

Simulación espaciotemporal basada en agentes de los círculos de vida comunitarios integrando elección discreta y modelización basada en agentes: construcción del modelo teórico y marco de investigación

Autores

Che Guanqiong; Qiu Baoxing; Wang Yitian; Lan Xu

Resumen

El desempeño de los servicios en un círculo de vida comunitario depende de comprender cómo interactúan las actividades heterogéneas de los residentes con la distribución de los equipamientos. La investigación reciente ha pasado del análisis espacial estático a las actividades espaciotemporales dinámicas, los proyectos individuales de escala micro y la simulación de decisiones conductuales. Sin embargo, aún existen limitaciones para cuantificar las preferencias individuales y representar de manera sistemática las dimensiones de la decisión; tampoco se han esclarecido suficientemente la interacción entre individuos heterogéneos y espacio ni los mecanismos de emergencia ascendente. Tomando el sistema "proyecto-actividad" de la geografía del tiempo como prototipo teórico, este estudio propone un marco integrado que combina el modelo Logit mixto con la modelización basada en agentes. El marco comprende tres etapas: configurar agentes residentes y espaciales con atributos estáticos y dinámicos; diseñar y estimar mecanismos de decisión que reflejen la heterogeneidad de las preferencias individuales; y ejecutar simulaciones ABM que integren planificación, ejecución y retroalimentación. Así, la distribución estadística de la heterogeneidad de las preferencias de los residentes se incorpora a un modelo de simulación por agentes, generando un circuito de retroalimentación entre modelización teórica y validación práctica. Se proponen cuatro escenarios de aplicación: evaluación dinámica y multidimensional del desempeño de los servicios del círculo de vida; análisis atributivo de los mecanismos de interacción entre personas y círculos de vida; configuración de la polisemia espacial y construcción de escenarios a partir de la simulación de actividades; y predicción de escenarios y evaluación de intervenciones en la evolución de los círculos de vida. El marco ofrece un modelo computable para analizar la complejidad y la heterogeneidad de la interacción persona-espacio en los círculos de vida comunitarios y apoya una gobernanza de renovación precisa y centrada en las personas.

Palabras clave

simulación del comportamiento espaciotemporal; modelo Logit mixto; modelo basado en agentes; círculo de vida comunitario; planificación centrada en las personas

1 Avances teóricos y metodológicos en la investigación sobre círculos de vida

Con la profundización de la estrategia china de nueva urbanización, la estructura espacial urbana y la vida social se han reorganizado profundamente, y el espacio social se ha vuelto más diverso, dinámico y complejo [1-3]. Un paradigma de investigación en planificación centrado en el espacio físico estático ya no puede explicar de manera efectiva las necesidades diversas de los residentes, sus comportamientos dinámicos ni sus interacciones complejas con el entorno espacial. Por ello, el estudio de los procesos de interacción persona-espacio y de los mecanismos de decisión bajo restricciones espaciotemporales multiescala resulta indispensable para comprender la complejidad y la temporalidad anidada del espacio social urbano, y también responde a la estrategia de nueva urbanización centrada en las personas [4-5].

En este contexto, el círculo de vida comunitario es un campo activo que sostiene y articula múltiples actividades de los residentes y media de forma continua intercambios materiales, informativos y emocionales. No solo constituye un soporte micro de la interacción persona-espacio, sino también un mediador clave entre individuo, sociedad y espacio. Por ello se ha convertido en una entrada fundamental para analizar los mecanismos de interacción persona-espacio y aplicar la idea de ciudad del pueblo [6-7]. Dicha interacción posee un marcado carácter procesual, visible en la evolución continua de las trayectorias de actividad y en la dependencia secuencial de las decisiones espaciotemporales. También es profundamente compleja, pues emerge de la heterogeneidad individual, las redes sociales, el entorno espacial, las instituciones y la cultura [8-9].

No obstante, los estudios existentes suelen depender de datos estáticos "fijados" en distritos administrativos o unidades censales, o de datos transversales que homogenizan a los individuos dentro de los grupos. Estos datos ofrecen instantáneas en algunos momentos, pero no captan eficazmente los procesos de actividad de individuos diferenciados bajo restricciones espaciotemporales ni su interacción dinámica con el entorno construido [4]. Esta limitación teórica y metodológica produce un desajuste entre la configuración del círculo de vida y las necesidades reales de actividad de los residentes, lo que dificulta una gobernanza espacial de alta calidad centrada en las personas.

Por tanto, este estudio se centra en dos preguntas nucleares. En el plano teórico, ¿cómo superar el análisis estático por instantáneas y explicar con precisión las asociaciones dinámicas y los patrones emergentes entre secuencias de actividad individual y decisiones espaciales? En el plano práctico, ¿cómo construir herramientas que simulen la interacción real entre personas y espacio y ofrezcan apoyo decisonal fino y dinámico para configurar equipamientos y optimizar el espacio de los círculos de vida? Para responder, el artículo combina el concepto de "proyecto" de la geografía del tiempo, que subraya las restricciones duales entre intenciones subjetivas de actividad y condiciones objetivas, así como el vínculo dinámico entre secuencias de actividad y elección espacial, con la modelización basada en agentes impulsada por IA. Se propone un modelo de simulación espaciotemporal basada en agentes para los círculos de vida comunitarios que integra tiempo, espacio y actividad [10-12]. Centrado en agentes residentes con características heterogéneas, el modelo emplea un modelo de elección discreta para representar el proceso "evaluación espacial - elección - desplazamiento" y utiliza simulaciones de escenarios para revelar cómo interactúan los residentes individuales con el espacio de vida bajo múltiples restricciones. De este modo ofrece un paradigma analítico ascendente que responde dinámicamente al comportamiento individual.

1.1 Del espacio estático a la actividad espaciotemporal dinámica

Impulsada por la integración de la planificación urbana-rural, la geografía del tiempo, la geografía conductual y nuevas tecnologías como los macrodatos espaciotemporales, la investigación sobre círculos de vida ha pasado del espacio físico a las actividades de la población y de los lugares nodales a las redes de flujo. Los estudios tempranos partían de una ontología espacial y continuaban teorías tradicionales de planificación, como la teoría de zonas concéntricas y la unidad vecinal. Consideraban el círculo de vida como un contenedor espacial estático, claramente delimitado y de forma anular [13]. Desde esta perspectiva, la investigación se centraba en la organización espacial interna, con el objetivo de revelar rasgos macroestructurales y combinaciones de usos residenciales, comerciales, verdes y otros [14]. También se emplearon métodos de econometría espacial y SIG para evaluar el desempeño y la

equidad de los equipamientos públicos, proporcionando evidencia para una asignación estandarizada de recursos espaciales [15-16].

