguridad social.    | Integra las necesidades ordinarias y de emergencia, considera múltiples peligros y desarrolla respuestas multiamenaza integrales.                                                                   |
| Hong Kong | Hong Kong 2030+: hacia una visión y estrategia de planificación más allá de 2030 | 2021 | Tifones, calor extremo, inundaciones                      | Refuerza los sistemas de recursos azules y verdes para crear una metrópolis natural adaptada al cambio climático y la biodiversidad. | Considera plenamente el cambio climático, la biodiversidad y otros factores ambientales e incorpora diseño adaptativo y resistente al clima en nuevos desarrollos y proyectos de renovación urbana. |

Fuente: elaboración propia a partir de información pública disponible en Internet.

## 2 Elementos teóricos de la resiliencia urbana ante el acoplamiento multirriesgo

Originalmente, resiliencia significaba «volver al estado inicial». En términos básicos, se refiere a la capacidad de responder a una crisis, recuperarse y mantener un desarrollo sostenible [27-28]. La resiliencia urbana extiende este concepto a la ciudad y designa la capacidad de un sistema urbano para absorber perturbaciones externas conservando sus características, estructura y funciones esenciales [29]. A medida que el concepto ha evolucionado, su objetivo ha pasado de «restaurar un estado estable» a «configurar un estado estable» y, finalmente, a la «adaptación continua» [30]. En la fase 3.0 del riesgo, la tarea central es adaptarse de forma continua a riesgos normalizados. Sobre la base del análisis anterior, esta sección identifica los principales elementos teóricos de la resiliencia urbana frente a riesgos acoplados (figura 2).

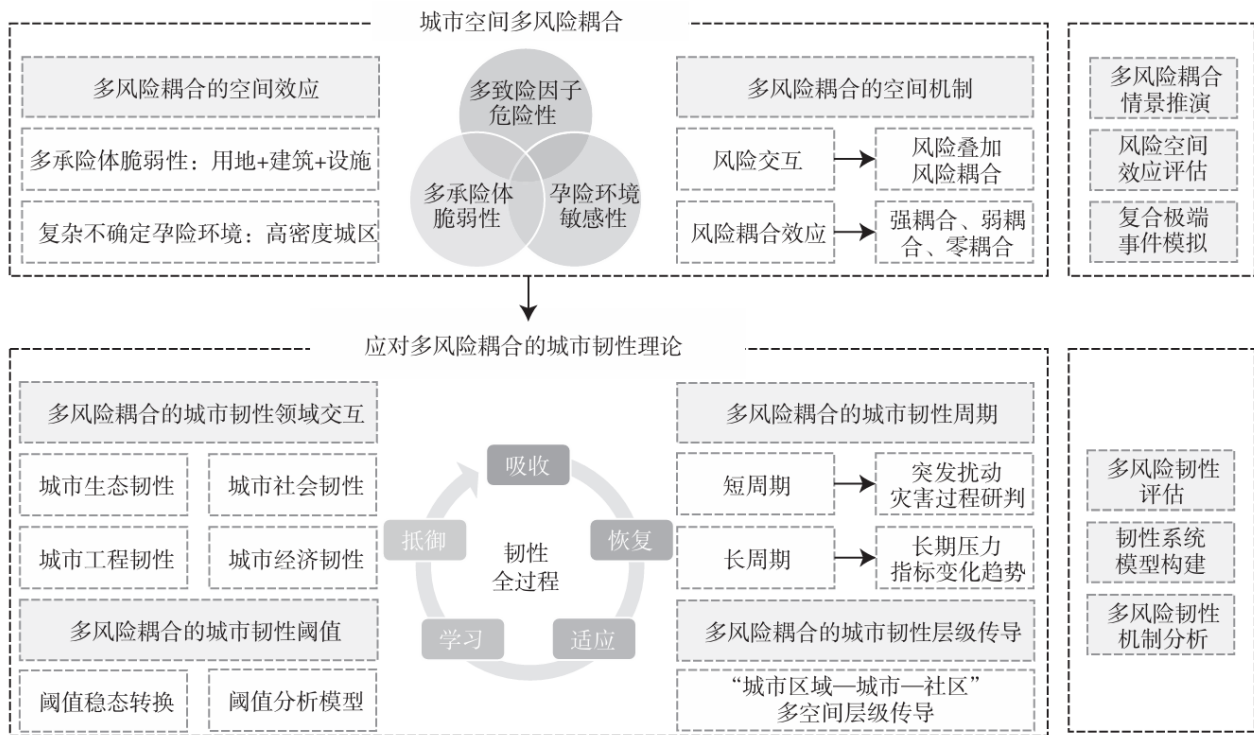


Figura 2. Elementos teóricos de la resiliencia urbana frente al acoplamiento multirriesgo

## 2.1 Efectos espaciales y mecanismos de resiliencia del acoplamiento multirriesgo

El sistema urbano expuesto al riesgo puede entenderse como tres subsistemas espaciales: usos del suelo, edificios e instalaciones. Todos están sometidos a impactos de múltiples riesgos. Los efectos espaciales del acoplamiento son consecuencias perjudiciales producidas por la interacción entre la intensidad de los peligros y la vulnerabilidad de los elementos expuestos dentro de un entorno generador de riesgo, por ejemplo el colapso de edificios, la interrupción del transporte o los daños en las infraestructuras. Los distritos centrales de negocios, los centros urbanos y los tejidos antiguos [31-33] son objetos prioritarios de investigación, ya que las áreas de alta densidad constituyen zonas típicas de acoplamiento. La densidad urbana puede amplificar la interacción entre riesgos y agravar sus consecuencias espaciales.

La diversidad de los factores de peligro interactúa con la complejidad e incertidumbre de los sistemas espaciales urbanos, generando distintos mecanismos compuestos, en particular la superposición y el acoplamiento. La superposición se refiere al impacto acumulativo de varios riesgos cuando no existe una relación evidente entre los peligros o cuando las relaciones entre sus procesos pueden ignorarse razonablemente. Los estudios de planificación se han concentrado principalmente en el análisis de superposiciones multirriesgo en contextos espacio-temporales concretos. Desde la perspectiva del sistema de riesgo, el acoplamiento incluye tanto la interacción entre los elementos que forman el riesgo como la interacción entre sus procesos evolutivos [21]. Los factores pertenecientes a sistemas distintos pueden aumentar, reducir o compensar las pérdidas potenciales [34-36], dando lugar a un acoplamiento fuerte, débil o nulo. Estas relaciones pueden representarse mediante una matriz de riesgo (figura 3). El mecanismo interno del acoplamiento reside en la interdependencia espacio-temporal entre factores peligrosos, entornos generadores de riesgo y elementos expuestos, que impulsan conjuntamente la evolución del riesgo y pueden producir pérdidas más graves [18,37].

La resiliencia se manifiesta durante todo el proceso «antes – durante – después del desastre» mediante la resistencia, la absorción, la recuperación, la adaptación y el aprendizaje [38]. Está estrechamente vinculada con el enfoque del ciclo de vida y la gobernanza integral de las emergencias. Antes de un desastre, la ciudad debe reducir la probabilidad de ocurrencia o las pérdidas potenciales;

durante el desastre, debe mantener la estabilidad operativa y absorber o mitigar los impactos; después, debe recuperarse con rapidez y utilizar la adaptación y el aprendizaje para reforzar su capacidad frente a riesgos futuros.

