

Identificación, clasificación y patrones de organización de los corredores TOD desde la perspectiva del equilibrio de flujos de pasajeros: el caso de Shanghái

LIU Bing, WANG Zhiwei, WANG Geyang, ZHU Junyu, CAO Juanjuan, XU Lei

Resumen: El nivel de equilibrio de los flujos de pasajeros en los corredores de desarrollo orientado al transporte público (Transit-Oriented Development, TOD) incide directamente en su desempeño operativo y de servicio; las relaciones entre las estaciones del corredor desempeñan un papel decisivo. A partir de datos origen-destino (OD) del sistema ferroviario urbano de Shanghái, este artículo aplica un algoritmo de detección de comunidades para identificar comunidades de estaciones con vínculos estrechos, delimita con base en ello los tramos de cada corredor TOD y los clasifica en tres tipos: radiales, ortogonales y sinuosos. Asimismo, construye un índice de equilibrio longitudinal y un índice de equilibrio bidireccional. Los resultados muestran diferencias significativas entre corredores en ambos indicadores; mediante una clasificación bidimensional se distinguen cuatro categorías: doble equilibrio, equilibrio direccional, equilibrio de sección y doble desequilibrio. Los corredores con doble equilibrio presentan rasgos de policentralidad y uso mixto del suelo, mientras que los corredores con doble desequilibrio se caracterizan por una sucesión periférica de áreas residenciales. Finalmente, se proponen principios “5D” para el corredor TOD como unidad espacial desde la perspectiva del equilibrio de flujos de pasajeros. El método de delimitación de corredores y de evaluación de su equilibrio de flujos ofrece un marco técnico integrado para la optimización espacial del TOD a escala de corredor y para la coordinación entre estaciones.

Palabras clave: corredor TOD; equilibrio de flujos de pasajeros; índice de equilibrio longitudinal; índice de equilibrio bidireccional; patrón espacial de corredor TOD; Shanghái

Clasificación de la Biblioteca China: TU984 ; Código documental: A

DOI: 10.16361/j.upf.202501014 ; Número de artículo: 1000-3363(2025)01-0102-09

Presentación de los autores: LIU Bing, profesor y director de doctorado, Escuela de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Tongji; Laboratorio Clave de Tecnologías de Planificación Inteligente del Espacio Territorial, Ministerio de Recursos Naturales; Laboratorio Clave de Shanghái para la Renovación Urbana y las Tecnologías de Optimización Espacial; Laboratorio Clave de Ecología y Ahorro Energético de Entornos Residenciales de Alta Densidad, Ministerio de Educación (Universidad Tongji). Correo: liubing1239@tongji.edu.cn; WANG Zhiwei, doctorando en la Escuela de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Tongji; director de planificación y urbanista sénior, Instituto de Planificación del Transporte Urbano, Suzhou Planning & Design Research Institute Co., Ltd.; WANG Geyang, ingeniero, Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., Ltd.; autor de correspondencia. Correo: wgy_8d183f@126.com; ZHU Junyu, ingeniero, Shanghai Institute of Urban and Rural Construction and Transportation Development; CAO Juanjuan, planificadora subjefa e ingeniera sénior, Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., Ltd.; XU Lei, doctorando en la Escuela de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Tongji; subingeniero jefe e ingeniero sénior, Instituto de Diseño y Planificación del Espacio Urbano y del Transporte, Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., Ltd.

Financiación: Proyecto general de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China, “Modelos espaciales y estrategias de optimización de corredores TOD ferroviarios desde la perspectiva del equilibrio de flujos de pasajeros: el caso del área metropolitana de Shanghái” (n.º 52178052); proyecto

2024 de cooperación industria-universidad del Ministerio de Educación, Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., “Casos de proyectos de planificación del transporte público basados en tecnologías digitales” (n.º 231100155192902); proyecto especial 2022 de investigación consultiva para la toma de decisiones de Shanghái sobre planificación y construcción de nuevas ciudades, “Estrategias de integración entre la construcción de transporte verde y bajo en carbono y el espacio urbano en las nuevas ciudades de Shanghái en un contexto de desarrollo de alta calidad” (n.º 2022-Z-W07-A).

1 Antecedentes de investigación

1.1 Surgimiento del concepto TOD y desarrollo de sus prácticas

En 1993, Peter Calthorpe[1], sobre la base de la teoría del Nuevo Urbanismo, propuso el concepto TOD como “desarrollo compacto para apoyar el transporte público”. Este concepto respondió al movimiento norteamericano de crecimiento inteligente, impulsó una relectura de las experiencias de desarrollo a lo largo de las líneas ferroviarias en Europa y Asia, y promovió numerosas prácticas vinculadas a la construcción de sistemas de transporte público. En las últimas tres décadas, el TOD se ha convertido en un tema central para la disciplina de la planificación. Dado que promueve la caminabilidad, la mezcla funcional, la diversidad residencial y la creación de centros públicos, objetivos coherentes con la contención de la expansión urbana, la mejora de la calidad del aire y el fomento de la interacción social, distintos lugares han adoptado sucesivamente políticas TOD a escala urbana, regional e incluso nacional: manuales o normativas en Denver[2], Austin[3] y Delhi[4]; estrategias y guías en el centro de Maryland[5] y la bahía de San Francisco[6]; una política nacional en Malasia[7]; y apoyo a proyectos por parte de instituciones internacionales como el Institute for Transportation and Development Policy[8] y el Banco Mundial[9].

El concepto TOD fue introducido en China hacia el año 2000[10]. En sus inicios, la atención se centró en el papel de las formas de uso del suelo TOD para fomentar el transporte público y resolver los problemas derivados de la motorización[11]. Posteriormente, “acelerar el establecimiento de un modo de desarrollo urbano orientado al transporte público” fue incorporado explícitamente a los requisitos del programa demostrativo de “ciudades de transporte público”[12]. Con el aumento continuo de la longitud de las redes ferroviarias urbanas, la estrategia “ferrocarril + propiedad inmobiliaria”, que utiliza la valorización del suelo para retroalimentar la construcción y operación ferroviaria, recibió mayor atención; en 2016, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma organizó un seminario sobre innovación en los mecanismos de inversión y financiación del transporte ferroviario urbano[13], al tiempo que aumentaban los estudios sobre la captura de plusvalías generadas por el ferrocarril[14-18]. Las prácticas locales de TOD se encuentran en pleno auge: Beijing, Tianjin, Shenzhen, Chengdu, Hangzhou, Nanjing, Dongguan, Foshan, Suzhou y otras ciudades han elaborado estrategias de desarrollo TOD o planes específicos. Según estadísticas incompletas, entre las más de cincuenta ciudades que ya cuentan con sistemas ferroviarios urbanos en operación, más de la mitad ha formulado políticas sobre desarrollo integrado de estaciones ferroviarias, con el fin de promover la elaboración y ejecución de proyectos TOD[19].

1.2 Creciente importancia del TOD de corredor

Como figura destacada del Nuevo Urbanismo preocupada por el crecimiento regional, Calthorpe subraya que el TOD es, en esencia, un “modo regional de desarrollo del Nuevo Urbanismo”: se trata de “integrar, a escala regional, las relaciones entre el transporte público y los patrones de uso del suelo para conformar una estructura espacial regional más compacta”[21]. El modelo regional de TOD se realiza mediante la coordinación de múltiples desarrollos TOD de estación a escala de barrio, situados

en líneas troncales y secundarias[1]; esta estructura reticular de corredores, integral y ordenada, requiere apoyarse en la red de transporte público para coordinar la estructura urbana[22]. Bajo la influencia de los “principios 3D”[23], las primeras investigaciones y prácticas TOD se concentraron en la escala barrial, destacando la mejora del entorno construido de las áreas de estación para favorecer los desplazamientos en transporte público[24-25]. Sin embargo, el desarrollo TOD de estaciones aisladas presenta un problema de “islas” desconectadas[26]. Para captar los efectos de red del TOD, el foco de investigación comenzó a desplazarse hacia la escala macro[27], y cobró creciente importancia la planificación del TOD de corredor (Corridor TOD, CTOD), que enfatiza la coordinación entre estaciones a lo largo de las líneas. De este modo, el TOD pasó de ser una herramienta de planificación comunitaria de escala barrial a una estrategia de reestructuración urbana de escala regional[28].