A medida que las actividades humanas se hicieron más móviles y anidadas, la construcción de círculos de vida requirió teorías y métodos que partieran de los sistemas de actividad para estudiar las relaciones persona-espacio. La introducción de la geografía del tiempo produjo un cambio paradigmático. Con los conceptos de trayectorias y prismas espaciotemporales, los investigadores pudieron describir recorridos reales de actividad y conjuntos potenciales de oportunidades, desplazando la atención de espacios de actividad estáticos y nodales hacia procesos de actividad y redes de flujo [17-19]. Al mismo tiempo, los avances en macrodatos espaciotemporales enriquecieron las trayectorias individuales y los datos de actividad urbana, impulsando la investigación hacia la inducción de patrones de actividad, la identificación de niveles y funciones del círculo de vida y el análisis de mecanismos del espacio de actividad [20]. Los estudios han abordado la delimitación de jerarquías, estructuras y tipos de círculos de vida a partir de trayectorias espaciotemporales [21-22], el acoplamiento demanda-comportamiento-oferta de equipamientos de servicio [23-24], la evaluación de eficiencia y vitalidad espacial a partir del comportamiento espaciotemporal [25], los mecanismos del entorno construido que afectan dicho comportamiento [26-29] y la diferenciación social en los comportamientos de los círculos de vida [30-31]. Estos trabajos ofrecen un sólido apoyo teórico para la identificación funcional precisa, el análisis de la interacción personas-espacio y la mejora de la calidad de vida centrada en las personas.

1.2 De la actividad espaciotemporal macro a los proyectos individuales micro

La geografía del tiempo y la geografía conductual han introducido una perspectiva centrada en las personas y basada en la actividad en la investigación de los círculos de vida, pero la mayoría de los estudios todavía resume los patrones de actividad espaciotemporal a nivel agregado. Consideran de forma insuficiente las diferencias individuales, la percepción espacial y las restricciones socioeconómicas, lo que dificulta examinar los mecanismos de actividad y las asociaciones secuenciales bajo las restricciones duales de individuos y entornos. En consecuencia, la investigación suele permanecer en la observación ex post y no apoya adecuadamente la predicción ex ante [2,8].

Como respuesta, estudios relacionados han propuesto el concepto de proyecto, enfatizando que las actividades están estrechamente vinculadas con las intenciones y planes individuales, aunque también se ven restringidas por la capacidad, el acoplamiento y la autoridad [32-33]. El concepto de proyecto supera la clasificación por rasgos de actividad y clasifica las actividades según la manera en que las intenciones individuales y las situaciones externas organizan conjuntamente la acción. Así profundiza la comprensión de los efectos combinados de la agencia subjetiva y las restricciones objetivas en los contextos de actividad, y ofrece un nuevo marco analítico para explicar los mecanismos procesuales del comportamiento espaciotemporal y la complejidad de los sistemas de actividad [1,6].

Dentro de este marco, investigadores chinos e internacionales han estudiado los sistemas cotidianos "proyecto-actividad" en tres ámbitos. Primero, los estudios sobre bienestar social y equidad revelan diferencias en proyectos de vida, dificultades espaciotemporales y efectos sociales entre grupos. Se centran en commuters, mujeres, personas mayores y grupos de bajos ingresos, analizando restricciones y estrategias de adaptación relacionadas con la distancia empleo-vivienda, las responsabilidades familiares, la capacidad física y la capacidad económica [34-41]. Segundo, se examina cómo el cambio tecnológico reconfigura la forma y la flexibilidad de los proyectos. La movilidad inteligente y los servicios de reparto pueden reducir las restricciones de capacidad sobre el desplazamiento y hacer posibles

secuencias de actividad complejas y multiobjetivo [23,42-44]. Tercero, se han desarrollado encuestas y visualizaciones con macrodatos multimodales. Los datos de localización y trayectorias, los datos de redes sociales y la ciencia social computacional permiten representar con alta resolución las trayectorias espaciotemporales de grupos sociales y ayudan a identificar las restricciones detrás de trayectorias de proyecto específicas, desplazando la medición del proyecto desde la descripción macro hacia la precisión micro y el análisis dinámico [12,45].

1.3 De los modelos conceptuales del proyecto a la simulación de decisiones conductuales

La formulación y aplicación del concepto de proyecto han trasladado la investigación de la vida cotidiana desde el nivel colectivo macro hacia el nivel individual micro. Los estudios existentes han propuesto algoritmos para construir espacios de actividad individuales a partir de anclajes de actividad [46]. Otros trabajos han empleado modelos de elección discreta basados en la teoría de la utilidad aleatoria, combinados con simulación multiagente, para analizar la elección de destinos y rutas bajo restricciones conjuntas de intenciones del agente, entorno construido y asignación temporal [47-49]. Estas investigaciones confirman la viabilidad de la modelización basada en agentes para simular microcomportamientos, pero en su mayoría se mantienen en la simulación de poblaciones tipificadas. La expresión cuantitativa de preferencias y diferencias individuales requiere mayor profundización.

Por ello, este estudio adopta el sistema "proyecto-actividad" de la geografía del tiempo como prototipo teórico. Entiende la toma de decisiones como evaluación de utilidad y elección por individuos con preferencias heterogéneas dentro de un campo de oportunidades y restricciones definido por el entorno construido. Operativamente, combina el modelo Logit mixto con la modelización basada en agentes para construir un modelo de simulación espaciotemporal de las actividades cotidianas. En el modelo, los agentes espaciotemporales representan individuos. Bajo las restricciones conjuntas de las condiciones externas formadas por el entorno construido y las preferencias internas, los agentes toman decisiones de actividad según la maximización de la utilidad. Los parámetros de preferencia que reflejan heterogeneidad individual se estiman mediante el modelo Logit mixto, estableciendo un mecanismo de evaluación de utilidad y decisión bajo la acción conjunta de "restricciones-preferencias". El modelo puede evaluar cuantitativamente la contribución y los umbrales efectivos de factores no observables, como las preferencias individuales, a los resultados espaciotemporales de las actividades diarias, y puede predecir cambios macro mediante el ajuste de parámetros. Así profundiza la comprensión del mecanismo de interacción entre individuos, decisiones, actividades, tiempo y espacio, y proporciona una base decisional para la renovación y gobernanza de los círculos de vida que incorpora la heterogeneidad individual.

2 Construcción de un modelo de simulación espaciotemporal basada en agentes para círculos de vida comunitarios

El modelo se describe mediante el marco ODD habitual para modelos basados en agentes, es decir, "overview - design concepts - details" [50]. La visión general incluye los propósitos de simulación, los agentes del modelo y la selección de variables; los conceptos de diseño abordan las reglas de decisión de los agentes espaciotemporales; y los detalles del modelo incluyen operación y validación.

2.1 Propósito de la construcción del modelo

Para abordar la incapacidad de los estudios existentes de captar las preferencias individuales heterogéneas y su interacción dinámica con los entornos espaciales, este estudio integra modelos de elección discreta y modelización basada en agentes para construir una plataforma de simulación

impulsada por preferencias individuales y retroalimentada por entornos espaciotemporales. Se centra en tres preguntas. Reconocimiento de patrones: ¿qué patrones de actividad espaciotemporal emergen de la interacción dinámica entre elecciones heterogéneas de actividad-viaje y entornos espaciales multicapa? Exploración de mecanismos: ¿cómo interactúan las preferencias heterogéneas con sistemas espaciales-sociales complejos mediante retroalimentación, y cuáles son los factores clave y los umbrales efectivos? Evaluación de políticas: ¿qué efectos diferenciados producen los esquemas de diseño alternativos sobre el círculo de vida en su conjunto y sobre los individuos?