En un contexto de acoplamiento multirriesgo, la resiliencia urbana puede analizarse a partir de tres dimensiones: intensidad de los peligros, sensibilidad del entorno generador de riesgo y vulnerabilidad de los elementos expuestos (figura 4). La complejidad e incertidumbre de los sistemas espaciales urbanos hacen que determinados eventos sean más probables en ciertos entornos. El acoplamiento entre intensidades de peligro puede amplificar las amenazas al espacio urbano, mientras los elementos expuestos con diferentes perfiles de vulnerabilidad experimentan efectos diferenciados. Por tanto, la resiliencia ante el acoplamiento multirriesgo concierne tanto a la multiplicidad de peligros como a la vulnerabilidad de varios sistemas expuestos.

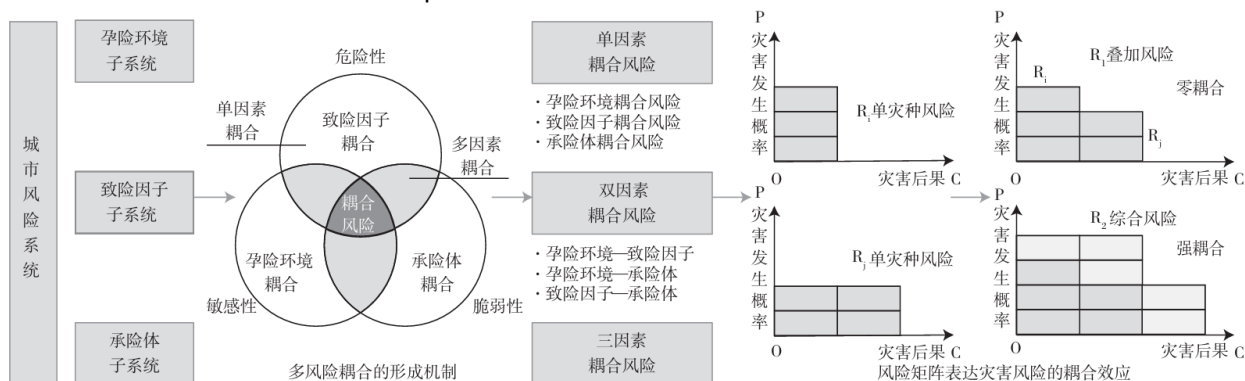


Figura 3. Efectos internos de los riesgos urbanos acoplados

Fuente: redibujado a partir de las referencias [34-36].

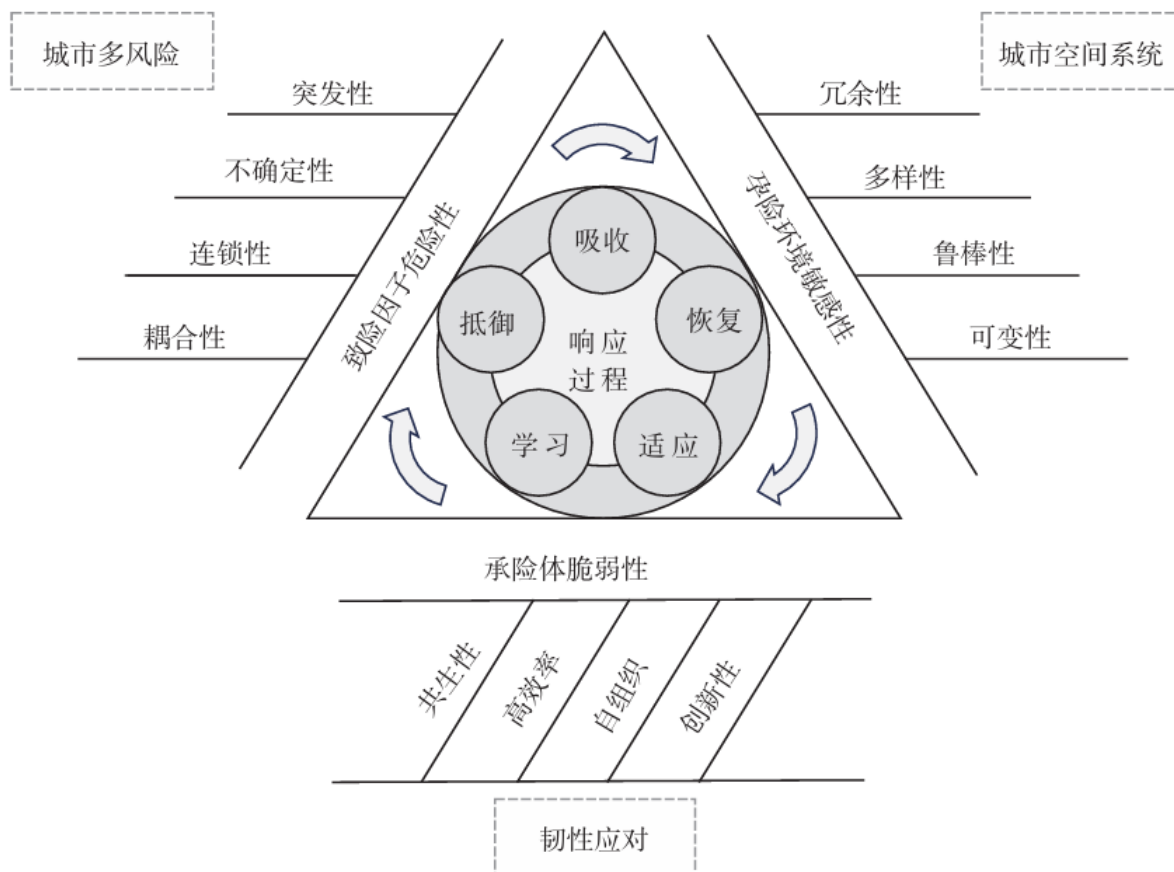


Figura 4. Características de la resiliencia urbana bajo acoplamiento multirriesgo



## **2.2 Ámbitos e interacciones de la resiliencia ante el acoplamiento multirriesgo**

La investigación sobre resiliencia urbana desde la planificación comenzó con la dimensión ecológica y se amplió gradualmente a cuatro grandes ámbitos: ecológico, social, ingenieril y económico [39]. En el ámbito ecológico, los riesgos normalizados asociados con la urbanización y el cambio climático ejercen presión sobre los ecosistemas urbanos y reducen su capacidad de proporcionar servicios esenciales. El acoplamiento multirriesgo puede provocar degradación ecológica, debilitar el apoyo y la retroalimentación de los ecosistemas respecto de la actividad humana y reducir sus funciones reguladoras frente a inundaciones, microclima, emisiones y sumideros de carbono. La restauración de las funciones ecológicas y el mantenimiento de la estructura urbana bajo riesgos recurrentes son, por ello, aspectos centrales de la resiliencia ecológica [40-41].

En el ámbito social, los sistemas humanos deben incrementar su capacidad para resistir riesgos acoplados, y las comunidades y residentes deben adaptarse a riesgos normalizados. La resiliencia social enfatiza la autoorganización y el aprendizaje, el fortalecimiento de las redes sociales, la participación comunitaria, la identidad cultural, la equidad y el bienestar [42-43]. En el ámbito ingenieril, la evaluación de la resiliencia de las infraestructuras urbanas debe incorporar explícitamente el acoplamiento multirriesgo. La redundancia sistémica de las instalaciones vitales puede mejorar la capacidad frente a eventos extremos compuestos; aumentar la adaptabilidad de la infraestructura verde es especialmente importante para reducir los efectos espaciales [44-46]. En el ámbito económico, las perturbaciones súbitas exigen estructuras productivas diversificadas, redes de factores conectadas y cadenas industriales, de suministro e innovación seguras y fiables. Bajo presiones de largo plazo, la resiliencia depende de la capacidad para responder a crisis financieras u otras y de estructuras flexibles que apoyen la recuperación económica [7,47].