En Estados Unidos, el manual *Station Area Planning: How to Make Great Transit-Oriented Places* ya incluyó el “corredor de funciones mixtas” como uno de los tipos de área de estación TOD[29]. Posteriormente, el informe *Transit Corridors and TOD: Connecting the Dots* distinguió tres niveles espaciales -estación, corredor y región- y subdividió el TOD de corredor en tres tipos: de destino, de conmutación y de circulación local[30]. En China, las Directrices de planificación y diseño para áreas a lo largo del transporte ferroviario urbano también propusieron orientaciones TOD en tres niveles -ciudad, línea y estación-[31]; después, la “plataforma TOD” del Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural estableció un sistema de evaluación e indicadores de tres niveles. En la actualidad, el TOD se entiende como un patrón de organización espacial multiescalar que articula el diseño barrial de escala micro con estrategias amplias de transporte público, a fin de maximizar la eficiencia del transporte público de pasajeros mediante la planificación integrada de usos del suelo y transporte[32]. En este marco, el TOD de corredor ocupa un nivel intermedio entre la ciudad y la estación, y desempeña un papel relevante en la coordinación de los TOD de estación para formar redes jerárquicas de TOD de diferentes escalas, funciones y formas[30].

1.3 Relativo rezago de la investigación sobre TOD de corredor

Aunque se reconoce la necesidad de obtener mayores efectos de red mediante el TOD de corredor[33], los métodos de planificación orientados a esta escala siguen siendo inmaduros. En la ampliación teórica de los principios TOD de “3D” a “5D”, solo la “accesibilidad a destinos” refleja el impacto significativo de la estructura urbana y de las condiciones de red de escala macro sobre el desarrollo del transporte público[24,34]. Este indicador se centra en la facilidad de acceso desde las estaciones hacia centros de actividad y otros polos de atracción, pero no conforma un conjunto multidimensional de principios para orientar la planificación espacial del TOD de corredor. Bertolini[35] propuso el modelo nodo-lugar (N-P), que evalúa el ajuste entre el valor de nodo y el valor de lugar de las estaciones y puede aplicarse a análisis multiescala de estaciones a nivel de corredor y región; no obstante, sigue siendo un enfoque nodal basado en la unidad estación. Aunque estudios recientes han combinado los “principios D” y el modelo N-P para clasificar el TOD[36-37], no superan la limitación de la unidad estación y aún resultan insuficientes para revelar las características globales del desarrollo del TOD de corredor y su relación con los flujos de pasajeros. Por ello, resulta necesario tomar el corredor de transporte público como unidad espacial de investigación del TOD[38-39]; esto no solo ofrece oportunidades de planificación del suelo a lo largo de las líneas para mejorar el transporte público, sino que también proporciona una base para evaluar la coordinación entre estaciones TOD. Algunos autores[33] han señalado que la optimización del desempeño operativo del transporte público constituye uno de los principales temas de investigación del TOD de corredor.

Las deficiencias actuales de la investigación sobre TOD de corredor pueden resumirse en tres aspectos. Primero, los criterios para delimitar el alcance espacial de los corredores de transporte público son inconsistentes: algunos estudios seleccionan directamente una línea de transporte[40]; otros toman como punto de partida la sección de mayor carga dentro del corredor y extienden 3-5 km hacia ambos extremos[41]; otros definen el ámbito a partir del travel shed, con trayectos de 55-65 minutos o longitudes de 15-20 millas (24-32 km)[28]; y otros recurren a algoritmos de detección de comunidades[42], lo que reduce la comparabilidad entre investigaciones. Segundo, se presta insuficiente atención a la distribución de flujos y al estado operativo de las líneas de transporte público. Numerosos estudios apoyan el desarrollo de alta intensidad alrededor de las estaciones para fomentar el uso del transporte público, pero pocos autores han advertido las consecuencias negativas de grandes cargas de sección en áreas densas; por ejemplo, se ha observado que, en Taipéi, cuando la intensidad de desarrollo de las áreas de estación supera cierto umbral, puede afectar la operación del transporte público y el nivel de servicio de los equipamientos públicos[43]. Tercero, se mide poco la relación uso del suelo-transporte a escala de corredor, y faltan indicadores cuantitativos para caracterizar el entorno construido del corredor y sus flujos de pasajeros. En la actualidad, empiezan a aumentar los trabajos que abordan el diseño de corredores TOD desde la perspectiva del equilibrio de flujos: un estudio sobre Bogotá[44] muestra que la mezcla empleo-vivienda a lo largo de las líneas contribuye a suavizar los picos y equilibrar los flujos por sección; investigadores chinos[45-46] también han atendido el fenómeno pendular del transporte ferroviario y el equilibrio de las cargas de pasajeros. Sin embargo, la discusión teórica y metodológica sobre la planificación del TOD de corredor sigue siendo muy limitada.

Este artículo busca construir un marco técnico de planificación TOD a escala de corredor desde la perspectiva del equilibrio de flujos de pasajeros. Partiendo de la delimitación de los tramos del corredor, mide el nivel de equilibrio de flujos y los patrones espaciales de distintos corredores, con el fin de ofrecer apoyo efectivo a la coordinación del desarrollo entre estaciones TOD y a la mejora del desempeño operativo del transporte público.

2 Identificación de corredores TOD basada en tramos estrechamente conectados

2.1 Método de identificación de corredores TOD

Un corredor TOD es un tramo de línea con vínculos internos relativamente estrechos y que concentra las principales actividades de desplazamiento en transporte público a lo largo de la línea. Este artículo toma como referencia el concepto de “travel shed”[33] y delimita el alcance concreto del corredor TOD según la distribución espacial de los viajes de pasajeros en el área servida por el corredor. A partir de los datos OD entre estaciones del sistema ferroviario urbano de Shanghái, se emplea el método de “detección de comunidades” (community detection) para identificar comunidades de estaciones ferroviarias fuertemente conectadas, las cuales sirven como base para dividir los corredores TOD. Se utilizaron datos OD de todo el día correspondientes a una jornada laboral de julio de 2022. Primero, los flujos de las estaciones de transbordo se asignaron a las estaciones de cada línea específica (por ejemplo, People’s Square de la línea 1 y People’s Square de la línea 2); luego, con base en los volúmenes de pasajeros, se construyó un grafo no dirigido ponderado $G=(V,E)$, en el que el conjunto de vértices V corresponde a estaciones de metro de líneas específicas, el conjunto de aristas E representa las relaciones de flujo entre pares de estaciones, y el peso de la arista $e(v_1,v_2)$ es el volumen total de pasajeros entre las dos estaciones correspondientes a los vértices v_1 y v_2 ①.

Se seleccionó específicamente el algoritmo de detección de comunidades de Louvain basado en la modularidad②, que divide los nodos de la red en grupos con vínculos internos más densos y vínculos

intergrupales más escasos; con ello se obtienen las “comunidades de corredor” TOD de la red. Dado que los volúmenes de conexión interna de las comunidades identificadas por el algoritmo de Louvain tienden a ser similares, puede ocurrir que las líneas de alto flujo se dividan en varias comunidades y que las líneas de bajo flujo no se subdividan. Por ello se adopta un procedimiento en dos pasos, de “división global-subdivisión”: con una modularidad inicial de 2, primero se dividen las líneas de alto flujo en varias “grandes comunidades” con volúmenes internos semejantes; después, cada una de estas grandes comunidades se somete de manera independiente a detección de comunidades para obtener subcomunidades más pequeñas. Cuando las estaciones de una comunidad aparecen de forma discontinua insertas en otra comunidad, las estaciones intercaladas se tratan como áreas de solapamiento entre dichas comunidades. De este modo se obtienen varios corredores TOD continuos⁽³⁾.

2.2 Resultados de la identificación de corredores TOD

Con el método anterior, se identificaron 41 corredores TOD en el ámbito de Shanghái, incluidos tres corredores de ramal; la mayoría de las líneas de metro se divide en dos o tres corredores TOD (Fig.1). Según su forma, los corredores pueden agruparse en tres tipos: radiales, ortogonales y sinuosos. Los 22 corredores radiales tienen una longitud media de aproximadamente 25,0 km y un promedio de 14 secciones; los 13 corredores ortogonales y los 6 sinuosos se sitúan principalmente en la ciudad central y sus alrededores, ambos con unas 12 secciones en promedio y longitudes cercanas -16,1 km y 15,8 km, respectivamente-, alrededor de dos tercios de la longitud de los corredores radiales, lo que se relaciona sobre todo con sus menores distancias entre estaciones.

