Il Mulino - Rivisteweb

Luigi Capoani

Il modello gravitazionale nelle scienze sociali

(doi: 10.7384/122037)

Economia & lavoro (ISSN 0012-978X)
Fascicolo 2, maggio-agosto 2026

Ente di afferenza:
()

Copyright © by Società editrice il Mulino, Bologna. Tutti i diritti sono riservati.
Per altre informazioni si veda https://www.rivisteweb.it

Licenza d'uso

Questo articolo è reso disponibile con licenza CC BY NC ND. Per altre informazioni si veda https://www.rivisteweb.it/

Anno LX, 2026, 2 *Economia & Lavoro* *Saggi, pp. 27-47*

IL MODELLO GRAVITAZIONALE NELLE SCIENZE SOCIALI

di Luigi Capoani

The Gravitational Model in Social Sciences

Il presente articolo propone una revisione approfondita della letteratura sul modello gravitazionale nel campo della sociofisica, con particolare attenzione ai suoi utilizzi nell'analisi dei fenomeni sociali. Al fine di garantire una chiara comprensione, verranno analizzate in prospettiva storica le recenti applicazioni del modello e le dinamiche più rilevanti del contesto attuale, quali i flussi economici e di persone, così da mettere in luce il legame tra i due ambiti. La prima sezione si concluderà con un riferimento alla Prima legge di Tobler in geografia, posta in relazione ai concetti di forza d'attrazione e concentrazione nello spazio, al fine di evidenziare come la dimensione spaziale possa influenzare l'interazione tra due entità. Successivamente, la ricerca si focalizzerà più specificatamente sul modello applicato ai flussi commerciali, in modo da comprendere come essi siano collegati tra loro. L'obiettivo finale è dunque quello di sottolineare l'importanza e l'utilità del modello nelle scienze sociali contemporanee, evidenziandone le diverse applicazioni negli ambiti affrontati e riconoscendone i possibili limiti e gli spunti di discussione futuri.

Parole chiave: modello di gravità, demografia, migrazione, sociofisica, geografia economica, scienze sociali.

This article provides a comprehensive review of the literature on the gravitational model in socio-physics, with a particular focus on its applications in analysing social phenomena. To enhance clarity, it examines recent applications of the said model within the context of contemporary historical dynamics such as population and economic flows, in order to explore the connection between the two domains. After a historical review of the use of the gravitational model in socio-physics, the first section concludes with an analysis of Tobler's First Law in geography, comparing it to the concepts of gravitational force and spatial concentration, to illustrate how space influences interactions between two entities. The subsequent section delves specifically into the application of the model to trade flows, examining their interconnections. The ultimate goal of the paper is to emphasise the relevance of the model and its utility in contemporary social sciences, demonstrating its diverse applications across various domains, while acknowledging its limitations, and proposing new ideas for future research.

Keywords: gravity model, demography, migration, socio-physics, economic geography, social sciences.

Introduzione

La Legge di gravitazione universale, teorizzata da Isaac Newton, spiega l'attrazione tra i corpi celesti ed è responsabile dei movimenti che regolano l'universo. Il principio alla base di questa legge è stato adattato per analizzare le interazioni tra entità sociali, come Paesi o

Luigi Capoani, Dipartimento di Scienze economiche, aziendali, matematiche e statistiche "Bruno de Finetti" (DEAMS), Università degli studi di Trieste, Via Università 1, 34123 Trieste, eytt.research@gmail.com.

Codici JEL / JEL Codes: F10, F14, F22, R12, R23.

Pervenuto alla Redazione nel mese di ottobre 2025, revisionato nel mese di febbraio 2026, e accettato per la pubblicazione nel mese di marzo 2026 / Submitted to the Editorial Office in October 2025, reviewed in February 2026, and accepted for publication in March 2026.