2.2 Agentes y variables del modelo: configuración de agentes espaciotemporales

2.2.1 Agentes residentes

Los agentes residentes poseen capacidad activa y adaptativa de decisión. A partir de sus objetivos, preferencias, estados actuales y percepciones del entorno, evalúan la utilidad y eligen activamente destinos, rutas y arreglos temporales. Sus atributos constituyen los factores básicos que influyen en las decisiones de actividad. Incluyen atributos estáticos y dinámicos, con parámetros derivados de datos macroestadísticos, encuestas micro y resultados de calibración del modelo [51-52]. Los atributos estáticos definen características sociodemográficas y preferencias estables de largo plazo, y sirven de base para generar patrones iniciales de actividad y parámetros de decisión. Los atributos dinámicos registran estados en tiempo real durante la simulación y son tanto base como resultado de las decisiones.

Tabla 1. Atributos de los agentes residentes y fuentes de datos

Grupo de atributos	Variables	Significado principal	Fuentes de datos
Estáticos: atributos sociodemográficos	Edad; ocupación; estructura del hogar; ingresos; ubicación residencial; posesión de medios de transporte	Reflejan diferencias en demanda de actividad, capacidad de movilidad, restricciones temporales, secuenciación de actividades, sensibilidad al costo, capacidad de consumo, accesibilidad espacial, elección modal y alcance potencial de actividad	Datos censales; datos de malla comunitaria; datos inmobiliarios
Estáticos: parámetros internos de preferencia	Sensibilidad al tiempo; sensibilidad al costo; preferencia por calidad del equipamiento; aversión a la multitud; coeficiente de inercia	Expresan sensibilidad al tiempo y al costo monetario, atención al entorno y calidad del servicio, rechazo de la congestión y preferencia por espacios y equipamientos familiares incluso cuando no son óptimos	Registros de actividad; estimación de parámetros Logit mixto
Dinámicos: estado	Programa diario de actividades; ubicación	Registran secuencias de actividad planificadas y ejecutadas,	Registros de actividad; datos

espaciotemporal	actual; actividad actual; estado de movimiento	coordenadas actuales, tipo y hora de inicio de la actividad actual, ruta y tiempo de viaje restante	de servicios basados en localización
Dinámicos: estado fisiológico y psicológico	Fatiga; urgencia; satisfacción o utilidad acumulada	Reflejan resistencia a la actividad, presión temporal antes de la siguiente actividad fija y utilidad acumulada de actividades completadas	Registros de actividad; datos de servicios basados en localización
Dinámicos: memoria, recursos y restricciones	Memoria y aprendizaje; presupuesto diario de costos; presupuesto diario de tiempo; lista de tareas	Afectan elecciones posteriores y registran límites diarios de gasto, tiempo discrecional restante y tareas fijas o flexibles por completar	Registros de actividad; encuestas conductuales; actualizaciones de simulación

2.2.2 Agentes del entorno espacial del círculo de vida

El entorno espacial del círculo de vida es objeto de decisión, soporte de actividad y marco de restricciones para los agentes residentes. Se representa como un plano bidimensional compuesto por puntos, líneas y polígonos: los puntos representan equipamientos de servicio que atraen a los agentes residentes, las líneas representan rutas transitables y los polígonos representan entidades edificadas. Los agentes del entorno espacial tienen atributos estáticos y dinámicos. Los atributos estáticos reflejan cualidades tridimensionales y estructuras topológicas del entorno espacial, formando un sistema de indicadores que cubre la estructura de la red vial, los equipamientos funcionales y la calidad ambiental. Estos atributos se almacenan en el espacio bidimensional como información descriptiva y actúan como factores de cognición y evaluación espacial de los agentes residentes. Los atributos dinámicos reflejan rasgos variables en el tiempo, como ocupación y congestión actuales; retroalimentan en tiempo real mediante variables de la función de utilidad e influyen en decisiones de actividad posteriores.

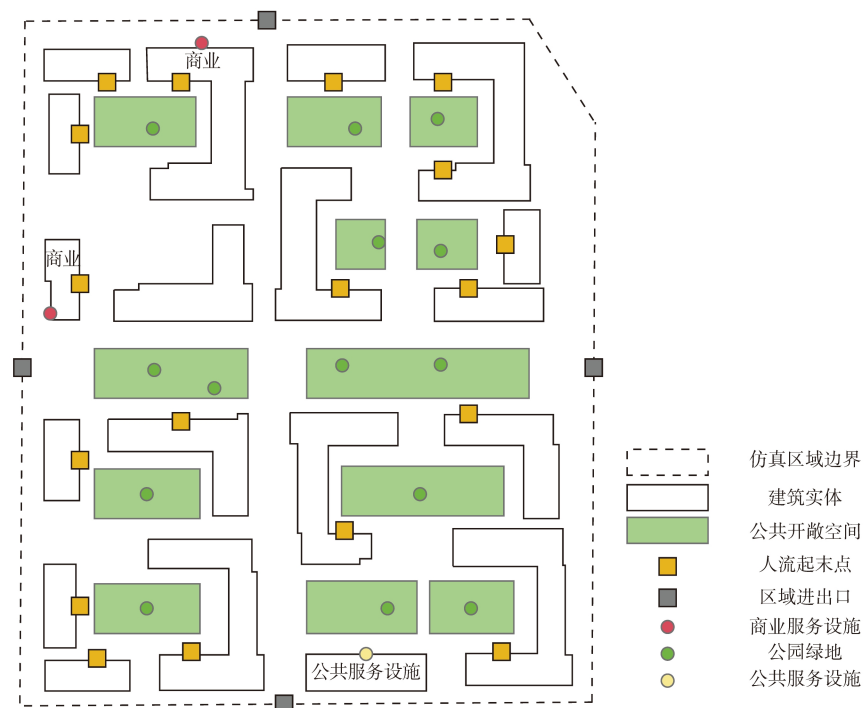


Figura 1. Entorno espacial virtual.

Tabla 2. Sistema de indicadores del entorno espacial

Indicador primario	Indicador secundario	Significado	Fuentes de datos
Red vial	Longitud; anchura; densidad de red vial; cercanía o integración; intermediación o elección	Miden longitud y anchura de las vías, densidad de red dentro de distintos rangos de círculo de vida, accesibilidad de las calles y potencial de atraer flujos orientados a destinos, así como probabilidad de ser atravesadas por flujos pasantes	Datos de planificación; OpenStreetMap y otros macrodatos
Equipamientos funcionales	Escala; distribución; densidad; relación de superficie; mezcla; horarios de apertura	Miden escala, distribución espacial, densidad, relación de superficie, mezcla funcional y tiempo de servicio de los equipamientos en el círculo de vida	Macrodatos POI; levantamiento de campo
Calidad ambiental	Cobertura verde; factor de visión del cielo; relación anchura-altura de la calle;	Reflejan vegetación de parques y calles, visibilidad del cielo en nodos viales, relación entre	Imágenes de teledetección; levantamiento

	proporción de fachada	anchura de calle y altura edificada, y proporción de frente edificado respecto a la longitud de la línea roja vial	de campo
--	-----------------------	--	----------

2.3 Diseño del modelo: configuración del mecanismo de decisión y estimación de parámetros

El mecanismo de decisión de los agentes es el puente computacional entre el comportamiento individual micro y los fenómenos sistémicos macro. En comparación con investigaciones previas, la innovación central del modelo es la introducción del Logit mixto. Las distribuciones de heterogeneidad de parámetros se emplean para etiquetar diferencias individuales entre agentes residentes, permitiendo que agentes con parámetros personalizados tomen decisiones e interactúen en un entorno virtual. Esto permite revelar con mayor profundidad los efectos de preferencias individuales no observables sobre los patrones espaciotemporales y el desempeño espacial del círculo de vida. El modelo incluye dos pasos: definir el conjunto de elección de actividad y construir y estimar la función de utilidad de los planes de actividad.