Los corredores radiales conectan principalmente la ciudad central con nuevas ciudades, poblados suburbanos, el aeropuerto de Pudong y otros sectores periféricos. Los corredores ortogonales conforman ante todo la densa red ferroviaria que atraviesa el área central, especialmente Puxi. Los corredores sinuosos se localizan sobre todo en tramos específicos de líneas circulares y de líneas con cambios de dirección, y cumplen principalmente funciones de enlace entre Puxi y Pudong. Debido al carácter reticular de las conexiones ferroviarias del centro, con múltiples transbordos y líneas entrelazadas, los corredores ortogonales y sinuosos se solapan con frecuencia con otros corredores: un mismo tramo o estación puede corresponder a varios corredores TOD, en lugar de mantener una relación estrictamente unívoca. Esto confirma los fenómenos de inserción local observados en algunas de las “comunidades de corredor” identificadas. Véase la Tab.1.

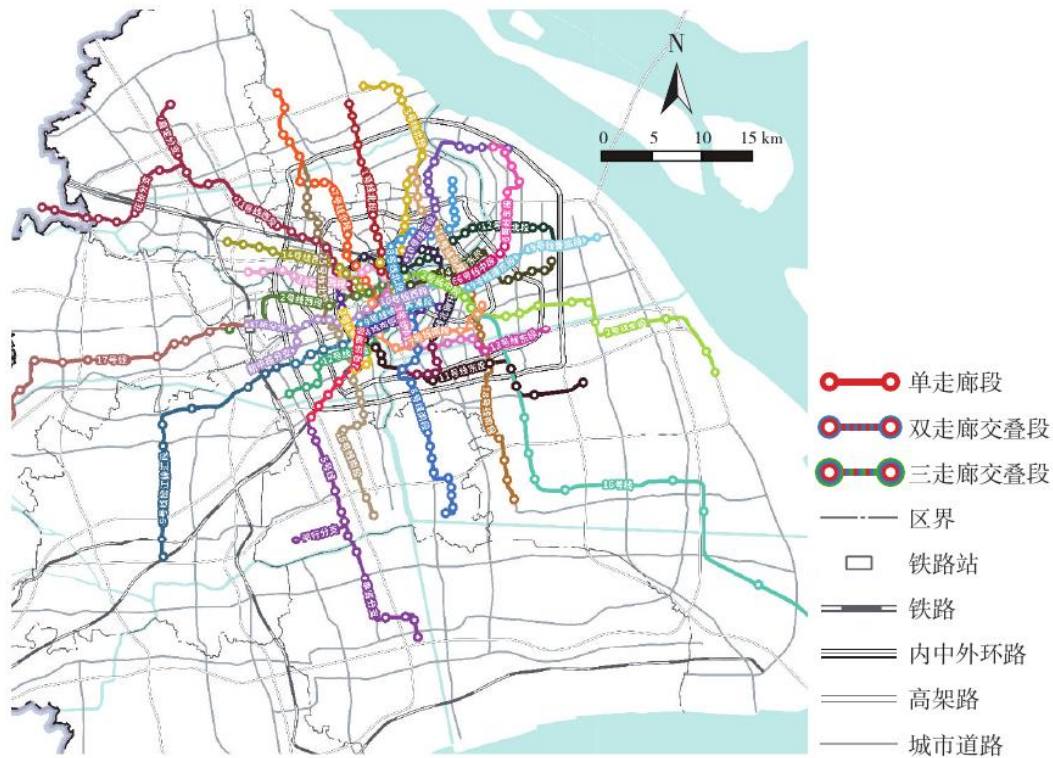


Fig.1 Corredores TOD en el ámbito de Shanghai

Tab.1 Identificación y clasificación morfológica de los corredores TOD

走廊形态		构成
放射走廊	北向	1号线北段(富锦路—人民广场)、3号线北段(江杨北路—上海火车站)、7号线北段(美兰湖—静安寺)、10号线东段(基隆路—豫园)、15号线北段(顾村—红宝石路)
	南向	5号线闵行分支(闵行开发区—莘庄)、5号线奉贤分支(奉贤新城—莘庄)、8号线南段(汇臻路—大世界)、15号线南段(紫竹高新区—姚虹路)、16号线(滴水—龙阳路)、18号线南段(航头—杨高中路)
	西向	9号线松江徐汇段(松江南站—宜山路)、11号线西段花桥分支(花桥—江苏路)、11号线西段嘉定分支(嘉定北—江苏路)、17号线(东方绿舟—虹桥2号航站楼)
	东向	2号线东段(浦东国际机场—上海科技馆)、6号线东段(港城路—北洋泾路)、9号线浦东段(民雷路—小南门)、9号线曹路段(曹路—台儿庄路)、11号线东(迪士尼—交通大学)、13号线东段(张江路—陈春路)
纵横走廊	横向	2号线西段(徐泾东—人民广场)、2号线中段(龙阳路—南京东路)、9号线徐汇黄浦段(星中路—陆家浜路)、10号线西段航中路分支(航中路—老西门)、10号线西段虹桥分支(虹桥火车站—老西门)、12号线东段(金海路—天潼路)、13号线西段(金运路—自然博物馆)、14号线西段(封浜—大世界)、14号线东段(桥路—豫园)
	纵向	1号线南段(莘庄—大会址·黄陂南路)、8号线北段(市光路—人民广场)、12号线西段(七莘路—曲阜路)、18号线北段(长江南路—民生路)
弯绕走廊		3号线南段(上海南站—中潭路)、4号线北侧环(蓝村路—曹杨路)、4号线南侧环(金沙江路—塘桥)、6号线西段(云山路—东方体育中心)、6号线中段(巨路—世纪大道)、7号线南段(花木路—常熟路)、13号线中段(北蔡—南京西路)

3 分析 del equilibrio de flujos de pasajeros en los corredores TOD

El equilibrio espacial de la distribución de flujos de pasajeros en los corredores TOD se manifiesta en dos dimensiones: el equilibrio entre secciones a lo largo de la línea y el equilibrio bidireccional. A continuación se construyen los indicadores correspondientes de evaluación del equilibrio de flujos y se comparan los distintos corredores.

3.1 Evaluación del equilibrio por secciones de los flujos en corredores TOD

Tomando como referencia el concepto estadístico de curtosis, se construye un indicador para evaluar el nivel de equilibrio de los flujos de pasajeros por secciones en los corredores TOD. Puede considerarse que, cuando el volumen de pasajeros en todas las secciones es igual, es decir, cuando la distribución es perfectamente uniforme, el nivel de equilibrio alcanza su valor máximo. Con esta curva como referencia, se propone el “índice de equilibrio longitudinal” (Profile Equilibrium Index, PEI),

definido como la diferencia entre la curtosis de la curva de distribución observada de flujos y la curtosis de una distribución uniforme.

La fórmula de cálculo del índice de equilibrio longitudinal en sentido ascendente o descendente⁽⁴⁾ es la siguiente:

$$PEI = kurt(X) - 1,8 = E[(X - \mu)/\sigma]^4 - 1,8$$

donde PEI es el índice de equilibrio longitudinal del corredor; $kurt(X)$ es la curtosis de la curva X de flujos observados por sección; 1,8 es la curtosis de la distribución uniforme (uniform distribution); $E(x)$ es la esperanza de la variable x ; μ es la media de la distribución X ; y σ es su desviación estándar.

En el cálculo concreto, se utiliza la proporción que representa la carga de pasajeros de cada sección, en un sentido determinado, respecto de la carga total de todas las secciones del corredor. Con ello se construye la curva de distribución de flujos por sección a lo largo del corredor y se calcula su PEI. Cuando el valor es 0, la distribución de flujos del corredor es la más uniforme; cuando es menor que 0, los flujos son mayores en los extremos y menores en el centro; cuando es mayor que 0, cuanto más alto es el valor, más desigual es la distribución y más se concentra hacia un solo lado. Cuando el valor se aproxima a 0,6, los flujos crecen casi linealmente a lo largo de las secciones; cuando supera 1, la curva presenta un “tramo de cola” con flujos muy bajos, y cuanto mayor es el valor, más acusado resulta el fenómeno de “cola larga”.