Los distintos riesgos y sus interacciones afectan no solo la resiliencia dentro de cada ámbito, sino también las relaciones entre ellos. Su interacción temporal y espacial puede provocar dos tipos de daños: perjuicios localizados dentro de un ámbito concreto y un deterioro intersectorial amplificado por el acoplamiento. Los elementos internos de los cuatro ámbitos se influyen mutuamente en distintos grados y configuran conjuntamente la evolución de la resiliencia urbana. La accesibilidad del transporte, por ejemplo, es un factor de control clave de la resiliencia ingenieril. Influye directamente en las estructuras espaciales y productivas, modifica las direcciones y formas del desarrollo urbano y afecta después la división del trabajo y la cooperación entre sectores. Por ello, es fundamental para mantener un funcionamiento coordinado y sostenible ante riesgos múltiples y para preservar la dinámica endógena de la resiliencia. Por el contrario, la expansión espacial excesiva y la alta densidad pueden aumentar la inestabilidad social y elevar las exigencias de mantenimiento del orden. Dado que los factores dominantes difieren entre ámbitos, la planificación debe fortalecer cada uno internamente, identificar las relaciones intersectoriales clave y optimizar las sinergias, formando un sistema espacial urbano de apoyo mutuo capaz de responder eficazmente a riesgos acoplados.

## **2.3 Ciclos y umbrales de resiliencia bajo acoplamiento multirriesgo**

La resiliencia urbana evoluciona de manera cíclica [48-50]. El modelo del ciclo adaptativo es una explicación clásica de estos ciclos [51-52]: los sistemas urbanos se regeneran e innovan mediante fases sucesivas con características de resiliencia distintas, generando una evolución cíclica en espiral. En la fase 3.0, las ciudades están sometidas de forma permanente tanto a presiones de largo plazo como a perturbaciones repentinas, y su resiliencia evoluciona simultáneamente. Por tanto, el análisis debe adoptar una perspectiva de doble ciclo: un ciclo largo que responde a presiones sostenidas y un ciclo corto que responde a impactos súbitos.

Los cambios del ciclo corto pueden observarse identificando eventos repentinos de riesgo acoplado e interpretando los procesos de desastre. La evolución de corto plazo no equivale a la suma de eventos

aislados; debe incorporar los efectos del acoplamiento. El ciclo corto puede dividirse en una fase de contracción durante el impacto y una fase de expansión durante la recuperación. La resistencia domina la contracción y reduce los efectos espaciales de los riesgos múltiples. La recuperación y la adaptación dominan la expansión y favorecen el restablecimiento e incluso una transformación del desarrollo. Sin embargo, una perspectiva de ciclos cortos puede ocultar cambios de largo plazo a través de numerosos eventos. El ciclo largo representa la expresión estadística combinada de múltiples episodios de riesgo acoplado. Puede medirse mediante cambios de largo plazo en varios indicadores, normalmente a escala anual, para identificar tendencias en los niveles de resiliencia y sus tasas de crecimiento, resumir regularidades y apoyar la simulación y la previsión. Los ciclos cortos evalúan resistencia, recuperación y adaptación antes y después de impactos específicos; los ciclos largos utilizan sistemas de indicadores para medir la resiliencia de un ámbito o de la ciudad en su conjunto. La combinación de ambos permite una lectura más completa de la evolución espacio-temporal.

El umbral de resiliencia es un concepto crítico para el acoplamiento multirriesgo en el espacio urbano. Las ciudades son sistemas complejos cuya estructura, funciones y estado están determinados conjuntamente por numerosos factores. Cuando ciertos indicadores rebasan un intervalo determinado, el sistema puede perder el equilibrio, colapsar o degradarse y dejar de conservar su estado anterior [53]. Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, las funciones urbanas no necesariamente regresan al nivel inicial; pueden estabilizarse en un estado inferior o superior. De manera análoga a los cambios de régimen [54-55], una perturbación acoplada provoca oscilaciones en el sistema de resiliencia; cuando su intensidad supera un umbral, la ciudad abandona el estado estable vigente y transita hacia otro. La modificación de los umbrales bajo riesgos múltiples constituye, por tanto, un proceso de cambio de régimen.

El acoplamiento también puede desplazar los umbrales de resiliencia respecto del estado inicial y generar oscilaciones. Desde una perspectiva de doble ciclo, tanto las perturbaciones súbitas como las presiones duraderas pueden superar el umbral. En el ciclo corto, la incertidumbre es elevada y las variables rápidas pueden provocar un impacto intenso que altere casi instantáneamente el sistema. En el ciclo largo, la acción es más lenta, pero la presión persistente de variables lentas modifica directamente el estado una vez rebasado el umbral. Este puede entenderse como el nivel mínimo de resiliencia que permite mantener el funcionamiento normal de la ciudad en los ciclos largos y cortos, o como el evento acoplado máximo que el sistema puede absorber. Los entornos urbanos específicos influyen en las consecuencias espaciales al modificar dicho umbral. La figura 5 ilustra tres posibles resultados del acoplamiento entre dos eventos: mejora de la resiliencia mediante el aprendizaje, reducción por daños o transición hacia un estado inestable.

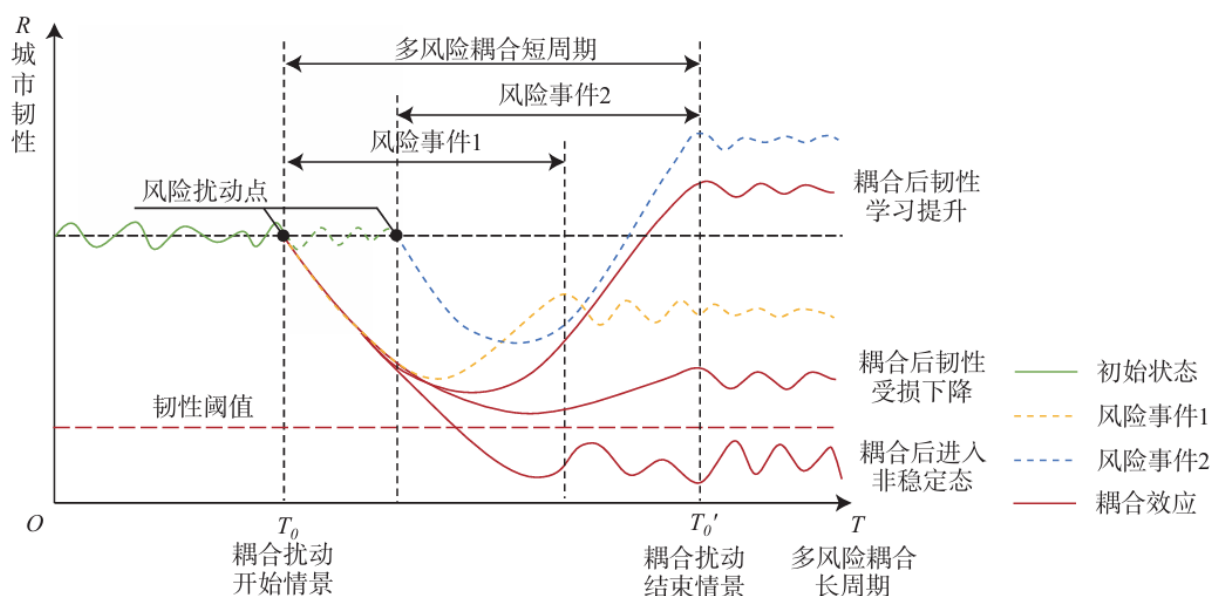


Figura 5. Modelo teórico de los ciclos de resiliencia frente a riesgos múltiples

## 2.4 Niveles de resiliencia y transmisión entre escalas ante el acoplamiento multirriesgo

La resiliencia urbana abarca varios niveles espaciales: la región urbana —aglomeración o área metropolitana—, la ciudad y la comunidad. Cada nivel presenta riesgos, características de resiliencia y estrategias de respuesta propias, y las interacciones entre ellos son complejas. Las redes externas de transporte y logística a escala regional, por ejemplo, permiten que las ciudades respondan eficazmente a riesgos múltiples. En la escala urbana, los refugios de emergencia y las redes médicas apoyan a las comunidades. Las comunidades resilientes pueden utilizar su organización y recursos para ayudar a sectores vecinos y elevar la resiliencia del conjunto de la ciudad. Las relaciones de influencia y apoyo dentro y entre niveles constituyen la base de la resiliencia urbana sistémica.