2.3.1 Definición del conjunto de elección de actividad

A partir de registros de actividad y datos del entorno espacial del círculo de vida, el modelo genera para cada agente residente un conjunto factible de patrones de actividad C_n bajo restricciones de capacidad, acoplamiento y autoridad. El conjunto incluye patrones j_n como "hogar-trabajo-hogar" o "hogar-llevar al niño a la escuela-trabajo-compras-hogar". Cada patrón posee atributos como tiempo de viaje, costo monetario y tipo de actividad, que luego se utilizan en la evaluación de utilidad para elegir actividades.

2.3.2 Construcción de la función de utilidad y estimación de parámetros

Una vez generado el conjunto factible personalizado C_n , cada agente residente evalúa y elige entre planes diarios posibles de acuerdo con preferencias heterogéneas, vinculando atributos del decisor con alternativas de elección de actividad. Se introduce un modelo de elección discreta basado en la teoría de la utilidad aleatoria. En concreto, el modelo Logit mixto se emplea para construir y estimar la función de utilidad y los parámetros de cada patrón de actividad j , impulsando así un comportamiento de elección probabilístico.

Para el agente residente n , la utilidad aleatoria U_{nj} de elegir el patrón j se compone de un término determinista observable V_{nj} y un término aleatorio no observable ϵ_{nj} :

$$U_{nj} = V_{nj} + \epsilon_{nj} \quad (1)$$

La utilidad observable V_{nj} se define como combinación lineal de los atributos X_{nj} del patrón de actividad j :

$$V_{nj} = \beta_n X_{nj} \\ = \beta_{n1} T_{nj} + \beta_{n2} C_{nj} + \sum_{m \in M} \gamma_{nm} D_{jm} \quad (2)$$

Aquí, $\beta_n = (\beta_{n1}, \beta_{n2}, \gamma_{n1}, \gamma_{n2}, \dots)$ es el vector aleatorio de coeficientes de preferencia del agente residente n . Varía entre individuos para captar la heterogeneidad de preferencias. T_{nj} es el tiempo total de viaje del patrón j ; C_{nj} es el costo monetario total; M es el conjunto de tipos de actividad, incluidos trabajo, compras y ocio; m es un tipo específico en M ; y D_{jm} es una variable ficticia binaria. Si el patrón j incluye la actividad m , $D_{jm} = 1$; en caso contrario $D_{jm} = 0$. γ_{nm} es el coeficiente de preferencia del agente n por el tipo de actividad m . $\gamma_{nm} > 0$ indica preferencia, mientras que $\gamma_{nm} < 0$ indica aversión.

El ajuste central es que β_n no es una constante fija, sino un vector que varía aleatoriamente entre individuos y capta la heterogeneidad de preferencias que no explican las variables observables. Puede utilizarse el método de máxima verosimilitud simulada para estimar la distribución de estos parámetros a partir de encuestas de registros de actividad de los residentes y obtener una distribución estadística cuantitativa de la heterogeneidad de preferencias en el área de estudio. Durante la inicialización posterior del ABM, cada agente residente n extrae de forma independiente un vector específico β_n desde la distribución estimada, que luego se fija. Cada agente posee así una lógica de decisión única y estable, coherente con regularidades conductuales empíricas. Esto desplaza el modelo desde una inferencia simple basada en reglas hacia una simulación basada en comportamiento empírico, mejorando su poder explicativo y validez predictiva.

2.4 Operación y validación del modelo

2.4.1 Inicialización del modelo

La inicialización busca generar un campo virtual coherente con el entorno espacial real del círculo de vida y las características de la población. Puede implementarse en plataformas como NetLogo y AnyLogic e incluye tres módulos secuenciales. Primero, se digitaliza el entorno espacial: con datos GIS de alta precisión se importan o vectorizan en la plataforma la topología de la red vial, las huellas edificadas, los puntos de equipamientos públicos y otra información geográfica digital, y se configuran atributos estáticos y dinámicos conforme al sistema de indicadores de agentes espaciales. Segundo, se generan agentes residentes: mediante algoritmos como el ajuste proporcional iterativo y datos censales multidimensionales se crea una lista de agentes residentes virtuales coherente con las características demográficas reales del círculo de vida. Para cada agente se extrae un vector aleatorio único β_n de la distribución de preferencias previamente estimada por el Logit mixto, representando sus preferencias internas. Tercero, se realiza el emparejamiento espacial e inicialización de agentes residentes: la lista generada se asigna a edificios residenciales según unidades estadísticas, completando la inicialización de anclajes espaciales. Luego se generan conjuntos de elección de actividad según los roles sociales de los agentes y, al inicio de la simulación, se selecciona y ejecuta probabilísticamente un plan de actividad para obtener un programa inicial y un estado espaciotemporal.

2.4.2 Ciclo dinámico planificación-ejecución-retroalimentación

Tras la inicialización, el modelo entra en un ciclo iterativo compuesto por decisiones diarias de planificación de baja frecuencia, decisiones actividad-equipamiento-ruta de alta frecuencia y retroalimentación espacial. El ciclo tiene cuatro pasos. Primero, configuración y percepción del estado espacial. Al inicio de cada paso t , el estado ambiental se fija o actualiza según los resultados de las acciones de los agentes en la ronda anterior, convirtiéndose en entrada para la percepción espacial de la ronda actual. Segundo, decisión y acción de los agentes residentes. Se establecen condiciones de activación para la planificación diaria y la ejecución de actividades, seguidas por un modelo de decisión de dos niveles: planificación diaria y elección actividad-equipamiento-ruta. En la planificación diaria, cada agente calcula la utilidad aleatoria U_{nj} de cada patrón j en su conjunto factible personalizado C_n según sus coeficientes β_n , y extrae un patrón de acuerdo con las probabilidades generadas por el Logit mixto como plan general j del día. *En la elección actividad-equipamiento-ruta, a partir del patrón j , el agente elige un equipamiento específico f del conjunto de equipamientos alcanzables en ese momento en tiempo y espacio, según la función de utilidad, completando la elección de destino. Luego se calcula la utilidad de ruta a partir del tiempo de viaje esperado y se elige una ruta probabilísticamente*

mediante el modelo Logit [52]. Tercero, registro de datos. El modelo registra trayectorias espaciotemporales completas, registros de actividad, utilidad acumulada y secuencias de decisión de cada agente residente, así como estados macro de uso, como densidad peatonal y tipos de actividad en los equipamientos espaciales. Estos datos apoyan la validación posterior y la evaluación de efectos de planificación. Cuarto, actualización de datos e iteración del modelo. Tras estos pasos se actualizan estados internos de agentes y estados espaciales, y comienza una nueva ronda de percepción, decisión, acción y registro. Mediante la iteración, las decisiones de los residentes remodelan continuamente los estados espaciales, creando o aliviando congestión, mientras los estados espaciales actualizados se convierten en parámetros de entrada que influyen en decisiones posteriores. Así emergen dinámicamente múltiples niveles de patrones de actividad espaciotemporal.