El cálculo del PEI de los corredores en la hora punta de la mañana [Fig.2(a)] muestra que los corredores radiales presentan el menor nivel de equilibrio por sección: sus valores medios de curtosis en los sentidos ascendente y descendente alcanzan 0,67 y 0,95, respectivamente, muy por encima de los corredores ortogonales (0,39 y 0,48) y de los sinuosos (0,49 y 0,28). Aunque la mayoría de los corredores presenta un PEI menor en sentido ascendente, el problema de la cola larga de sus flujos sigue siendo notable; además, al ser mayor el volumen de pasajeros en sentido ascendente durante la punta matutina, su impacto sobre la operación y el servicio ferroviario no debe subestimarse. En los corredores radiales entre la ciudad central y las nuevas ciudades, salvo el ramal Jiading de la sección oeste de la línea 11, la curtosis ascendente del ramal Fengxian de la línea 5, la sección Songjiang-Xuhui de la línea 9, el ramal Huaqiao de la sección oeste de la línea 11, la línea 16 y la línea 17 se sitúa básicamente en torno a 1.

En contraste, los corredores con flujos equilibrados y PEI inferior a 0,3 se localizan principalmente dentro de la ciudad central, por ejemplo los tramos centrales de las líneas 2, 6, 9 y 13 que atraviesan el área central de actividades, así como corredores como la línea circular 4, con transbordo a varias líneas. Algunos corredores que entran al área central de actividades desde el entorno de la ciudad central presentan en sentido ascendente PEI concentrados aproximadamente entre 0,3 y 0,5, con un nivel general de equilibrio medio. Esta distribución de flujos por sección, con “estabilidad en el centro y diferencias marcadas en la periferia”, está estrechamente relacionada con la estructura espacial monocéntrica del ámbito municipal y el patrón policéntrico de la ciudad central.

3.2 Evaluación del equilibrio bidireccional de los flujos en corredores TOD

Bajo la influencia de los desplazamientos pendulares centrípetos, la razón entre las cargas de pasajeros en los sentidos ascendente y descendente de los corredores radiales durante la punta matutina -es decir, el coeficiente de desequilibrio bidireccional- es elevada, y en algunas secciones puede alcanzar alrededor de 4. Dado que el rango de este coeficiente no es cerrado y que, al sumar los coeficientes de desequilibrio de las distintas secciones del corredor, pueden producirse compensaciones entre valores grandes y pequeños, el indicador no refleja de manera completa el nivel global de desequilibrio bidireccional del corredor. Por ello se construye el “índice de equilibrio

bidireccional” (Directional Equilibrium Index, DEI), basado en la diferencia de flujos en ambos sentidos por sección. En concreto, se calcula la raíz cuadrática media de la razón entre la diferencia de carga en ambos sentidos y la suma de cargas en ambos sentidos de cada sección, con el fin de evaluar el grado de desequilibrio bidireccional del corredor y reflejar también la intensidad de su comportamiento pendular. El valor del índice se sitúa entre 0 y 1: cuanto más desequilibrada es la distribución bidireccional de flujos, mayor es el valor. Cuando las cargas de pasajeros en ambos sentidos son completamente iguales, el valor es 0; cuando una de las direcciones no presenta pasajeros en una sección, el valor es 1.

La fórmula de cálculo del índice DEI es la siguiente:

$$DEI = \sqrt{[(1/n) \sum_i ((u_i/f_i) - (d_i/f_i))^2]}$$

donde DEI es el índice de equilibrio bidireccional; u_i y d_i representan respectivamente los volúmenes de pasajeros en sentido ascendente y descendente de la sección i del corredor; f_i es el volumen total de pasajeros de la sección i , igual a la suma de u_i y d_i ; y n es el número total de secciones.

El cálculo del DEI de los corredores en la punta matutina muestra que sus valores se sitúan principalmente entre 0,1 y 0,7 [Fig.2(b)]. Cuando el índice supera 0,7, se trata de una situación de desequilibrio extremo, en la que la razón entre flujos en ambos sentidos alcanza 6:1; cuando el índice es 0,5, el desequilibrio también es notable y la razón alcanza 3:1; cuando el índice es 0,2, el equilibrio es relativamente bueno y la razón se sitúa en torno a 3:2.

En conjunto, los corredores radiales presentan los problemas más destacados de desequilibrio bidireccional [Fig.2(b)]. En algunos corredores con una disposición continua de suelo residencial a lo largo de la línea, aparecen flujos pendulares evidentes desde las secciones iniciales periféricas, como en el tramo norte de la línea 7, el tramo norte de la línea 15 y el tramo sur de la línea 18. Varios corredores entre la ciudad central y las nuevas ciudades también alcanzan niveles de desequilibrio superiores a 0,55, como la sección oeste de la línea 9 (ciudad central - nueva ciudad de Songjiang), la sección oeste de la línea 11 (ciudad central - nueva ciudad de Jiading) y la línea 17 (ciudad central - nueva ciudad de Qingpu). Sin embargo, como estos corredores contienen un tramo de cola con flujos bajos en ambos sentidos, sus valores de índice no son los más altos.

Los corredores situados en la ciudad central presentan flujos bidireccionales relativamente equilibrados, y los corredores de Puxi muestran un nivel de equilibrio aún más alto. Entre los corredores típicamente equilibrados se encuentran las secciones oeste y central de la línea 2, la sección Xuhui-Huangpu de la línea 9, la sección oeste de la línea 10, la sección sur de la línea 12 y el semianillo suroeste de la línea 4, que conforman un patrón de “tres ejes transversales, un eje longitudinal y medio anillo”. Sus DEI se sitúan alrededor de 0,2 y, espacialmente, se caracterizan por atravesar el área central de actividades y enlazar múltiples centros públicos.

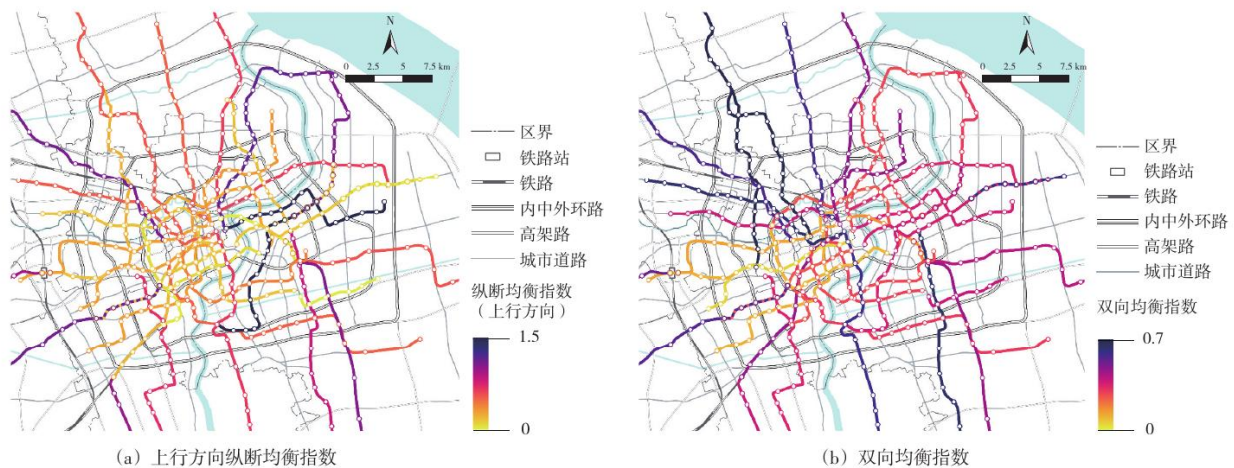


Fig.2 Distribución de los corredores TOD de Shanghai según el nivel de equilibrio de flujos de pasajeros

3.3 Análisis bidimensional del equilibrio de flujos en corredores TOD

Para analizar de manera integral el nivel de equilibrio de los corredores TOD en las secciones a lo largo de la línea y entre los sentidos ascendente y descendente, se calcula para cada corredor el rango percentil de su índice de equilibrio longitudinal y de su índice de equilibrio bidireccional respecto del conjunto de corredores. Luego se elabora un diagrama bidimensional de clasificación del equilibrio de flujos, en el que el punto correspondiente al percentil del corredor constituye el centro del círculo y el radio representa la carga media de pasajeros por sección del corredor durante la hora punta de la mañana. Véase la Fig.3.

Tomando como umbral el percentil 50 % de ambos indicadores, los corredores TOD pueden dividirse en cuatro grupos. En sentido horario desde el ángulo superior derecho, estos corresponden a “doble desequilibrio (desequilibrio bidireccional - con cola larga)”, “solo equilibrio de sección (desequilibrio bidireccional - sin cola larga)”, “doble equilibrio (equilibrio bidireccional - sin cola larga)” y “solo equilibrio bidireccional (equilibrio bidireccional - con cola larga)”. Entre ellos, hay 13 corredores con doble equilibrio de flujos y 14 corredores con doble desequilibrio; ambos tipos representan el 66 % del total de corredores, lo que indica cierta asociación entre el equilibrio por sección y el equilibrio direccional.