ISSN 0012-978X

© Carocci Editore S.p.A.

mercati. Il cosiddetto modello gravitazionale utilizza concetti analoghi a quelli di "massa" (ad esempio, la dimensione economica o demografica) e di "distanza" (geografica, culturale ed economica) per spiegare e prevedere il flusso di persone, beni, informazioni e persino i conflitti tra tali entità. In particolare, il concetto di distanza assume un ruolo centrale nel modello, richiamando la teoria della relatività di Einstein, in cui lo spazio rappresenta una dimensione attiva e strettamente legata alla forza gravitazionale, non limitandosi ad assumere il ruolo di "contenitore". Questo aspetto risulta rilevante per le relazioni umane, poiché la maggior parte di esse si svolge in uno spazio fisico che è, a sua volta, influenzato dalla distanza.

L'obiettivo di questa rassegna bibliografica è esaminare l'interazione tra fisica e scienze sociali attraverso lo studio del modello gravitazionale. La trattazione seguirà un percorso cronologico, ripercorrendo le principali fasi attraverso le quali la legge gravitazionale è stata reinterpretata nelle scienze sociali e applicata in diversi contesti. Verrà condotta un'analisi metodica dei principi e delle dinamiche che regolano i diversi modelli, con l'obiettivo di formulare conclusioni solide. Infine, verranno discussi i possibili sviluppi futuri della disciplina, ponendo l'accento sulle nuove prospettive teoriche e applicative, nonché sulle criticità ancora da superare.

1. Evoluzione storica del modello gravitazionale: l'origine e il focus sulla distanza

I primi studi di fisica sociale, o sociofisica, risalgono ad oltre 200 anni fa. Già dal XVIII secolo, Antonio Genovesi, primo docente italiano di Economia all'Università di Napoli, tentò di spiegare come la natura dei rapporti umani fosse influenzata da una forza naturale di coesione sociale. Ispirato dagli ideali illuministi, Genovesi fu tra i primi a trasferire i principi delle scienze naturali all'interno delle scienze sociali, proponendo un'interpretazione "fisica" delle dinamiche relazionali. Nella sua opera *Lezioni di commercio o sia d'economia civile* (1769), egli applicò metafore ispirate alla gravità newtoniana, descrivendo come il comportamento umano sia guidato da un'attrazione naturale tra individui (Zamagni, 2019). In *Diceosina* (1766), introdusse i concetti di "forza di concentrazione" e "forza diffusiva", con l'intento di descrivere le relazioni umane come un sistema dinamico di scambio, analogo all'equilibrio tra forze nella fisica. In questa prospettiva, ogni individuo che riceve sostegno, amore e aiuto tende a restituire un valore equivalente: la "forza di concentrazione", ossia ciò che si riceve dall'esterno, e la "forza diffusiva", ovvero ciò che si restituisce agli altri, interagiscono producendo equilibrio, come nei sistemi fisici.

Questa impostazione concettuale venne ripresa all'inizio del XIX secolo da Henri de Saint-Simon, il quale, nelle *Lettere di un abitante di Ginevra* (1803), propose una vera e propria "fisica sociale", auspicando l'uso di principi scientifici per comprendere e regolare i rapporti tra individui. In questo quadro, l'applicazione del modello gravitazionale alle scienze sociali rappresenta un approccio significativo, ispirato a determinate leggi fisiche, per comprendere e analizzare i flussi sociali.

Nella sua formulazione teorica, il modello gravitazionale afferma che l'intensità dell'interazione tra due entità sociali (persone, gruppi, territori) è direttamente proporzionale alla loro "massa" (intesa come dimensione economica, demografica o culturale) e inversamente proporzionale alla "distanza" tra esse. Questa visione venne approfondita da Walter Isard (1954, p. 308), secondo cui: «le variabili di distanza agiscono in modo molto simile rispetto al mondo sociale e al mondo naturale» (Isard, 1954, p. 308). Da questa osservazione deriva

l'idea che qualsiasi modello includente la distanza come fattore di costo diretto debba prevedere una relazione di tipo gravitazionale.

Negli stessi anni, Carrothers (1956, p. 99), pur riconoscendo che «non sia possibile descrivere le azioni e le reazioni del singolo uomo in termini matematici», suggerì che fosse invece possibile individuare schemi ricorrenti nel comportamento di un gruppo di persone attraverso l'analisi probabilistica. Questo fenomeno è osservabile in tutti i campi delle scienze sociali, poiché gli individui, quando agiscono in gruppo, tendono a mostrare regolarità comportamentali diverse rispetto a quando operano singolarmente. Ciò presenta un'analogia con la meccanica statistica di Boltzmann e Maxwell: non si può descrivere il comportamento delle molecole singolarmente, ma è possibile prevedere l'azione collettiva di un insieme delle stesse.