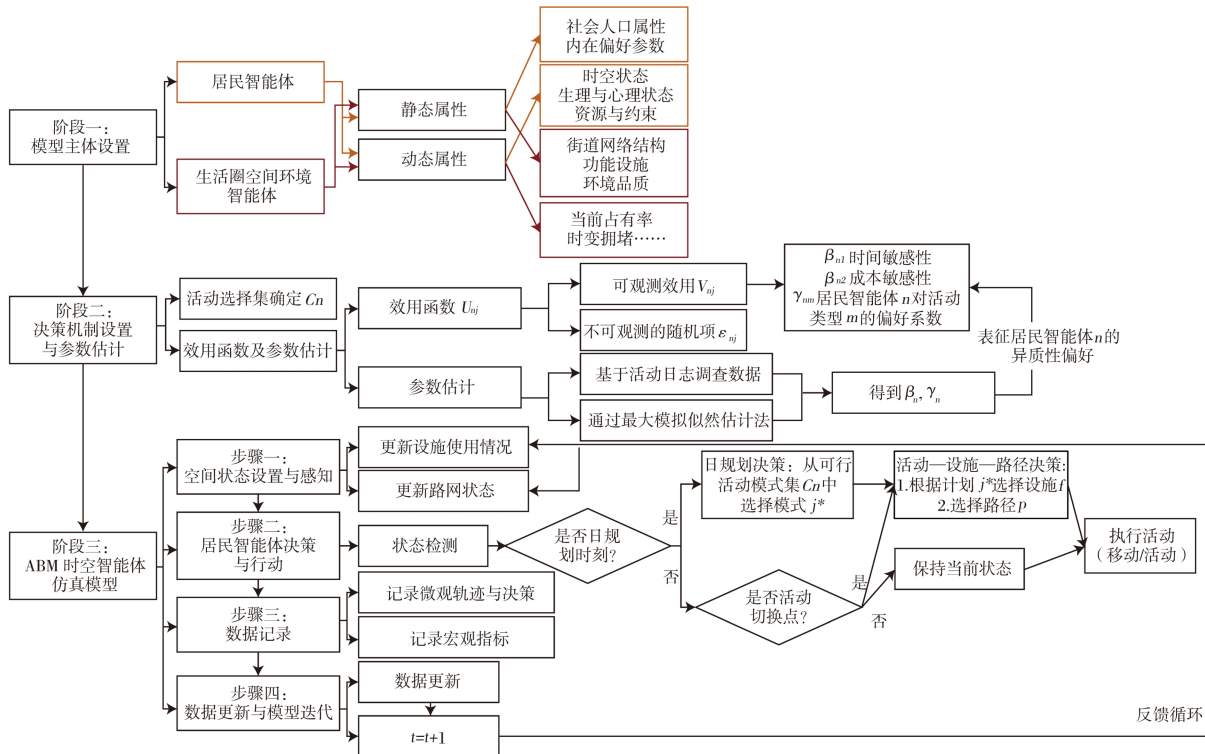


Figura 2. Flujo de estimación de parámetros y simulación del modelo espaciotemporal basado en agentes.

2.4.3 Verificación de la validez del modelo

Para evaluar validez y credibilidad, y asegurar que el modelo funcione como plataforma fiable de experimentación computacional para explicar mecanismos de decisión de actividades residenciales y predecir efectos de intervenciones espaciales, se establece un marco de validación de dos niveles que combina emparejamiento de patrones macro y prueba de lógica micro. Primero se realiza el emparejamiento de patrones conductuales macro. El modelo se ejecuta hasta alcanzar un estado estable, o se utiliza el promedio de varios días de simulación. Se aplican análisis de correlación espacial y bondad de ajuste temporal para comparar mapas de calor simulados y observados de densidad peatonal y distribución espaciotemporal, así como curvas diarias o semanales de visita a distintos equipamientos. También se emplean pruebas K-S o comparaciones de cuantiles para contrastar distribuciones de

número de cadenas diarias de actividad, distancias de viajes simples y duraciones de actividades generadas por la simulación y obtenidas de encuestas, con el fin de comprobar si el modelo reproduce regularidades macro estables de actividad espaciotemporal en el área de estudio. Segundo, se lleva a cabo análisis de sensibilidad y verificación interna. El análisis de sensibilidad de un factor modifica independientemente parámetros de entrada, como capacidad de equipamientos y desviación estándar de distribuciones de preferencia, y examina si la dirección y magnitud de cambios en salidas centrales, como visitas a equipamientos, son razonables. También se simulan escenarios extremos, como aumentos bruscos de demanda en vacaciones o cierre de equipamientos, para observar si el modelo produce comportamientos esperables, como congestión o vacíos de servicio, y así probar la robustez de la lógica del modelo.

3 Aplicaciones del modelo espaciotemporal basado en agentes para círculos de vida comunitarios

3.1 De la medición estática a la percepción dinámica: evaluación dinámica multidimensional del desempeño del servicio

El análisis tradicional de accesibilidad estática basado en puntos de equipamiento y superposición de buffers no puede considerar plenamente los rangos reales de actividad de los individuos ni sus límites conductuales bajo las restricciones duales de capacidad espaciotemporal e interacción grupal. Por tanto, no representa de forma realista el desempeño dinámico de espacios y equipamientos para individuos heterogéneos. Al incorporar el Logit mixto y parámetros de heterogeneidad de preferencias, el modelo espaciotemporal basado en agentes representa el entorno espacial como un sistema de oportunidades y restricciones que varía según las personas. Sobre esta base, simula decisiones de actividad-viaje de residentes heterogéneos bajo múltiples restricciones y su retroalimentación continua con el espacio. Puede evaluar el círculo de vida de forma dinámica y centrada en las personas desde tres dimensiones: nodos, redes y lugares, cubriendo desempeño de equipamientos, servicios sociales y resiliencia sistémica.

A nivel de nodo, el modelo simula la elección de equipamientos bajo restricciones reales. Puede diagnosticar la diferencia entre población teóricamente atendida y población realmente atendida por un equipamiento, y evaluar el ajuste oferta-demanda y la eficiencia de uso. Los indicadores se actualizan así desde "con cobertura o sin cobertura" y "rango geométrico de cobertura" hacia "proporción de cobertura efectiva" y "mapa de fluctuación espaciotemporal de la calidad del servicio". También puede identificar puntos ciegos de servicio causados por conflictos temporales, umbrales de precio y otros obstáculos, proporcionando apoyo más preciso para la localización, el posicionamiento tipológico y la gestión operativa de los equipamientos.

A nivel de red, el modelo considera el círculo de vida como un sistema complejo compuesto por nodos de equipamientos y flujos de residentes. Mediante la simulación de fallos de equipamientos clave o adición de nuevos nodos, puede evaluar la resiliencia global y la eficiencia estructural de la red de servicios, identificar hubs clave y vínculos vulnerables, y analizar redundancia funcional y sustitución entre equipamientos, apoyando así mejoras de eficiencia y equidad en el sistema de servicios.

A nivel de lugar, el modelo se centra en el espacio como soporte de interacción social. Al rastrear trayectorias espaciotemporales de actividad, puede evaluar cuantitativamente la inclusión y la diferenciación espaciotemporal en el uso del espacio público, y diagnosticar posibles lugares de concentración o conflicto entre grupos. Mediante la simulación de nuevos tipos de actividad económica o ajustes de reglas espaciales, puede anticipar cambios de vitalidad del lugar bajo distintas

intervenciones de diseño, desplazando la evaluación espacial desde la medición de contenedores funcionales hacia la valoración del potencial de construcción de lugar.