Estos cuatro tipos de corredores presentan rasgos espaciales claros. Los corredores con doble equilibrio se localizan en su mayoría al oeste del río Huangpu y al sur del río Suzhou, una zona que se superpone en gran medida con el área central de actividades de Shanghai (CAZ); a lo largo de estos corredores predominan áreas de alta densidad y uso mixto. Los corredores con solo equilibrio bidireccional se sitúan en su mayoría al este del río Huangpu; su desequilibrio por secciones refleja el rápido descenso de la intensidad de desarrollo en Pudong al alejarse de la franja ribereña de la CAZ. Los corredores con doble desequilibrio son principalmente corredores radiales que se extienden desde la CAZ hacia áreas suburbanas lejanas; sus extremos suelen ubicarse en nuevas ciudades de Shanghai (nueva ciudad de Songjiang, nueva ciudad de Fengxian, etc.) o en áreas con características similares (Pueblo de Pujiang, área de Wusong, etc.). Entre estos extremos y la ciudad central se suceden áreas residenciales continuas; los tramos próximos al extremo suelen tener pocos pasajeros y una cola larga marcada, mientras que las estaciones que atraviesan grandes áreas residenciales registran aumentos rápidos del flujo y una fuerte direccionalidad pendular. Los corredores con solo equilibrio de sección son corredores radiales que se extienden desde la CAZ hacia el exterior, pero con una distancia relativamente limitada: no presentan tramos de cola con bajo flujo, por lo que su índice longitudinal

es mejor, aunque la pendularidad sigue siendo evidente, como en el tramo norte de la línea 8 y el tramo norte de la línea 15.

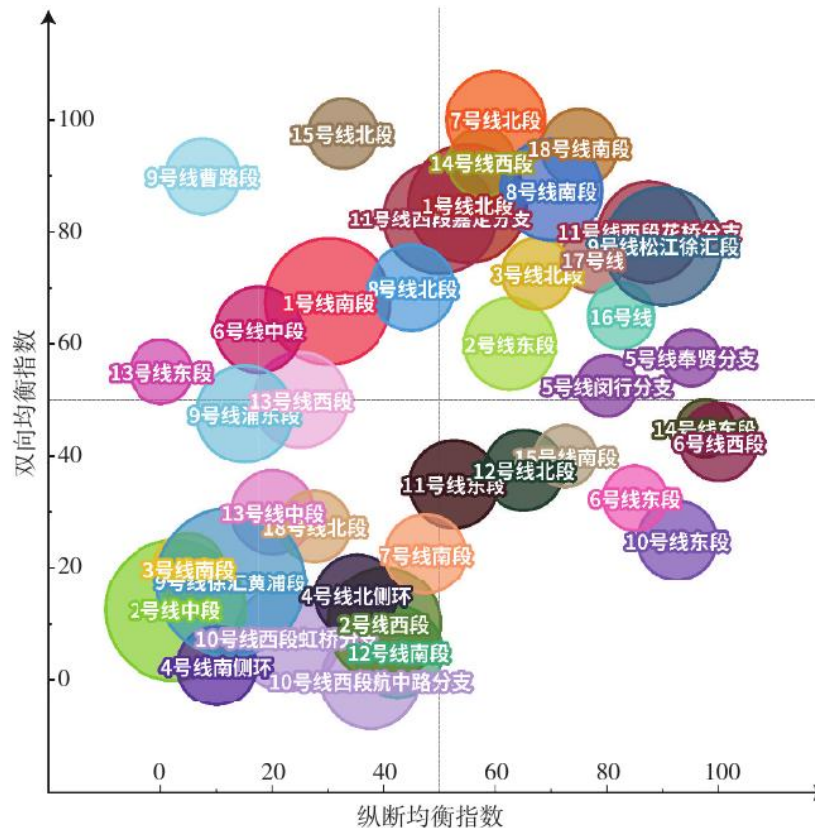


Fig.3 Rangos percentiles de los índices de equilibrio longitudinal y bidireccional de los corredores

4 Análisis de los patrones espaciales de corredores TOD desde la perspectiva del equilibrio de flujos

4.1 Distribución de tipos de estación en los corredores TOD

La disposición de usos del suelo de un corredor TOD se refleja en las funciones de las áreas de estación a lo largo de la línea. Según la similitud de las curvas horarias de flujos correspondientes a cada estación en días laborables y días de descanso, los tipos funcionales de estación pueden clasificarse en seis categorías: centro de actividad integral, centro dominado por oficinas, mezcla con predominio de oficinas, mezcla diversa, predominio residencial y dominio residencial. En estas seis categorías, la función de oficinas disminuye gradualmente en el entorno de las estaciones, mientras que la función residencial aumenta progresivamente. En términos espaciales, las estaciones de tipo centro de actividad integral y centro dominado por oficinas se concentran principalmente en la CAZ; las estaciones de mezcla con predominio de oficinas y de mezcla diversa se ubican sobre todo en la ciudad central; y las estaciones de predominio residencial y dominio residencial se distribuyen principalmente fuera de la ciudad central a lo largo de corredores radiales.

En términos comparativos, los corredores con doble desequilibrio son principalmente radiales: conectan las funciones residenciales de las nuevas ciudades y otras áreas suburbanas lejanas con las funciones de oficina, comercio y servicios de la ciudad central, y constituyen corredores de conmutación de larga distancia con separación empleo-vivienda. En cambio, los corredores con doble equilibrio son sobre todo corredores ortogonales que enlazan la CAZ y corredores sinuosos de tramos circulares; constituyen corredores de destino que conectan múltiples centros y manejan grandes

volúmenes de pasajeros. Los usos del suelo a lo largo de los otros dos tipos de corredores también presentan rasgos propios. Los corredores con equilibrio bidireccional pero desequilibrio longitudinal suelen tener en sus extremos estaciones mixtas dominadas por funciones no residenciales; un equilibrio relativo entre empleo y vivienda atrae cierto flujo en sentido inverso, pero la baja intensidad de desarrollo periférico produce grandes diferencias de carga por sección respecto de la ciudad central. Los corredores con equilibrio longitudinal pero desequilibrio bidireccional, en cambio, tienen en sus extremos estaciones de dominio residencial cercanas a la ciudad central; la abundancia de suelo residencial mantiene los flujos por sección generalmente saturados, mientras que la escasez de otros usos hace que la separación empleo-vivienda siga siendo muy marcada.

4.2 Análisis de corredores típicos

La sección Songjiang-Xuhui de la línea 9 es un corredor con doble desequilibrio y alto volumen de pasajeros. Al examinar los tipos de estaciones a lo largo de la línea y la distribución de flujos por sección [Fig.4(a)], se observa que el tramo de Songjiang contiene una sucesión de estaciones residenciales; además, las dos estaciones de Sheshan y Sijing, de dominio residencial, están completamente separadas de las estaciones continuas de tipo oficina en el área del centro de actividad de Caohejing, lo que provoca un grave desequilibrio de flujos. Desde la comparación bidireccional [Fig.4(b)], el flujo ascendente por sección aumenta bruscamente desde la estación Sheshan y empieza a descender en el entorno de Caohejing, mientras que el flujo descendente cae a un nivel muy bajo después de la estación Caohejing. Esto hace que, en el tramo Songjiang South - Xingzhong Road del corredor, la carga ascendente por sección sea significativamente superior a la descendente, generando desequilibrio bidireccional. En sentido ascendente, como el flujo total dentro de la nueva ciudad de Songjiang es relativamente bajo y las estaciones Sheshan, Dongjing y Jiuting registran cada una más de 5.000 entradas por hora, la distribución de flujos forma una clara “cola larga” en el tramo de la nueva ciudad de Songjiang. En sentido descendente, debido a la concentración de descensos en el centro de empleo de la zona de desarrollo de Caohejing, las secciones por debajo de Hechuan Road presentan flujos muy bajos, lo que también provoca una “cola larga”.