La transmisión de la resiliencia se refiere a su desplazamiento y difusión dentro de un nivel o entre distintos niveles. Espacialmente, es interescala, multidireccional, sistémica e interconectada. Desde una perspectiva de sistemas complejos, las interdependencias entre niveles cambian con la evolución dinámica, de largo y corto plazo, del sistema urbano bajo eventos acoplados. La transmisión proporciona apoyo y amortiguación: cuando un nivel sufre un impacto, otros pueden suministrar recursos y asistencia y acelerar la recuperación. Puesto que la resiliencia multirriesgo abarca escalas desde lo macro hasta lo micro, el análisis debe considerar las características y relaciones de cada nivel y su contribución conjunta a la resiliencia global. La planificación espacial puede mejorarla mediante la identificación y el fortalecimiento sistemáticos de las capacidades de cada escala y el fomento de la cooperación y el apoyo mutuo.

## 3 Elaboración de planes espaciales resilientes frente al acoplamiento multirriesgo

La teoría de la resiliencia urbana ante riesgos acoplados proporciona orientación para la elaboración de planes espaciales resilientes. Por ello, es importante explorar cómo integrar el principio de seguridad y resiliencia multirriesgo en el sistema chino de planificación territorial de «cinco niveles y tres tipos de planes». La figura 6 presenta un marco preliminar.

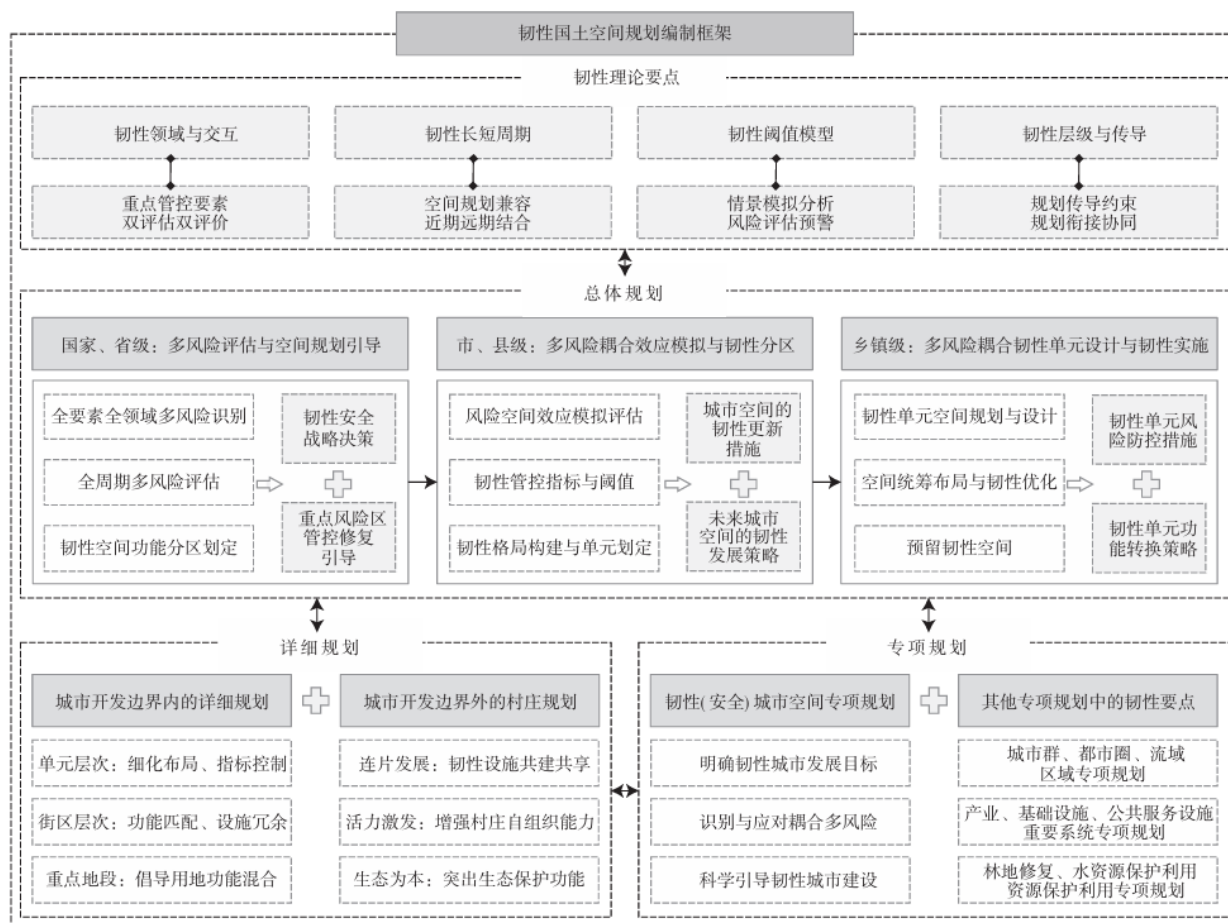


Figura 6. Marco de planificación territorial resiliente

### 3.1 Prioridades de resiliencia en la planificación maestra

La construcción de un espacio territorial resiliente frente a riesgos normalizados se ha convertido en un principio central de la planificación urbana. Los planes maestros nacionales y provinciales proporcionan orientación estratégica para el desarrollo espacial resiliente. En coordinación con las estrategias nacionales de seguridad y resiliencia, los planes provinciales deben identificar riesgos espaciales y realizar una doble evaluación de la capacidad de soporte de los recursos y el medio ambiente y de la idoneidad para el desarrollo. Asimismo, deben configurar una estructura espacial regional resiliente, delimitar zonas funcionales de seguridad territorial y proporcionar orientaciones generales para el control de riesgos y la restauración ecológica, en particular en las áreas prioritarias.

Los planes maestros de nivel municipal, de condado y de municipio deben traducir las estrategias superiores en medidas de implementación. A escala municipal y de condado, la ciudad resiliente puede abordarse como un tema especial cuando sea necesario. Los planes deben identificar el acoplamiento multirriesgo y evaluar la resiliencia en todos los elementos, ámbitos y ciclos; elaborar un mapa base de seguridad urbana; definir las restricciones mínimas y funciones reguladoras de los indicadores; establecer estructuras policéntricas y en red para el desarrollo y la protección del espacio; crear sistemas ecológicos abiertos, continuos y conectados; y delimitar unidades de resiliencia. También deben identificar espacios naturales capaces de absorber desastres, promover la restauración ecológica, mejorar las funciones reguladoras de los ecosistemas y amortiguar los efectos del riesgo [56]. Asimismo, deben incrementar la capacidad de las instalaciones frente a riesgos múltiples, mejorar la adaptabilidad y eficiencia de las infraestructuras y formular estrategias de renovación resiliente del espacio urbano existente y de desarrollo resiliente del espacio futuro. A escala municipal inferior o de poblado, la planificación y el diseño deben organizarse en torno a unidades de resiliencia, perfeccionar la organización de los sistemas

espaciales, aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, coordinar los espacios de producción, vida y ecología, reservar espacios flexibles y establecer medidas preventivas para situaciones ordinarias y estrategias de conversión funcional en emergencias. En conjunto, estas acciones deben conformar un sistema de resiliencia multinivel y reticular.