3.2 De la asociación macro al mecanismo micro: interacción y atribución entre personas y círculos de vida

La investigación tradicional suele detenerse en asociaciones estadísticas macro entre personas y espacio, sin revelar los impulsores micro de los fenómenos observados. El modelo espaciotemporal basado en agentes construye un puente interactivo entre heterogeneidad de preferencias residentes, decisiones de actividad-viaje y entorno espacial. Permite modelizar y analizar dos mecanismos clave.

A nivel micro, el modelo caracteriza el mecanismo de acoplamiento y adaptación entre comportamiento espaciotemporal individual y entornos multidimensionales. Al incorporar reglas de decisión Logit mixtas y retroalimentación espacial dinámica, simula con precisión el ciclo de percepción espacial, evaluación de utilidad, movimiento de actividad y actualización de atributos. Sobre esta base pueden rastrearse las raíces micro de cualquier fenómeno macro. Por ejemplo, un bajo uso de un equipamiento puede seguirse a través de las cadenas de decisión de todos los agentes residentes y atribuirse a horarios incompatibles, como restricción de acoplamiento; a costos excesivos, como restricción de autoridad; o a baja calidad, como restricción de preferencia. Esta capacidad de análisis de mecanismos profundiza la evaluación desde "si se usa el equipamiento" hacia "por qué no se usa" y "quién lo usaría", apoyando directamente políticas de servicio público precisas y diferenciadas por población.

A nivel macro, el modelo revela cómo el orden global emerge de interacciones individuales micro. Los comportamientos adaptativos de individuos heterogéneos se superponen, interactúan e iteran en un espacio compartido, generando finalmente patrones socioespaciales macro que no pueden predecirse por simple suma, es decir, orden local [8]. El modelo espaciotemporal basado en agentes no solo puede representar patrones de actividad y orden local, sino también identificar, mediante el ajuste de entradas, combinaciones de factores, condiciones críticas y trayectorias que producen un orden determinado. Al fijar reglas iniciales y parámetros espaciales, la planificación puede orientar la autoorganización hacia órdenes locales más resilientes, vitales e inclusivos, pasando del control determinista tipo plano a intervenciones adaptativas que cultivan posibilidades positivas.

3.3 De la configuración funcional a la creación de lugar: polisemia espacial y construcción de escenarios basada en la simulación de actividad

La planificación tradicional se centra en la configuración funcional material del espacio y tiene dificultades para ver las actividades sociales y el espíritu de lugar que el espacio sostiene. Al simular elecciones de actividad y mecanismos de interacción de residentes heterogéneos bajo restricciones reales, el modelo espaciotemporal basado en agentes permite a los planificadores evaluar el espacio no solo por "lo que falta", sino por "por qué los espacios existentes no pueden sostener proyectos más ricos". Por ello puede explorar prospectivamente cómo intervenciones espaciales finas estimulan actividades cotidianas activas y diversas e interacciones entre individuos diferentes en el mismo tiempo y espacio. La creación de lugar se eleva desde el diseño formal-estético hacia el diseño de procesos sociales basado en dinámicas conductuales. En concreto, el modelo apoya dos estrategias complementarias de creación de lugar impulsadas por simulación de actividad.

Primero, permite insertar con precisión catalizadores espaciales para activar el potencial polisémico de los nodos. La polisemia de un espacio depende de su correspondencia con los proyectos de los usuarios [50]. Al analizar los factores que influyen en las decisiones de los residentes y sus trayectorias de

actividad, el modelo diagnostica brechas entre la oferta espacial existente y la demanda diversa de actividades en términos de equipamientos, tipos de negocio y accesibilidad. Luego simula respuestas dinámicas en tipos de actividad, intensidad y patrones sociales tras introducir elementos catalizadores en ubicaciones y tipos distintos. Esto desplaza el diseño desde el juicio experiencial hacia la predicción precisa basada en emergencia conductual y ayuda a asegurar que cada microrenovación active efectivamente el espacio, dotándolo de potencial flexible como sala social o mercado vivo.

Segundo, ayuda a tejer sistemáticamente redes de encuentro espaciotemporal para estimular la vitalidad del sistema. Un espacio único tiene polisemia limitada, mientras que conectar múltiples nodos complementarios o similares puede catalizar escenarios más ricos mediante efectos de red que superan la simple suma de individuos. El modelo puede simular el proceso por el cual la conexión crea polisemia. Por ejemplo, planificar una ruta peatonal amable que conecte un jardín comunitario, una tienda de conveniencia, un punto de servicios para mayores y una parada de autobús no solo permite predecir la superposición entre flujos de viaje cotidiano y ocio, sino también simular nuevas cadenas de actividad, como compras en ruta e interacción social basada en caminar. Este tejido sistemático de oportunidades de encuentro espaciotemporal reconstruye el círculo de vida desde una colección de parcelas funcionales hacia un escenario fluido que sostiene encuentros, actividades espontáneas y exploración continua.

3.4 De la descripción del presente a la simulación del futuro: predicción de escenarios y evaluación de intervenciones

El modelo espaciotemporal basado en agentes ofrece una plataforma de experimentación simulada altamente controlable para la planificación y evaluación de políticas, desplazando la evaluación desde el post-implementación hacia la predicción prospectiva. Sus aplicaciones centrales son dobles. Primero, apoya la simulación de optimización de asignación de recursos. Al simular esquemas de planificación bajo distintos objetivos y restricciones, puede predecir cambios macro en la distribución espaciotemporal de peatones, cargas de uso de equipamientos, presión sobre la red de transporte y beneficios sociales. También puede entrar en el mecanismo micro, rastreando cambios en cadenas de viaje individuales, tiempo medio de viaje y diferencias de accesibilidad entre grupos sociales en respuesta al cambio espacial. Esta doble perspectiva de fenómenos macro y atribución micro actualiza la evaluación de planificación desde la comparación estática de esquemas hacia la comprensión dinámica de respuestas conductuales, proporcionando una base decisional desde la simulación de sistemas complejos para identificar estrategias óptimas de asignación de recursos y equilibrar eficiencia y equidad.

Segundo, apoya la evaluación refinada de intervenciones de política, especialmente la prueba cuantitativa de políticas blandas no espaciales. Al ajustar reglas temporales del modelo, como horarios de apertura de equipamientos, palancas de precio como descuentos por franja horaria, o configuraciones de permiso como servicios específicos por grupo, pueden simularse y predecirse los efectos de transmisión de estrategias de gestión sobre el comportamiento residente y el desempeño del sistema. Por ejemplo, el modelo puede calcular con precisión el efecto de ampliar horarios nocturnos de equipamientos comunitarios sobre el incremento de uso por población trabajadora, o evaluar cómo los subsidios de precios mejoran oportunidades de actividad para hogares de bajos ingresos. Esta capacidad de traducir políticas abstractas en parámetros ajustables y realizar experimentos de política permite a

los decisores anticipar consecuencias complejas antes de la implementación, optimizar intensidad y objetivos de intervención y mejorar la especificidad, eficacia e inclusividad de la política pública.