La rama Hongqiao de la sección oeste de la línea 10, por el contrario, es un corredor típico de doble equilibrio. A lo largo del corredor hay pocas estaciones residenciales y predominan las estaciones de centro integral, centro dominado por oficinas y mezcla diversa [Fig.4(c)]. En sentido ascendente, salvo por la concentración de descensos en Shaanxi South Road y Songyuan Road, las diferencias entre entradas y salidas de las demás estaciones no son grandes, por lo que el equilibrio de flujos por sección a lo largo del corredor es elevado. Además, dado que uno de los extremos periféricos del corredor es el hub de Hongqiao, no solo el volumen de embarques en el origen ascendente es alto, sino que también hay numerosos pasajeros que viajan en sentido descendente hasta el destino final. Esta característica estructural eleva el equilibrio bidireccional del corredor, y en ninguno de los dos sentidos aparece una cola larga de bajo flujo [Fig.4(d)].

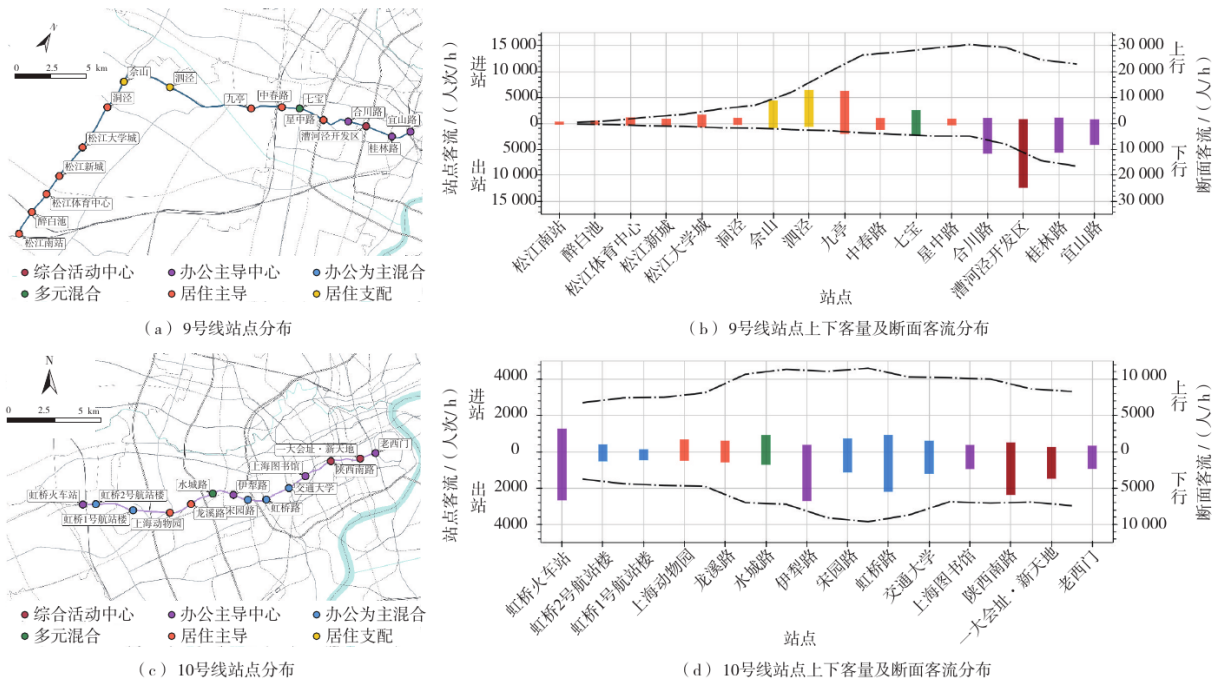


Fig.4 Volúmenes de subidas y bajadas por estación y distribución de flujos por sección en la sección Songjiang-Xuhui de la línea 9 y la rama Hongqiao de la sección oeste de la línea 10

5 Conclusiones e implicaciones

5.1 Principales conclusiones

En conjunto, este estudio cubre un vacío de conocimiento sobre los corredores TOD desde la perspectiva del equilibrio de flujos de pasajeros, y contribuye a futuras intervenciones de gestión y optimización espacial integral del TOD a escala de corredor, así como a mejorar el desempeño del desarrollo integrado de los corredores TOD.

Primero, el método de identificación de corredores TOD basado en las relaciones de flujos permite delimitar con precisión los tramos concretos del corredor y proporciona una base fundamental para definir las unidades espaciales del TOD de corredor. A partir de los datos OD de estaciones del sistema ferroviario urbano de Shanghai, el algoritmo de detección de comunidades produjo una división de corredores TOD. Entre ellos, los corredores radiales tienen longitudes de 25-30 km y una distancia media entre estaciones de 1,83 km; los corredores de la ciudad central y su entorno miden 16-20 km, con una distancia media entre estaciones de 1,30 km. La relación entre las longitudes y entre las distancias inter-estación de ambos tipos se aproxima a 3:2, lo que refleja diferencias en la escala de actividad de las distintas áreas de corredor. El número de estaciones incluidas en los corredores TOD es básicamente equivalente al número real de estaciones recorridas por los pasajeros (unas 12 en promedio), lo que muestra que el método de “detección de comunidades” es adecuado para identificar corredores TOD: los ámbitos así definidos se ajustan a las características espaciales de los viajes en transporte público y aumentan la comparabilidad de los estudios sobre corredores TOD.

Segundo, la construcción de indicadores de equilibrio de flujos en las dos dimensiones - longitudinal y bidireccional- permite examinar de manera integral el desempeño operativo y de servicio de los corredores TOD, así como identificar sus regularidades espaciales. Al calcular y analizar de manera conjunta el índice de equilibrio longitudinal y el índice de equilibrio bidireccional de cada corredor, se observan diferencias significativas en las características de equilibrio de flujos entre corredores; en particular, los dos indicadores de los corredores radiales son claramente superiores a

los de los otros dos tipos de corredores (Tab.2). En la clasificación bidimensional de corredores TOD, los corredores con “doble desequilibrio” son en su mayoría radiales que conectan la ciudad central con las áreas periféricas, mientras que los corredores típicos de “doble equilibrio” son principalmente corredores ortogonales y sinuosos.

Tercero, las características de equilibrio de flujos de los corredores TOD están estrechamente relacionadas con la disposición de usos del suelo a lo largo de la línea: los corredores de destino presentan flujos relativamente equilibrados, mientras que los corredores de conmutación muestran de manera más marcada tanto la pendularidad como el fenómeno de cola larga. Los corredores de destino se superponen espacialmente en gran medida con el área central de actividades; sus estaciones a lo largo de la línea son funcionalmente diversas y presentan rasgos de policentralidad y mezcla de usos. Además, ambos extremos del corredor cuentan con importantes polos de atracción de actividades, lo que garantiza su “doble equilibrio” tanto por secciones como por dirección. En cambio, los corredores de conmutación con disposición radial centrada se caracterizan por una sucesión periférica de áreas residenciales y por una separación empleo-vivienda dominada por oficinas en la ciudad central; su distribución desequilibrada de flujos reduce notablemente la eficiencia operativa y la calidad del servicio del transporte público.

Tab.2 Comparación de los niveles de equilibrio longitudinal y bidireccional de los flujos en corredores TOD

走廊类型	总数 / 个	上行方向纵断均衡指数		下行方向纵断均衡指数		双向均衡指数		走廊长度 / km		断面数 / 个		
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	合计
放射	22	0.67	0.42	0.95	0.90	0.52	0.12	24.99	11.65	13.64	3.87	300
横纵	13	0.39	0.45	0.48	0.45	0.35	0.15	16.14	3.33	12.23	2.59	159
弯绕	6	0.49	0.73	0.28	0.36	0.32	0.08	15.84	1.81	12.50	1.87	75

5.2 Implicaciones para la planificación

El método de identificación de corredores TOD y de análisis de sus patrones de disposición tiene gran importancia para profundizar la teoría multiescalar del TOD y orientar científicamente la planificación de corredores TOD. El nuevo método propuesto en este artículo, basado en las estrechas relaciones entre estaciones para delimitar corredores TOD y evaluar su equilibrio de flujos, ofrece un marco técnico integrado para la planificación TOD a escala de corredor y la coordinación con el TOD de estación.