### **3.2 Prioridades de resiliencia en la planificación detallada**

En 2023, el Ministerio de Recursos Naturales publicó el Aviso sobre el Fortalecimiento de la Planificación Detallada del Espacio Territorial, que introdujo nuevas exigencias para la reforma y la práctica. Los planes detallados concretan y ejecutan los planes maestros mediante la asignación directa de usos del suelo y la localización de las instalaciones urbanas. Constituyen, por tanto, una vía principal para trasladar el concepto de ciudad resiliente al sistema espacial urbano. Dado que los entornos y las características de resiliencia difieren significativamente dentro y fuera de los límites de desarrollo urbano, las prioridades también deben diferenciarse.

Dentro de los límites de desarrollo urbano, la planificación a escala de unidad debe utilizar la evaluación de riesgos acoplados para identificar áreas propensas y puntos críticos, precisar la localización de refugios, obras de defensa civil y otras instalaciones resilientes y establecer indicadores de control. A escala de manzana o barrio, debe mantener una relación adecuada entre población, intensidad edificatoria y forma urbana; garantizar la provisión de infraestructuras, equipamientos de gestión y servicios públicos, espacios verdes y plazas; aumentar razonablemente la redundancia de los sistemas resilientes; y asegurar la ejecución de infraestructuras de emergencia. En los sectores clave, conviene reforzar la diversidad y transformabilidad del espacio y fomentar usos mixtos en áreas de renovación urbana, centros de actividad pública y paisajes de montaña o ribera.

Fuera de los límites de desarrollo urbano, las áreas rurales constituyen un eslabón relativamente débil del espacio resiliente. La planificación conjunta de varias aldeas puede favorecer la construcción y el uso compartido de equipamientos y fortalecer la transmisión horizontal entre territorios del mismo nivel. Las aldeas destinadas a la concentración, la mejora o la integración periurbana deben activar su desarrollo mediante la modernización productiva y la mejora ambiental, reforzar la autoorganización y reservar espacios flexibles. Las aldeas orientadas a la protección diferenciada o a la reubicación y consolidación deben priorizar la conservación ecológica y la mejora del entorno habitado. Los parques nacionales, áreas protegidas, fuentes de agua importantes, tierras agrícolas y otros espacios ecológicos o productivos que requieran planes detallados deben someterse a la identificación de riesgos de incendio, geológicos y sísmicos, dando prioridad a la integridad de las funciones ecosistémicas.

### **3.3 Prioridades de resiliencia en la planificación especializada**

En China, las ideas de resiliencia frente al acoplamiento multirriesgo se encuentran actualmente dispersas en planes especializados de ciudades esponja, prevención y reducción integral de desastres [57], equipamientos de servicio público, transporte, sistemas verdes y otros ámbitos. En la nueva etapa del desarrollo de la resiliencia, esta proporciona un marco teórico y medios técnicos para abordar los problemas de seguridad. Los principios de proceso completo, múltiples ámbitos y diferentes escalas pueden incorporarse a la prevención urbana mediante un plan espacial especializado para una ciudad resiliente o segura. La figura 7 presenta un marco preliminar basado en las experiencias de Pekín y otras ciudades.

Un plan espacial especializado para una ciudad resiliente debe responder a las preguntas comunes de la fase 3.0: ¿cuáles son los objetivos de desarrollo de una ciudad resiliente? ¿Cómo deben gestionarse los riesgos normalizados para elevar la resiliencia? ¿Cómo debe orientarse su estructura espacial? El plan puede incluir cinco tareas: (1) integrar los datos de riesgo de diversos departamentos, identificar de forma sistemática los riesgos urbanos potenciales, evaluar la resiliencia y determinar los eslabones débiles; (2) formular objetivos prospectivos basados en las necesidades de desarrollo y seguridad de largo plazo,

adaptados a futuros acoplamientos inciertos; (3) asignar racionalmente los recursos, mejorar la estructura, la disposición y la zonificación de la ciudad resiliente, coordinar infraestructuras públicas de doble uso ordinario y de emergencia y crear un sistema espacial orgánicamente integrado; (4) proponer medidas detalladas en los ámbitos ecológico, social, ingenieril y económico y especificar estrategias para distintos escenarios; y (5) establecer un calendario claro de implementación y responsabilidades definidas, evaluar periódicamente la eficacia y actualizar el contenido del plan.

Las ciudades chinas difieren ampliamente por su geografía y tamaño, por lo que los planes deben adaptarse al contexto. Desde el punto de vista geográfico, es necesario identificar tipos característicos de acoplamiento, como los riesgos conjuntos de tifón y lluvia intensa en las ciudades costeras del sureste o los de terremoto y peligro geológico en las zonas sísmicas, y formular medidas específicas que compatibilicen las funciones ordinarias y de emergencia y permitan conversiones rápidas. Las ciudades pequeñas y medianas y las cabeceras de condado presentan entornos y perfiles de peligro relativamente simples; su prioridad consiste en reducir los efectos potenciales de los acoplamientos frecuentes y fortalecer la resiliencia comunitaria. Las grandes ciudades son más complejas y requieren identificar unidades espaciales prioritarias y simular diversos escenarios, con orientación multinivel: «territorio completo – área urbana central – unidad espacial clave – comunidad». En las megaciudades y ciudades supergrandes, la población y las actividades se concentran fuertemente en el centro. Es necesario, por tanto, reforzar la construcción y gobernanza conjuntas a escala regional, mejorar la transmisión de la resiliencia mediante la coordinación entre aglomeraciones y áreas metropolitanas, prepararse estratégicamente para interacciones complejas entre eventos climáticos extremos y emergencias graves, organizar la conversión de funciones espaciales y los flujos de recursos en escenarios extremos y utilizar gemelos digitales y otras tecnologías para reforzar la percepción, la respuesta y la gobernanza frente a presiones duraderas y perturbaciones súbitas.