4 Perspectivas de investigación

Este estudio construye un modelo de cuatro componentes -individuos, actividades, tiempo y espacio- para la simulación espaciotemporal basada en agentes de círculos de vida comunitarios. Integra de manera innovadora la capacidad del Logit mixto para analizar heterogeneidad individual con la capacidad del modelo basado en agentes para simular emergencia interactiva, y propone tres perspectivas clave para el análisis de interacción. Primero, interacción subjetivo-objetiva entre individuos y espacio: el Logit mixto etiqueta preferencias diferenciadas de agentes residentes mediante distribuciones de heterogeneidad de parámetros, y la modelización basada en agentes simula regularidades espaciotemporales, diferenciación espacial y mecanismos de interacción entre individuos diferenciados y espacio. Segundo, interacción interescala entre decisiones individuales micro y patrones grupales macro: la simulación espaciotemporal basada en agentes puede revelar cómo decisiones individuales locales y micro interactúan de forma no lineal y generan patrones espaciotemporales macro ordenados. Experimentos controlados pueden identificar factores clave y umbrales efectivos que impulsan la formación de patrones. Tercero, interacción de corto y largo plazo entre personas y espacio: a escala temporal corta, el modelo analiza actividades de población en distintos momentos del día y sus usos del espacio; a escala larga, la recopilación de datos históricos y la simulación de escenarios permiten analizar cambios en actividades poblacionales y estructura espacial impulsados por cambios demográficos, tecnología de la información y políticas. A través de estas tres perspectivas, el modelo describe con precisión diferencias individuales en los círculos de vida, explica mecanismos de interacción entre individuos y espacio y predice prospectivamente el desempeño de la planificación y los servicios del círculo de vida. Por ello ofrece apoyo decisional centrado en las personas para el uso eficiente del espacio, la mejora del desempeño de servicios y la creación de vitalidad comunitaria.

El presente estudio completa principalmente la construcción del marco, la inferencia de mecanismos y la integración metodológica. Para empoderar realmente una práctica de planificación de círculos de vida implementable y centrada en las personas, se requieren investigaciones adicionales en dos áreas. Primero, adquisición profunda de datos individuales de actividad espaciotemporal y expresión de heterogeneidad. En la actualidad, los datos micro espaciotemporales de gran escala enfrentan una triple tensión entre cobertura, precisión y profundidad. Los avances futuros radican en integrar datos espaciotemporales multigranulares y multimodales, combinando trayectorias GPS y registros de actividad de alta precisión y riqueza semántica con datos de señalización móvil de amplia cobertura. Sobre esta base, el aprendizaje automático y la inversión de datos pueden reconstruir atributos completos y semántica de actividades para individuos a gran escala, extraer etiquetas digitales que representen comportamiento individual estable e incorporarlas como variables latentes al modelo de elección Logit mixto. Esto permitiría una modelización de extremo a extremo de datos, comportamiento y preferencias, haciendo medibles y explicables las elecciones espaciales heterogéneas. Segundo, simulación dinámica de la interacción bidireccional persona-espacio y de la evolución a largo plazo. Los modelos existentes tienen capacidad limitada para describir el circuito dinámico de retroalimentación en el que las personas afectan el espacio y el espacio reconfigura a las personas, así como los mecanismos evolutivos de largo plazo. A nivel micro, pueden introducirse métodos como redes neuronales recurrentes (RNN) para describir cómo las actividades individuales se acumulan y

retroalimentan la cognición y evaluación espaciales, influyendo en elecciones posteriores. A nivel macro, pueden combinarse modelos de dinámica de sistemas para simular efectos de largo plazo y no lineales del cambio demográfico, la renovación del entorno construido y la intervención de políticas de planificación, evaluando impactos sostenibles de la planificación. Con estas extensiones, podrá construirse un modelo espaciotemporal basado en agentes que no solo explique mecanismos complejos de interacción individuo-espacio, sino que también simule y evalúe beneficios de largo plazo de los esquemas de planificación, proporcionando un núcleo metodológico para una planificación urbana centrada en las personas, computable y simulable.

Referencias

- [1] Chai Yanwei, Ta Na. La revolución conductual en la geografía china y sus implicaciones teóricas[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2259-2270.
- [2] Wang De, Ren Xiyuan, Hu Yang. Modelización de decisiones conductuales para la planificación urbana basada en el tiempo y evidencias exploratorias desde Lujiazui, Shanghai[J]. *Urban Planning International*, 2024, 39(3): 40-50.
- [3] SILVA B N, KHAN M, HAN K. Hacia ciudades inteligentes sostenibles: revisión de tendencias, arquitecturas, componentes y desafíos abiertos[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 697-713.
- [4] Zhou Suhong, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po, et al. Fronteras de las teorías y métodos de la geografía conductual en China[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2235-2258.
- [5] ELLEGARD K. Pensar la geografía del tiempo: conceptos, métodos y aplicaciones[M]. London, UK: Routledge, 2018.
- [6] Wu Zhiqiang, Wang Kai, Chen Wei, et al. Discusión académica sobre el pensamiento innovador para la gobernanza refinada del espacio comunitario[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(3): 1-14.
- [7] Sun Yiyuan, Feng Jian. Marco de investigación sobre la interacción entre vida cotidiana y espacio bajo la influencia de las tecnologías de información y comunicación[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(8): 2055-2071.
- [8] Zhang Yan, Chai Yanwei. Giro de la geografía del tiempo hacia la investigación del sistema proyecto-actividad[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(1): 53-63.
- [9] CHEN B Y, LUO Y B, et al. Modelo de datos espaciotemporal y estructura de índice para la geografía del tiempo computacional[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2023, 37(3): 550-583.
- [10] Li Chunjiang, Chai Yanwei, Li Yanxi, et al. Investigación exploratoria sobre un sistema de clasificación proyecto-actividad[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2295-2307.
- [11] SADOWSKI J. Ciberespacio y paisajes urbanos: sobre la emergencia del urbanismo de plataforma[J]. *Urban Geography*, 2020, 41(3): 448-452.
- [12] SHAW S L. Geografía del tiempo en un mundo híbrido físico-virtual[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2023, 25(3): 339-356.
- [13] Liu Quan, Qian Zhenghan, Huang Dingfang, et al. Características evolutivas y tendencias de los patrones espaciales del círculo de vida comunitario de 15 minutos[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(6): 94-101.
- [14] Huang Huiming, Zhou Dailin, Wang Ye. Modelos de organización espacial de círculos de vida comunitarios basados en la morfología residencial: evidencias de Guangzhou[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(2): 94-101.