Primero, el corredor TOD es un soporte clave para integrar la operación del transporte público y el desarrollo de las estaciones, así como para materializar los objetivos del desarrollo orientado al transporte público. Mejorar la operación del transporte público y elevar el nivel de servicio son condiciones esenciales para aumentar su atractivo. Solo mediante una planificación integrada de usos del suelo y transporte a escala regional puede maximizarse la eficiencia del transporte público de pasajeros. Esto coincide con la visión regional que está en el origen del concepto TOD: un modo de desarrollo regional orientado al transporte público, sustentado conjuntamente por estaciones TOD conectadas a través de la red de transporte público. El TOD a escala de estación difícilmente responde a los objetivos de mejora operativa de las líneas de transporte público; además, no considera suficientemente los distintos efectos del desarrollo TOD sobre la operación del transporte en situaciones de saturación o insuficiencia de flujos, y suele ignorar la contradicción entre grandes flujos por sección y capacidad de transporte. Integrar en el corredor los TOD de estación de carácter aislado permite mejorar el equilibrio de la distribución de flujos por sección y vincularlos de forma más eficaz con los objetivos estratégicos de aumento de pasajeros del transporte público.

Segundo, deben formularse principios de planificación y estrategias de control tomando el corredor TOD como unidad, para optimizar sus patrones espaciales. Según la distribución espacial de los viajes en transporte público, pueden distinguirse corredores TOD entre la ciudad central y las áreas periféricas, y corredores internos de la ciudad central. En comparación con el TOD de estación, los principios del TOD de corredor deben atender los requisitos de planificación y diseño a escala regional. A partir de la experiencia de los corredores TOD de Shanghái, se propone sintetizar desde la perspectiva del equilibrio de flujos los “principios 5D” del TOD de corredor: diversidad (diversity), que, además de la mezcla funcional en las áreas de estación, promueve una disposición alternada de estaciones con distintos tipos funcionales a lo largo del corredor, especialmente mediante la inserción de estaciones de tipo central; accesibilidad a destinos (destination), que plantea disponer a lo largo del corredor centros de actividad dominados por funciones diferentes -comercio, oficinas, ocio, etc.- para reforzar la capacidad de atracción de múltiples áreas de estación dentro del corredor y promover el equilibrio entre entradas y salidas; despolarización (depolarization), que mejora las funciones de nodos principales como las nuevas ciudades, fortalece el nivel de los centros públicos periféricos y reduce el efecto de polarización unidireccional de los corredores radiales; proximidad al empleo (distance to workplace), que dispone usos de empleo y vivienda en los tramos de ambos extremos del corredor y refuerza el equilibrio empleo-vivienda, evitando especialmente la configuración monofuncional de estaciones residenciales continuas en la periferia; y apalancamiento de densidad (density leverage), que considera la escala y el equilibrio de los flujos en distintos tramos del corredor, eleva adecuadamente la intensidad de desarrollo de funciones no residenciales periféricas y, al mismo tiempo, controla de manera razonable la configuración funcional y la intensidad de desarrollo en las áreas con grandes flujos por sección, para que se ajusten a la capacidad del transporte público.

Tercero, con el objetivo de mejorar el nivel de equilibrio de flujos, es necesario reforzar la simulación multiescenario de la disposición y las políticas de los corredores TOD. El equilibrio de flujos del corredor no solo contribuye a aumentar la eficiencia operativa del transporte público, sino que también, al reducir la congestión dentro de los vehículos y mejorar la comodidad del viaje, favorece en última instancia el objetivo central del TOD: incrementar los desplazamientos en transporte público. La situación de equilibrio de flujos es resultado de la interacción integrada entre usos del suelo y transporte a lo largo del corredor y en el ámbito regional; está condicionada por distintas configuraciones espaciales y políticas relacionadas, de modo que incluso en una misma línea los distintos tramos pueden presentar niveles diferentes de equilibrio de flujos. Para mejorar la científicidad de las decisiones de planificación de corredores TOD, resulta urgente fortalecer la simulación del equilibrio de flujos en escenarios alternativos de planificación; mediante la comparación y selección de patrones y estrategias espaciales de “coordinación entre estaciones TOD”, esta simulación puede ofrecer apoyo cuantitativo para reforzar la concentración funcional del corredor TOD y aprovechar sus efectos espaciales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al ingeniero sénior ZHANG Hanshuang sus valiosas sugerencias durante la redacción de este artículo, así como a MIAO Sijing y LU Ming por su trabajo básico de recopilación bibliográfica.

Notas

- ① Para un grafo G con V nodos y E aristas, cuando el número de aristas E se aproxima a V^2 , se considera que G es un grafo denso (dense graph); por el contrario, cuando E se aproxima a V , se considera que G es un grafo disperso (sparse graph). Como prácticamente todas las estaciones

ferroviarias presentan flujos entre sí, es decir, casi todo par de puntos tiene una arista, el grafo construido a partir de las relaciones de flujo entre estaciones es un grafo denso. Dado que la modularidad se calcula con base en el peso de las aristas, es decir, en los volúmenes de pasajeros, cuando el grafo es ponderado y denso, la suma de los pesos internos de las comunidades producidas por el algoritmo de detección de comunidades tiende a ser similar; en otras palabras, los volúmenes totales de pasajeros dentro de cada comunidad son cercanos.

- ② El método de detección de comunidades de Louvain es un algoritmo heurístico basado en el principio de maximización de la modularidad (modularity). Una modularidad elevada indica que en la red existen muchas conexiones dentro de las comunidades y pocas conexiones entre comunidades.
- ③ Al observar los resultados del algoritmo de detección de comunidades, se constata que algunas comunidades discontinuas no pueden definirse directamente como corredores TOD; por ello, es necesario procesar de nuevo las comunidades obtenidas para formar corredores de transporte continuos. Se establece que, para una estación s perteneciente a la comunidad a , si la línea ferroviaria correspondiente no es circular y, en ambas direcciones a lo largo de dicha línea, existen estaciones s' y s'' pertenecientes a la comunidad b , entonces la estación s pertenece simultáneamente al corredor TOD A y al corredor TOD B. Los corredores TOD obtenidos con esta regla son continuos, aunque una estación puede pertenecer a varios corredores TOD distintos; por ejemplo, la estación Beiyangjing Road de la línea 6 pertenece al mismo tiempo a las secciones este, central y oeste de la línea 6.
- ④ Entre los dos extremos del corredor, se define como origen s_0 el punto más alejado del centro de Shanghái, y como destino s_1 el más cercano al centro. El centro de Shanghái corresponde al origen del sistema de coordenadas Shanghai 2000, cuyo referente físico es el mástil central en la azotea del International Hotel, en Nanjing West Road, al norte del Parque del Pueblo. El desplazamiento desde el origen s_0 (extremo alejado del centro de Shanghái) hacia el destino s_1 (extremo cercano al centro de Shanghái) se define como sentido ascendente, y el inverso como sentido descendente. Algunas líneas del metro de Shanghái, como la línea 11, cuentan con ramales; dado que todos los ramales se localizan en áreas alejadas del centro, se establece en estos casos que el corredor tiene dos orígenes, s_{01} y s_{02} , y que los dos trayectos desde s_{01} y s_{02} hasta el destino s_1 son distintos ramales de un mismo corredor TOD. Los indicadores de equilibrio de flujos se calculan por separado para los diferentes ramales de un mismo corredor.

Referencias

- [1] CALTHORPE P. The next American metropolis: ecology, community, and the American dream [M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- [2] City of Denver. Denver TOD typology and strategic plan [EB/OL]. (2006-01-01) [2024-09-20]. <http://ctod.org/pdfs/2006TODStrategicPlanDenver.pdf>.
- [3] City of Austin. History of transit oriented development in Austin [EB/OL]. (2023-08-30) [2024-09-20]. https://www.austintexas.gov/sites/default/files/files/Planning/Urban_Design/History_of_TOD2.pdf.
- [4] Delhi TOD Policy & Regulations Interpretation. Transit oriented development manual [EB/OL]. (2014-10-14) [2024-09-20]. <https://www.wricitiesindia.org/sites/default/files/Delhi-TOD-Policy-Manual.pdf>.