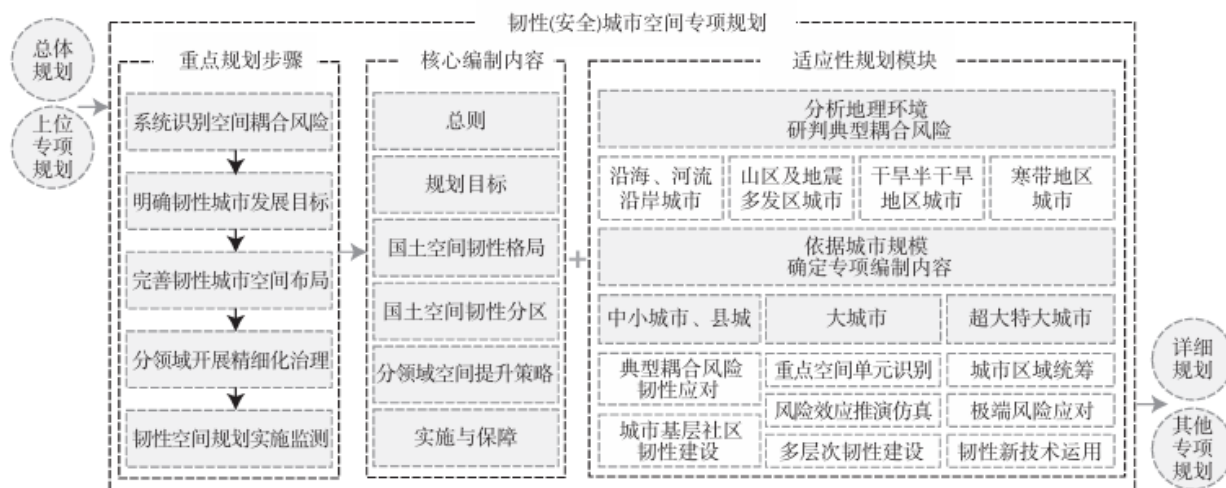


Figura 7. Marco preliminar de un plan espacial especializado para una ciudad resiliente (segura)

#### 4 Orientaciones técnicas para la elaboración de planes espaciales resilientes

El análisis de las prioridades anteriores muestra que todo el proceso de planificación requiere recopilar datos espaciales urbanos de múltiples fuentes, revelar riesgos complejos y simular sus efectos mediante tecnologías de la información e inteligencia artificial. Wu Zhiqiang y sus colaboradores [58] señalan que la IA está haciendo más inteligente la planificación desde múltiples perspectivas, al tiempo que genera nuevos desafíos en la relación entre IA y ciudad. Peng Zhongren y sus colaboradores [59] proponen cuatro etapas de desarrollo de la IA aplicada a la planificación urbana: asistencia, aumento, automatización y autonomía. Las principales orientaciones técnicas incluyen la recopilación y el tratamiento de información espacial, la evaluación de la superposición y el acoplamiento de riesgos, la

deducción de escenarios y la simulación, y la planificación inteligente con seguimiento de la implementación.

#### **4.1 Recopilación y tratamiento de información espacial**

La teledetección, el Internet de las cosas e Internet se utilizan ampliamente para recopilar y procesar datos espaciales y de riesgo. La difusión de datos urbanos de flujos diversos y la mejora de su calidad ampliarán de forma considerable las dimensiones de la investigación sobre resiliencia multirriesgo y elevarán la eficiencia en la elaboración de planes. La inteligencia artificial ofrece ventajas importantes en la minería profunda de macrodatos urbanos, y la incorporación de nuevas tecnologías al análisis urbano se está convirtiendo en una tendencia central. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden relacionar, fusionar e integrar datos históricos y en tiempo real y apoyar la construcción automatizada de modelos urbanos [58]. El empoderamiento digital de la planificación resiliente debe priorizar la ampliación de las aplicaciones de macrodatos, la mejora de su calidad, la minería profunda y la integración multifuente. La IA puede apoyar el tratamiento automatizado de la información, la generación de textos y gráficos y la construcción de modelos de sistemas urbanos complejos, mejorando la eficiencia y la calidad de la planificación y promoviendo una resiliencia urbana inteligente y orientada por datos.

#### **4.2 Evaluación de la superposición y el acoplamiento de riesgos**

La evaluación de la superposición y el acoplamiento de riesgos constituye una línea importante de investigación sobre desastres y un componente esencial de la planificación espacial resiliente. Las técnicas están evolucionando desde la «evaluación de un solo peligro» y la «integración multifactorial» hacia el «acoplamiento multirriesgo» en sistemas urbanos complejos. Se han desarrollado modelos basados en la teoría de los sistemas de desastre, reglas de activación, el marco presión-estado-respuesta, modelos multiagente y otros enfoques [17,60-62]. Según sus resultados, las técnicas actuales pueden dividirse en dos categorías: evaluación de niveles multirriesgo, que clasifica los índices para revelar la distribución espacial; y evaluación probabilística, que analiza en profundidad las relaciones de acoplamiento y calcula probabilidades y pérdidas a escala del evento.

A medida que la urbanización incrementa la complejidad de los sistemas espaciales, una evaluación centrada en riesgos individuales y que ignore sus relaciones dejará de responder a las necesidades futuras y puede subestimar el riesgo real. Es necesario profundizar en la identificación y evaluación de los efectos espaciales dentro del entorno urbano. Las evaluaciones futuras pueden combinar la teledetección con información espacial más rica para elaborar mapas de alta precisión e identificar puntos críticos. El aprendizaje automático y profundo puede apoyar modelos matemáticos de acoplamiento y modelos de redes urbanas, permitiendo evaluaciones más detalladas e incluso dinámicas, la identificación de patrones de riesgo, el análisis de relaciones complejas y sus mecanismos de formación, y la evaluación de la sensibilidad y vulnerabilidad del espacio territorial.

#### **4.3 Deducción de escenarios y simulación**

La planificación ante el acoplamiento multirriesgo debe desarrollar deducciones de escenarios para los riesgos urbanos típicos. A partir de diversos datos, debe construir sistemas de elementos de riesgo, determinar los escenarios clave de acoplamiento, elaborar modelos evolutivos mediante evaluaciones probabilísticas e identificar el estado funcional de los elementos espaciales. De acuerdo con las regularidades de evolución de los escenarios, los modelos de lenguaje natural pueden utilizarse para construir grafos de conocimiento, formular escenarios, analizar procesos multirriesgo y extraer factores de influencia y elementos espaciales. Las redes bayesianas, las redes de Petri, los modelos hidrodinámicos y otros métodos pueden apoyar la deducción espacio-temporal de los procesos [63-66], identificar espacios de daño potencial y evaluar los efectos sobre los elementos expuestos.

Los mecanismos de resiliencia pueden estudiarse mediante modelos y simulaciones de dinámica de sistemas capaces de captar las interacciones complejas entre riesgos y explicar las relaciones entre los factores de influencia. En el futuro, la simulación urbana podrá incorporar métodos inteligentes para construir modelos multirriesgo y captar los efectos de umbral en la evolución espacial [58]. La realidad virtual, los gemelos digitales y las tecnologías relacionadas permitirán explorar con mayor profundidad las relaciones entre riesgo y regularidades espaciales, simular diversos escenarios de acoplamiento y seleccionar políticas y medidas de resiliencia efectivas.

#### **4.4 Planificación inteligente y seguimiento de la implementación**

Las tecnologías inteligentes ya proporcionan apoyo práctico a la generación, la implementación y el seguimiento de planes. Los algoritmos genéticos pueden simular la selección natural y la mutación para identificar soluciones óptimas para las estructuras espaciales resilientes. El reconocimiento inteligente de imágenes puede analizar datos urbanos obtenidos mediante teledetección e Internet de las cosas, supervisar la implementación y proporcionar retroalimentación espacial. El procesamiento automático del lenguaje puede vigilar y analizar textos de redes sociales durante emergencias, evaluar los efectos de los planes resilientes y proporcionar retroalimentación social sobre su ejecución.

La inteligencia artificial también hace posible una planificación dinámica y adaptativa. La IA generativa permite a los planificadores tomar decisiones de diseño resiliente con apoyo inteligente y producir rápidamente textos e imágenes de alta calidad [58,67]. Investigadores chinos han propuesto aplicar aprendizaje profundo por refuerzo a la planificación espacial de comunidades urbanas [68], lo que permite ajustar y actualizar dinámicamente los planes. En el futuro, las orientaciones adaptativas inteligentes podrán apoyar la implementación en entornos urbanos inciertos y cambiantes.