Una delle implicazioni più rilevanti di questo approccio riguarda la non linearità dei fenomeni sociali. Anderson (2004, p. 334) evidenzia come molti comportamenti collettivi seguano una logica "a quadrato", ossia varino in modo proporzionale al quadrato di un determinato fattore rilevante (se X raddoppia, Y tendenzialmente quadruplica). Il principio della crescita quadratica è stato applicato anche nell'analisi della congestione urbana. In particolare, è stato dimostrato che, all'aumentare della popolazione di una città, i problemi di mobilità non crescono in modo proporzionale ma molto più rapidamente, con un andamento superlineare delle difficoltà logistiche (Louf, Barthelemy, 2014). Storicamente, questa prospettiva ha influenzato anche la riflessione demografica. Thomas Malthus (1798), nella sua *Teoria sulla popolazione*, sostenne che la popolazione umana tende a crescere in maniera esponenziale, mentre la produzione di risorse alimentari aumenta in modo lineare, causando inevitabilmente crisi e carestie. Questo principio ha avuto un impatto significativo sulla politica economica e sulla teoria della sostenibilità, influenzando le ricerche successive sui limiti dello sviluppo (Sunny *et al.*, 2024).

Più tardi, Francis Galton (1890, p. 431) intuì il potenziale dell'uso matematico del quadrato dello scarto dalla media, anticipando l'uso della varianza statistica sociale, e affermando: «sembra esserci un ampio campo per l'applicazione di questi metodi ai problemi sociali». La sua analisi della distribuzione delle caratteristiche umane all'interno della popolazione portò allo sviluppo di tecniche statistiche avanzate, tuttora utilizzate in demografia e psicometria. Oggi, questo approccio è stato – in parte – superato, poiché l'analisi dei comportamenti umani tende a considerare congiuntamente la forza di attrazione sociale e la distanza geografica e culturale tra gli attori coinvolti (Sen, Smith, 1995). Tuttavia, l'approccio basato sulla crescita quadratica continua a essere applicato in alcuni ambiti, come nella teoria della diffusione dell'innovazione e nello studio dei sistemi complessi (Rogers, 2003).

Sotto questo profilo, si colloca il contributo di Stuart Carter Dodd (1950), il quale sviluppò un modello innovativo per studiare l'attrattività delle città, introducendo l'idea di assegnare pesi molecolari differenti a sei fattori determinanti: sesso, età, occupazione, reddito, istruzione e religione. L'obiettivo era stimare il numero di interazioni previste tra gli individui nei gruppi di persone, attraverso l'applicazione delle leggi di gravità alle dinamiche sociali. Il modello proposto si basa su quattro dimensioni fondamentali: tempo, spazio, popolazione e attività *pro capite*, seguendo la logica secondo cui l'interazione tra gruppi aumenta con l'aumentare della velocità, della prossimità, della dimensione e del livello di attività («faster, nearer, larger, and leveled up in activity») (ivi, p. 245). Nel dettaglio:

– la *dimensione temporale* influisce attraverso il ritmo delle azioni nel periodo considerato (atti per unità di tempo); una maggiore frequenza di azioni comporta un livello più elevato di interazione;

– la *dimensione spaziale* agisce tramite la distanza, espressa in forma inversa come "nearness", indicando come una maggiore prossimità tra i gruppi accresca le interazioni previste;
– la *popolazione* incide perché gruppi più numerosi sono associati a un livello più alto di interazione;
– l'*attività* pro capite, definita come il numero medio di azioni compiute da ogni individuo in un dato periodo, influisce sull'interazione poiché gruppi caratterizzati da un più alto livello medio di attività generano una quantità maggiore di interazioni.