- [5] Central Maryland Transportation Alliance. Central Maryland TOD strategy: a regional action plan for transit-centered communities [EB/OL]. (2009-07) [2024-09-20]. <http://ctod.org/pdfs/2009CentralMarylandTODStrategy.pdf>.
- [6] ARRINGTON G B, THORNE-LYMAN A, et al. Transit-oriented development guidelines [EB/OL]. (2017-05-01) [2024-09-20]. https://www.bart.gov/sites/default/files/docs/BART_TOD-GuidelinesFinal2017_compressed_0.pdf.
- [7] AHMAD S, RASHID M F, SURATMAN R. Readiness of transit oriented development (TOD) concept implementation in Perak's suburban areas [J]. Planning Malaysia: Journal of the Malaysian Institute of Planners, 2022, 20(1): 155-165.
- [8] ITDP (Institute for Transportation and Development Policy). TOD standard 3.0 [EB/OL]. (2017) [2024-09-20]. <https://www.itdp.org/publication/tod-standard/>.
- [9] OLLIVIER G P, GHATE A, BANKIM K, et al. Transit-oriented development implementation resources and tools [EB/OL]. 2nd ed. Washington, D.C.: World Bank Group, [2021-10-25] [2024-09-20]. <http://documents.worldbank.org/curated/en/472011635146925534/Transit-Oriented-Development-Implementation-Resources-and-Tools-Second-Edition>.
- [10] BOARNET M G, COMPIN N S. TOD en San Diego: proceso gradual de implementación de un concepto de planificación [J]. Urban Planning Overseas, 2000(4): 38-41. (en chino)
- [11] CHEN Yanping. La vía fundamental para resolver los problemas de transporte urbano: comunidades de transporte público y formas de uso del suelo urbano orientadas al transporte público [J]. City Planning Review, 2000(3): 10-14. (en chino)
- [12] Ministerio de Transporte de la República Popular China. Aviso sobre asuntos relativos al lanzamiento del programa nacional de demostración de ciudades de transporte público [EB/OL]. (2011-11-09) [2024-09-20]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/ysfws/202006/t20200623_3315626.html.
- [13] Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma. La NDRC organiza un seminario sobre innovación en mecanismos de inversión y financiación del transporte ferroviario urbano [EB/OL]. (2016-09-09) [2024-09-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-09/09/content_5106798.htm.
- [14] PAN Haixiao, ZHONG Baohua. Efectos de la construcción de transporte ferroviario sobre los precios inmobiliarios: el caso de Shanghái [J]. Urban Planning Forum, 2008(2): 62-69. (en chino)
- [15] ZHENG Siqi, HU Xiaoke, ZHANG Bo, et al. Captura de plusvalías del transporte ferroviario urbano: de la teoría a la realidad [J]. Urban Development Studies, 2014, 21(2): 35-41. (en chino)
- [16] LIN Xiongbín, YANG Jiawen, DING Chuan. Hacia una movilidad y una vivienda más asequibles: análisis de planificación del desarrollo orientado al transporte y sus efectos de equidad [J]. City Planning Review, 2018, 42(9): 122-130. (en chino)
- [17] LIU Quan. Lectura de la forma estructural de la planificación TOD a escala urbana [J]. Shanghai Urban Planning Review, 2019(6): 72-79. (en chino)
- [18] LI Wenjing, YANG Jiawen. Estrategias y prácticas de aplicación del modelo de desarrollo orientado al transporte público (TOD) en Shenzhen [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 25(12): 5-12. (en chino)
- [19] DONG Wei, LIN Xiongbín. Políticas y prácticas localizadas del TOD en ciudades chinas: una perspectiva de instrumentos de política [J]. Urban Planning Forum, 2024(2): 49-57. (en chino)
- [20] HUANG Jianzhong, CAO Zhejing, WAN Ge. Desarrollo de la teoría TOD y perspectivas de investigación en el contexto de las nuevas tecnologías [J]. Urban Planning Forum, 2023(2): 40-46. (en chino)

- [21] DAI Xiaohui. El Nuevo Urbanismo como modo de desarrollo regional: reflexión sobre The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream de Peter Calthorpe [J]. Urban Planning Forum, 2000(5): 77-78. (en chino)
- [22] HICKMAN R, HALL P. Moving the city east: explorations into contextual public transport-orientated development [J]. Planning Practice and Research, 2008, 23(3): 323-339.
- [23] BERNICK M, CERVERO R. Transit villages in the 21st century [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [24] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a synthesis [J]. Transportation Research Record, 2001(1780): 87-114.
- [25] HESS D B, ALMEIDA T M. Impact of proximity to light rail rapid transit on station-area property values in Buffalo, New York [J]. Urban Studies, 2007, 44(5-6): 1041-1068.
- [26] CERVERO R, MURAKAMI J. Rail and property development in Hong Kong: experiences and extensions [J]. Urban Studies, 2009, 46(10): 2019-2043.
- [27] RENNE J L, TOLFORD T, HAMIDI S, et al. The cost and affordability paradox of transit-oriented development: a comparison of housing and transportation costs across transit-oriented development, hybrid and transit-adjacent development station typologies [J]. Housing Policy Debate, 2016, 26(4-5): 819-834.
- [28] LIU L, ZHANG M, XU T. A conceptual framework and implementation tool for land use planning for corridor transit oriented development [J]. Cities, 2020, 107(2): 102939.
- [29] Reconnecting America. Station area planning: how to make great transit-oriented places [EB/OL]. (2003-04-08) [2024-09-20]. <http://reconnectingamerica.org/assets/Uploads/tod202.pdf>.
- [30] Center for Transit-Oriented Development. Transit corridors and TOD [EB/OL]. (2010-12-20) [2024-09-20]. <https://ctod.org/portal/node/2161>.
- [31] Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural. Directrices de planificación y diseño para áreas a lo largo del transporte ferroviario urbano [EB/OL]. (2015-12-10) [2024-09-20]. https://www.planning.org.cn/news/uploads/2015/12/566a2efee7aad_1449799422.pdf.
- [32] IBRAEVA A, CORREIA G H A, SILVA C, et al. Transit-oriented development: a review of research achievements and challenges [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 132: 110-130.
- [33] ZHANG M. Chapter eleven: corridor transit oriented development: concept, practice, and research needs [M] // CAO X J, DING C, YANG J. Advances in transport policy and planning. Academic Press, 2022: 277-299.
- [34] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment [J]. Journal of the American Planning Association, 2010, 76(3): 265-294.
- [35] BERTOLINI L. Spatial development patterns and public transport: the application of an analytical model in the Netherlands [J]. Planning Practice & Research, 1999, 14(2): 199-210.
- [36] KAMRUZZAMAN M, BAKER D, WASHINGTON S, et al. Advance transit oriented development typology: case study in Brisbane, Australia [J]. Journal of Transport Geography, 2014, 34(2): 54-70.
- [37] HIGGINS C D, KANAROGLOU P S. A latent class method for classifying and evaluating the performance of station area transit-oriented development in the Toronto region [J]. Journal of Transport Geography, 2016, 52: 61-72.
- [38] CHORUS P, BERTOLINI L. Developing transit-oriented corridors: insights from Tokyo [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2016, 10(1-5): 141217133925009.

- [39] FERRELL M C. Measuring the impact of suburban transit-oriented developments on single-family home values [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013.
- [40] PAPAGIANNAKIS A, VITOPOULOU A, YIANNAKOU A. Transit-oriented development in the southern European city of Thessaloniki introducing urban railway: typology and implementation issues [J]. European Planning Studies, 2020, 29(1): 117-141.
- [41] WU Jiaorong, LIU Mengyao, XIE Jinhong. Clasificación de corredores de transporte ferroviario urbano y correlación con las características de viaje [J]. Urban Transport of China, 2019, 17(5): 105-113. (en chino)
- [42] LIU Xiang, CHEN Xiaohong, PAN Haixiao. De la “integración estación-ciudad” a la “integración de corredor”: marco teórico del desarrollo TOD y optimización de modelos desde la perspectiva del espacio de flujos [J]. Urban Planning Forum, 2024(4): 34-40. (en chino)
- [43] LIN J J, GAU C C. A TOD planning model to review the regulation of allowable development densities around subway stations [J]. Land Use Policy, 2006, 23(3): 353-360.
- [44] GUZMAN L A, CARDONA S G. Density-oriented public transport corridors: decoding their influence on BRT ridership at station-level and time-slot in Bogotá [J]. Cities, 2021, 110: 103071.
- [45] CUI Xu, LIANG Pengpeng, YU Bingjie, et al. Investigación sobre la teoría de planificación y diseño TOD [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(5): 18-25. (en chino)
- [46] RU Xianghui, YANG Zhigang, ZHENG Meng, et al. Estrategias de desarrollo coordinado entre transporte ferroviario y espacio urbano en megaciudades: el caso de Beijing [J]. Urban Transport of China, 2022, 20(2): 21-27. (en chino)

Revisado: noviembre de 2024
(Este artículo ha sido traducido con ayuda de IA.)