### **5 Conclusión**

A medida que la gestión del riesgo urbano entra en la fase 3.0, la teoría de la resiliencia urbana frente al acoplamiento multirriesgo debe profundizarse. La planificación para riesgos acoplados y normalizados es una orientación inevitable de la nueva era y un medio importante para elevar la resiliencia y coordinar las funciones ordinarias y de emergencia. Partiendo de los desafíos del desarrollo urbano futuro, este artículo ha revisado los fundamentos y las experiencias de planificación del acoplamiento multirriesgo en el espacio urbano, ha explorado las teorías y aplicaciones correspondientes y ha identificado las prioridades de la planificación espacial resiliente y de su evolución técnica.

Tres cuestiones merecen especial atención. En primer lugar, desde la perspectiva del riesgo, es necesario precisar las características y regularidades de los riesgos urbanos típicos, con especial atención a sus acoplamientos. En segundo lugar, en la relación entre riesgo y ciudad, la investigación debe examinar los efectos espaciales y sus mecanismos, determinar cómo responden los sistemas de usos del suelo, infraestructuras y edificios a riesgos múltiples y estudiar la resiliencia a partir de las interacciones entre población y territorio. En tercer lugar, en la relación entre riesgo y planificación, los planes espaciales resilientes deben incorporar el análisis de escenarios de acoplamiento para objetos multirriesgo específicos y formular, sobre esta base, medidas específicas de planificación y diseño. El estudio pretende ofrecer referencias teóricas y orientaciones metodológicas para planificar y construir ciudades seguras y resilientes en la fase 3.0 del riesgo.

### **Referencias**

- [1] Zhou Shutian, Zhai Guofang, Shi Yijun, et al. Revisión de la investigación sobre evaluación del riesgo de desastres naturales urbanos. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 180-186. [en chino]
- [2] Ni Changjian, Wang Jie. Reconsideración de la definición del riesgo de desastres naturales. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3): 1-5. [en chino]



- [3] Zhai Guofang. Respuestas resilientes a los riesgos urbanos de lluvias torrenciales e inundaciones bajo el cambio climático desde la perspectiva de la planificación: conceptos clave, enfoques básicos y marco general. *Urban Planning Forum*, 2024(1): 29-37. [en chino]
- [4] Shi Peijun. Quinta reflexión sobre la teoría y la práctica de la investigación de los sistemas de desastres. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(5): 1-9. [en chino]
- [5] Carpignano A., Golia E., Di Mauro C., et al. Enfoque metodológico para definir mapas multirriesgo a escala regional: primera aplicación. *Journal of Risk Research*, 2009, 12(3-4): 513-534.
- [6] Gallina V., Torresan S., Critto A., et al. Revisión de metodologías multirriesgo para peligros naturales: consecuencias y desafíos para evaluar los impactos del cambio climático. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168: 123-132.
- [7] Pendall R., Foster K. A., Cowell M. Resiliencia y regiones: profundizar en la comprensión de la metáfora. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, 3(1): 71-84.
- [8] Saarinen T., Hewitt K., Burton I. La peligrosidad de un lugar: ecología regional de los eventos dañinos. *Geographical Review*, 1973, 63: 134.
- [9] Komendantova N., Mrzyglocki R., Mignan A., et al. Herramientas de apoyo a la decisión multiamenaza y multirriesgo como parte de la gobernanza participativa del riesgo: retroalimentación de los actores de protección civil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 8: 50-67.
- [10] Marzocchi W., Garcia-Aristizabal A., Gasparini P., et al. Principios básicos de la evaluación multirriesgo: estudio de caso en Italia. *Natural Hazards*, 2012, 62(2): 551-573.
- [11] Kappes M. S., Keiler M., von Elverfeldt K., et al. Desafíos del análisis del riesgo multiamenaza: una revisión. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1925-1958.
- [12] de Ruiter M. C., Couasnon A., van den Homberg M. J. C., et al. Por qué ya no podemos ignorar los desastres consecutivos. *Earth's Future*, 2020, 8(3): e2019EF001425.
- [13] Terzi S., Torresan S., Schneiderbauer S., et al. Evaluación multirriesgo en regiones montañosas: revisión de enfoques de modelización para la adaptación al cambio climático. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 759-771.
- [14] Ward P. J., Daniell J., Duncan M., et al. Perspectivas invitadas: agenda de investigación sobre trayectorias de gestión del riesgo de desastres en la evaluación multirriesgo y multiamenaza. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(4): 1487-1497.
- [15] He Jinping, Li Shuangshuang. Construcción de redes de acoplamiento espacio-temporal multiamenaza: de redes multidimensionales a una red de vértice único. *Geographical Research*, 2021, 40(8): 2314-2330. [en chino]
- [16] Guo Rui, Wang Qing, Zhang Huan, et al. Mecanismos de respuesta y estrategias de construcción del entorno urbano-rural ante desastres en cascada provocados por tifones: estudio de Hongqiao, Yueqing. *Urban Planning Forum*, 2024(2): 110-118. [en chino]
- [17] Lu Ying, Hou Yunyue, Guo Liangjie, et al. Evaluación preliminar del riesgo acoplado multiamenaza en ciudades costeras: el caso de Quanzhou, Fujian. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1): 211-216. [en chino]
- [18] Wei Jiuchang. Acoplamiento y cascada de riesgos: causas complejas de la evolución de los nuevos riesgos sociales. *Xuehai*, 2019(4): 125-134. [en chino]
- [19] Liu H., Wang J., Liu J., et al. Efectos combinados y diferidos de las epidemias y el clima extremo sobre la recuperación de la movilidad urbana. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104872.
- [20] Zhang B., Li X., Wang S. Nuevo método de adaptación de casos basado en un algoritmo genético integrado mejorado para emergencias por daños del viento en redes eléctricas. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(21): 7812-7824.
- [21] Kong Feng. Efectos de acoplamiento de los desastres desde la perspectiva de los sistemas de desastre. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(1): 1-5. [en chino]