Le ipotesi di fondo del modello – denominate "ipotesi dell'interazione" – sono due: da una parte le interazioni aumentano quando i gruppi presentano livelli elevati di attività, mentre dall'altra diminuiscono quando tali livelli sono inferiori. Dodd formalizzò questo concetto attraverso l'equazione:

$$I_e = k \frac{I_A \times P_A \times I_B \times P_B \times T}{L} \quad (1)$$

Dove: I_e è il numero previsto di interazioni; k è la costante per ogni tipo di interazione; I_A e I_B sono i livelli di attività per ogni gruppo, mentre P_A e P_B ne rappresentano la dimensione demografica, T è il tempo di interazione; infine, L rappresenta la distanza tra i gruppi. In tale formulazione, i livelli di attrattività reciproca tra due gruppi risultano dal prodotto delle rispettive attività complessive: $(I_A x P_A$ *e* $I_B x P_B x T)$. Le analisi di Dodd dimostrarono la validità predittiva del modello, applicabile a fenomeni come la mobilità urbana, i flussi migratori e le connessioni tra regioni. Tuttavia, egli evidenziò anche la necessità di applicare il modello a contesti più ampi ed eterogenei, includendo fattori economici e culturali per migliorare la precisione delle previsioni. Sulla scia di Dodd, Philbrick (1973) estese il modello introducendo una nuova formula, in cui aggiunse ulteriori pesi specifici per ciascuna popolazione (ivi, pp. 42-3):

$$F_{ij} = k \left(\frac{(W_i P_i)(W_j P_j)}{D_{ij}^2} \right) \quad (2)$$

dove P_i e P_j indicano la popolazione delle aree considerate, valutata in funzione della direzione dei flussi, mentre W_j e W_i sono i pesi assegnati alle rispettive popolazioni. Questi ultimi sono tendenzialmente calcolati sulla base di indicatori di ricchezza oppure stimati come parametro, inteso come un metaforico peso molecolare secondo le formulazioni di Stewart e Dodd (Capoani, 2022). Questo raffinamento teorico consentì di modellare in modo più accurato le dinamiche di attrazione tra entità geografiche e sociali, integrando fattori socio-economici nelle funzioni di interazione. Philbrick riuscì a dimostrare come la distanza giochi un ruolo fondamentale nell'influenzare i comportamenti collettivi, non solo in ambito urbano ma anche in settori globali come il commercio internazionale.

Un ulteriore contributo teorico di rilievo nell'integrazione tra fisica e sociologia attraverso il concetto di gravità è stato offerto dal sociologo Pierre Bourdieu. A partire dagli anni Sessanta, egli sviluppò la nozione di "campo sociologico", un concetto che può es-

sere comparato al "campo vettoriale" in fisica. Secondo Bourdieu e Wacquant (1992), il campo sociale è uno spazio in continua evoluzione, all'interno del quale si determinano le dinamiche di potere legate alla distribuzione di capitale: culturale, sociale e simbolico. In un lavoro successivo, Wacquant (2004) riprende la teoria di Bourdieu e osserva come, pur in assenza di un esplicito riferimento alle leggi fisiche, sia possibile individuare profonde affinità con il concetto di campo vettoriale in fisica. In primo luogo, il "campo vettoriale" rappresenta uno spazio nel quale agiscono delle particelle che subiscono l'azione di forze oggettive, così come nello studio di Bourdieu gli individui sono influenzati da forze esterne. In secondo luogo, il campo sociologico per Bourdieu si ridefinisce costantemente, in modo analogo alla dinamicità del campo vettoriale in fisica. Il parallelismo è epistemologicamente fecondo, rendendo il modello di Bourdieu un contributo significativo per gli studi accademici, oltre ad avvicinarlo per rigore metodologico a quello che caratterizza le leggi fisiche negli studi scientifici.