- [15] Shen Yuhui, Tong Ziyu. Métodos de evaluación de la conveniencia del círculo de vida comunitario a escala humana[J]. *South Architecture*, 2022(7): 72-80.
- [16] Cai Xingfei, Wang Hao, Li Li, et al. Evaluación de círculos de vida comunitarios: práctica de aplicación, desafíos y perspectivas[J]. *Planners*, 2023, 39(5): 47-52.
- [17] KIM H M, KWAN M P. Medidas de accesibilidad espaciotemporal: algoritmo geocomputacional centrado en el conjunto factible de oportunidades y la duración posible de actividades[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2003, 5(1): 71-91.
- [18] YIN L, SHAW S L. Exploración de trayectorias espaciotemporales en espacios de cercanía física y social: un enfoque SIG espaciotemporal[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(5): 742-761.
- [19] Liao Jingying, Lin Yaoyu, Xiao Zuopeng, et al. Modelo conceptual y medición del espacio accesible en tiempo real basado en el prisma espaciotemporal[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(4): 931-948.
- [20] Niu Xinyi, Lin Shijia. Macrodatos espaciotemporales en la investigación de planificación urbana: evolución tecnológica, temas de investigación y tendencias de frontera[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(6): 50-57.
- [21] Chai Yanwei, Li Chunjiang, Xia Wanqu, et al. Modelo para delimitar círculos de vida comunitarios urbanos: evidencias del subdistrito Qinghe, Beijing[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(9): 1-8.
- [22] Liang Hong, Ju Qiuwen, Chai Yanwei, et al. Medición y clasificación de la estructura espacial de círculos de vida urbanos multinivel desde la perspectiva del comportamiento espaciotemporal: evidencias de Beijing[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2025(3): 49-58.
- [23] Zhang Shanqi, Zhen Feng, Kong Yu, et al. Evaluación y configuración óptima de equipamientos de servicio del círculo de vida comunitario basada en la interacción espacial virtual-física: avances y perspectivas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(10): 2435-2446.
- [24] Wang De, Hu Yang. Planificación del comportamiento urbano espaciotemporal: conceptos, marco y perspectivas[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(1): 44-50.
- [25] Zou Sicong, Zhang Shanqi, Zhen Feng. Medición del espacio de actividad diaria comunitaria y factores que influyen en la vitalidad según el comportamiento espaciotemporal de residentes: evidencias de Shazhou y Nanyuan, Nanjing[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(4): 580-596.
- [26] Zhang Wenjia, Lu Daming. Revisión de la medición del entorno construido y de la investigación empírica sobre su influencia en el comportamiento espaciotemporal[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(12): 9-16.
- [27] TAO T, WANG J, CAO X. Exploración de asociaciones no lineales entre atributos espaciales y distancia peatonal al transporte público[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 82: 102560.
- [28] Tao Yinhua, Chai Yanwei, Yang Jie. Perspectiva conductual espaciotemporal sobre estilos de vida saludables de residentes urbanos[J]. *Human Geography*, 2021, 36(1): 22-29.
- [29] Luo Xueyao, Zhang Wenjia, Chai Yanwei. Efectos de umbral del entorno construido en círculos de vida de 15 minutos[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(8): 2155-2170.
- [30] Zhang Xue, Chai Yanwei. Marco de investigación para la diferenciación social en comunidades residenciales mixtas basado en el comportamiento espaciotemporal[J]. *Human Geography*, 2022, 37(6): 39-46.
- [31] Zhao Meifeng, Zhang Lanqing, Wang Degen. Diferenciación y factores de influencia en la asignación de equipamientos públicos urbanos desde la perspectiva del círculo de vida: comparación de

- ciudades de distintos tamaños en Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Urban Development Studies*, 2024, 31(10): 77-86.
- [32] Zhang Yan, Chai Yanwei. La "nueva" geografía del tiempo: investigaciones innovadoras del equipo de Kajsa en Suecia[J]. *Human Geography*, 2016, 31(5): 19-24.
- [33] LATHAM A. Diagramar lo social: exploración del legado de los paisajes diagramáticos de Torsten Hägerstrand[J]. *Landscape Research*, 2020, 45(6): 699-711.
- [34] Ta Na, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po. Medición conductual e interacción espacio-comportamiento en estilos de vida cotidianos de residentes suburbanos de Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1271-1280.
- [35] ZHANG S Q, YANG Y, ZHEN F, et al. Comprensión de comportamientos de viaje y patrones de actividad de población vulnerable mediante datos de tarjetas inteligentes: enfoque basado en espacio de actividad[J]. *Journal of Transport Geography*, 2021, 90: 102938.
- [36] Jiao Jian, Wang De, Cheng Ying. Patrones de actividad diaria y características de poblaciones con pobreza de tiempo en Shanghai[J]. *City Planning Review*, 2023, 47(4): 31-44.
- [37] He Jiaming, Zhou Suhong, Xie Xuemei. Propósitos de desplazamiento diario y factores de influencia de mujeres residentes en Guangzhou desde la geografía feminista[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(6): 1053-1064.
- [38] GIURGE L M, WHILLANS A V, WEST C. Por qué la pobreza de tiempo importa para individuos, organizaciones y naciones[J]. *Nature Human Behaviour*, 2020, 4: 993-1003.
- [39] KWAN M P. Los límites del efecto de vecindario: incertidumbres contextuales en investigaciones geográficas, de salud ambiental y de ciencias sociales[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, 108(6): 1482-1490.
- [40] MUURISEPP K, JARV O, TAMMARU T, et al. Espacios de actividad y fuentes de macrodatos en estudios de segregación: revisión metodológica[J]. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2022, 4: 861640.
- [41] Wei Yue, Yang Dongfeng. Efectos de los entornos construidos del barrio y destino sobre oportunidades de actividad diaria de personas mayores: perspectivas de percepción y participación[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(1): 89-103.
- [42] YUAN Y H, XU Y. Modelización de espacios de actividad con grandes geodatos: avances y desafíos[J]. *Geography Compass*, 2022, 16(11): e12663.
- [43] Niu Qiang, Yi Shuai, Gu Chongtai, et al. Nuevos conceptos y métodos para proveer equipamientos de servicio en círculos de vida comunitarios en línea y fuera de línea: evidencias de Wuhan[J]. *Urban Planning Forum*, 2019(6): 81-86.
- [44] Wu Lei, Niu Qiang, Ajiabibula Ainiwar, et al. Círculos de vida comunitarios en línea y fuera de línea que integran espacios virtuales y físicos: actualización iterativa y exploración de planificación[J]. *Urban Planning Forum*, 2024(2): 25-33.
- [45] ARRANZ-LOPEZ A, SORIA-LARA J A. Uso de TIC y fragmentación espacial de la participación en actividades en sociedades urbanas post-Covid-19[J]. *Land Use Policy*, 2022, 120: 1-11.
- [46] Yuan Zehao, Luo Yubo, Zhang Yu, et al. Métodos y aplicaciones para construir espacios de actividad individual basados en anclajes de actividad[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2025, 27(11): 2652-2669.

- [47] OMER I, KAPLAN N. Propiedades estructurales de las centralidades angulares y métricas de la red vial y sus implicaciones para los flujos de movimiento[J]. Urban Analytics and City Science, 2019, 46(6): 1182-1200.
- [48] Che Guanqiong, Qiu Baoxing, Wang Yitian, et al. Planificación del círculo de vida comunitario basada en la simulación de actividades peatonales de residentes: marco de investigación y cuestiones[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2024, 39(2): 139-143.
- [49] Che Guanqiong, Lan Xu, Wang Yitian. Optimización espacial de áreas residenciales del círculo de vida bajo simulación de caminata de residentes[J]. South Architecture, 2025(2): 21-29.
- [50] Zhou Zhifei. Desajuste población-espacio en espacios públicos de comunidades antiguas y respuestas de diseño[J]. Urban Problems, 2021(6): 25-33.
- [51] YANG S Q, DANE G, ARENTZE T A. Modelo basado en agentes para simular experiencias afectivas y actividades de peatones con fines de evaluación del diseño de espacios públicos urbanos[J]. Cities, 2025, 166: 106292.
- [52] WOLPERT L, OMER I. Análisis comparativo de modelos de volumen peatonal: modelos basados en agentes, métodos de aprendizaje automático y regresión múltiple[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2025, 117: 102238.

Traducción asistida por inteligencia artificial