- [22] Shi Peijun, Lü Lili, Wang Ming, et al. Sistemas de desastre: grupos, cadenas y encuentros de peligros. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 1-12. [en chino]
- [23] Pescaroli G., Alexander D. Comprender los riesgos compuestos, interconectados, interactivos y en cascada: un marco holístico. *Risk Analysis*, 2018, 38(11): 2245-2257.
- [24] Zscheischler J., Westra S., van den Hurk B. J. J. M., et al. Riesgos climáticos futuros derivados de eventos compuestos. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.
- [25] Zscheischler J., Martius O., Westra S., et al. Tipología de eventos meteorológicos y climáticos compuestos. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(7): 333-347.
- [26] Hao Z. Eventos compuestos e impactos asociados en China. *iScience*, 2022, 25(8): 104689.
- [27] Folke C. Resiliencia: surgimiento de una perspectiva para el análisis de sistemas socioecológicos. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [28] Meerow S., Newell J. P., Stults M. Definir la resiliencia urbana: una revisión. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [29] Shao Yiwen, Xu Jiang. Resiliencia urbana: interpretación conceptual a partir de una revisión internacional de la literatura. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54. [en chino]
- [30] Yan Wentao, Li Zihao, Jian Tianyu, et al. Renovación ecológica de comunidades antiguas orientada a la salud del entorno atmosférico: marco teórico y práctica de casos. *Urban Development Studies*, 2022, 29(1): 121-132. [en chino]
- [31] Kondo T., Lizarralde G. Mala adaptación, fragmentación y otros efectos secundarios de la planificación urbana centralizada posterior a desastres: el caso del desastre «en cascada» de 2011 en Japón. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 58: 102219.
- [32] Zeng Jian, Zuo Chang'an. Estrategias de prevención y reducción de desastres en la planificación y el diseño espacial de los distritos centrales de negocios. *Architectural Journal*, 2010(11): 75-79. [en chino]
- [33] Lin Zhanpeng. Planificación de parques y espacios verdes para la prevención de desastres en ciudades de alta densidad: el caso de Hong Kong. *Chinese Landscape Architecture*, 2008(9): 37-42. [en chino]
- [34] Xue Ye, Liu Yaolong, Zhang Taotao. Mecanismos de formación del riesgo de desastres acoplados. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2): 44-50. [en chino]
- [35] Chen Weike, Zhang Xin. Dinámica del acoplamiento multifactorial de incendios y explosiones en el almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(6): 49-54. [en chino]
- [36] Li Hongnan, Li Gang, Zheng Xiaowei, et al. Avances de la investigación sobre estructuras de ingeniería sometidas a la acción acoplada de múltiples peligros. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(5): 1-14. [en chino]
- [37] Acemoglu D., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. Riesgo sistémico y estabilidad en redes financieras. *American Economic Review*, 2015, 105(2): 564-608.
- [38] Peng Chong, Guo Zuyuan, Peng Zhongren. Avances teóricos y prácticos de la resiliencia comunitaria en el extranjero. *Urban Planning International*, 2017, 32(4): 60-66. [en chino]
- [39] Cai Jianming, Guo Hua, Wang Degen. Revisión de la investigación internacional sobre ciudades resilientes. *Progress in Geography*, 2012, 31(10): 1245-1255. [en chino]
- [40] Alberti M., Marzluff J. M. Resiliencia ecológica en ecosistemas urbanos: vinculación de los patrones urbanos con las funciones humanas y ecológicas. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 241-265.
- [41] Jabareen Y. Planificar la ciudad resiliente: conceptos y estrategias para afrontar el cambio climático y el riesgo ambiental. *Cities*, 2013, 31: 220-229.
- [42] Adger W. N. Resiliencia social y ecológica: ¿están relacionadas? *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347-364.

- [43] Adger W. N., Safra de Campos R., Siddiqui T., et al. Comentario: desigualdad, precariedad y ecosistemas sostenibles como componentes de la resiliencia urbana. *Urban Studies*, 2020, 57(7): 1588-1595.
- [44] Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., et al. Marco para evaluar cuantitativamente y mejorar la resiliencia sísmica de las comunidades. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [45] Lovell S. T., Taylor J. R. Prestación de servicios ecosistémicos urbanos mediante infraestructura verde multifuncional en Estados Unidos. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [46] Meerow S., Newell J. P. Planificación espacial de infraestructura verde multifuncional: fortalecimiento de la resiliencia en Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159: 62-75.
- [47] Martin R., Sunley P. Sobre la noción de resiliencia económica regional: conceptualización y explicación. *Journal of Economic Geography*, 2015, 15(1): 1-42.
- [48] Yang L., Yang H., Zhao X., et al. Estudio de la resiliencia urbana desde la perspectiva de la teoría de sistemas adaptativos complejos: el caso de la aglomeración Lanzhou-Xining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(20): 13667.
- [49] Simmie J., Martin R. Resiliencia económica de las regiones: hacia un enfoque evolutivo. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, 3(1): 27-43.
- [50] Chen Mengyuan. Avances de la investigación internacional sobre resiliencia económica regional: introducción de un marco teórico evolutivo. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1435-1444. [en chino]
- [51] Xie W., Sun C., Lin Z. Evolución espacio-temporal de la resiliencia de la forma urbana frente a perturbaciones climáticas en el ciclo adaptativo: el caso de Changchun. *Urban Climate*, 2023, 49: 101461.
- [52] Zheng Yan, Zhai Jianqing, Wu Zhanyun, et al. Clasificación y evaluación de ciudades resilientes basadas en el ciclo adaptativo: programas piloto chinos de ciudades esponja y ciudades adaptadas al clima. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(3): 31-38. [en chino]
- [53] Zhu Jinxia, Pan Yi, Zhang Yanbin, et al. Umbrales críticos de los efectos del cambio de los tipos de cultivo sobre la resiliencia de los sistemas de tierras agrícolas. *China Land Science*, 2022, 36(4): 49-58. [en chino]
- [54] Folke C., Carpenter S., Walker B., et al. Cambios de régimen, resiliencia y biodiversidad en la gestión de ecosistemas. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35(1): 557-581.
- [55] Tang Haiping, Chen Jiao, Xue Haili. Umbrales ecológicos: conceptos, métodos y perspectivas de investigación. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 932-940. [en chino]
- [56] Yan Wentao, Ren Jie, Zhang Shangwu, et al. Planificación de la ciudad resiliente en Shanghái: cuestiones clave, marco general y estrategias. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 19-28. [en chino]
- [57] Dai Shenzhi, Liu Tingting, Gao Xiaoyu, et al. Sistema de elaboración y mecanismos de implementación de la planificación territorial para la prevención y reducción de desastres. *Urban Planning Forum*, 2023(1): 48-53. [en chino]
- [58] Herzog O., Pan Haixiao, Deng Zhituan, et al. Inteligencia artificial de nueva generación para la planificación urbana: oportunidades y desafíos. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 1-11. [en chino]
- [59] Peng Z. R., Lu K. F., Liu Y., et al. Trayectoria de la inteligencia artificial en la planificación urbana: del apoyo a la planificación a la elaboración de planes. *Journal of Planning Education and Research*, 2023, 0(0): 0739456X231180568.
- [60] Xue Ye, Chen Baozhang, Huang Chongfu, et al. Modelo jerárquico flexible para la evaluación integrada del riesgo multiamenaza. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 353-360. [en chino]
- [61] Niu Yanhe, Jiao Sheng, Cao Tingting, et al. Evaluación del riesgo urbano multiamenaza y respuesta de planificación basada en el modelo PSR. *Urban Development Studies*, 2022, 29(4): 39-48. [en chino]

- [62] Wang Fei, Yin Zhan'e, Wen Jiahong. Modelo multiagente para la evaluación dinámica del riesgo de desastres naturales. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(2): 85-88. [en chino]
- [63] Rao Wenli, Luo Nianxue. Construcción de escenarios y deducción espacio-temporal de marejadas ciclónicas provocadas por tifones. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(2): 187-197. [en chino]
- [64] Li Siyu, Liang Da, Wei Yanfang, et al. Modelización cuantitativa de la cadena sequía-incendio forestal basada en una red bayesiana. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(1): 38-46. [en chino]
- [65] Li Yongjian, Wang Xunqing, Qiao Xiaojiao. Modelo de evolución de desastres secundarios posteriores a terremotos basado en redes de Petri estocásticas. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(4): 264-273. [en chino]
- [66] Chen Bilin, Li Yinglong. Evaluación planificadora de la transformación adaptativa de ciudades costeras de alta densidad orientada a la resiliencia frente a inundaciones: el sector de Mangrove Bay en Shenzhen. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 77-86. [en chino]
- [67] Gan Wei, Wu Zhiqiang, Wang Yuankai, et al. Construcción de un modelo teórico de diseño urbano asistido por AIGC. *Urban Planning Forum*, 2023(2): 12-18. [en chino]
- [68] Zheng Y., Lin Y., Zhao L., et al. Planificación espacial de comunidades urbanas mediante aprendizaje profundo por refuerzo. *Nature Computational Science*, 2023, 3(9): 748-762.

Revisado: junio de 2024

Traducción asistida por IA