Inoltre, il modello gravitazionale rappresenta un'importante risorsa euristica, poiché permette di individuare schemi ricorrenti nei fenomeni sociali e di prevedere tendenze comportamentali future. La sua applicazione ha dimostrato come lo spazio influenzi direttamente le dinamiche sociali, regolando il movimento delle persone, la diffusione delle informazioni e l'organizzazione dei flussi economici. In questa prospettiva, la gravità non rappresenta una mera metafora, ma costituisce un modello matematico adattabile a contesti differenti – con le dovute integrazioni (Haynes, Fotheringham, 2020). Le informazioni relative all'attività umana seguono schemi matematici distintivi, riflettendo la diffusione e la convergenza delle interazioni sociali. La necessità di integrare differenti prospettive emerge chiaramente nell'adozione della Prima legge della geografia di Waldo Tobler (1970), che ha rappresentato una svolta nello studio della spazialità delle interazioni umane, poiché è stato tra i primi a evidenziare la dimensione spaziale nella comprensione dei fenomeni geografici/sociali (Murgante, Scorza, 2023). Nonostante la legge possa essere applicata a una vasta gamma di contesti (ad esempio, l'economia, l'urbanistica, le relazioni sociali, le dinamiche ambientali, la diffusione delle malattie infettive ecc.), fu solo a partire dagli anni Novanta che venne riscoperta in letteratura e utilizzata nella ricerca geografica e sociale (Sui, 2004). Essa afferma: «ogni cosa è correlata a ogni altra, ma le cose vicine sono più correlate di quelle lontane» (Tobler, 1970, p. 236). In altre parole, le entità geograficamente prossime tendono a interagire maggiormente e a influenzarsi reciprocamente rispetto a quelle più distanti, secondo un principio noto come "decadimento della distanza". La teoria di Tobler si focalizza sul concetto generale di "tutto" anziché su masse misurabili come avviene nel modello gravitazionale, lasciando maggiore spazio allo studio di concetti immateriali come la conoscenza, la cultura, le idee ecc.

Come il modello gravitazionale, anche la Prima legge di Tobler[1] è stata utilizzata nel corso del tempo per descrivere una serie di modelli di interazione spaziale umana (Rey, 2015). La formalizzazione matematica di questo principio, proposta successivamente da Rey (2015), è la seguente:

$$T_{ij} = \frac{P_i P_j}{D_{ij}^{\beta}} \tag{3}$$

[1] In letteratura, spesso il modello di gravità e la Prima legge della geografia sono considerati un unico modello.

dove T_{ij} rappresenta il grado di interazione spaziale (migrazione, flussi commerciali, viaggi aerei ecc.) tra i luoghi *i* e *j*. T_{ij} è proporzionale alle dimensioni della popolazione e inversamente proporzionale alla distanza. P_i è la popolazione all'origine e P_j quella alla destinazione. In questa formula, la popolazione viene utilizzata come variabile per la dimensione, e D_{ij} è la distanza tra queste posizioni[2]. La forza del declino dell'interazione con l'aumento della separazione è stimata da β.

Questa legge può essere utilizzata in diversi contesti. Un possibile impiego, ad esempio, riguarda la previsione di flussi migratori tra due città, così come gli scambi commerciali e le interazioni tra mercati. Sebbene presenti una notevole capacità descrittiva, la legge di Tobler mostra limiti epistemologici, in quanto si concentra sull'impatto della distanza, senza necessariamente indagare le cause profonde relative alla distribuzione dei fenomeni sociali. In sostanza, questo modello è orientato verso una geografia dello spazio, focalizzandosi sul decadimento delle distanze e sui fenomeni di concentrazione e dispersione.

In conclusione, il percorso evolutivo del modello gravitazionale, dalle sue origini newtoniane alle applicazioni contemporanee nelle scienze sociali, dimostra che la distanza fisica e simbolica continua a giocare un ruolo centrale nelle interazioni umane.

La validità del modello dipende dalla sua integrazione con approcci in grado di cogliere la pluralità delle variabili sociali (geografia sociale, economia e macrosociologia). Resta aperta la sfida di estenderlo a dinamiche emergenti e culturali, conciliando formalizzazione matematica e complessità sociale.

2. La gravità applicata ai flussi di persone

Le prime applicazioni sistematiche e scientifiche del concetto di gravità alle scienze sociali risalgono al XIX secolo. Inizialmente, Carey (1858, p. 42) adattò la Legge di gravitazione universale di Newton a fenomeni sociali quali il "traffico ferroviario e le migrazioni", rilevando la tendenza dell'individuo a "gravitare verso i suoi simili". Questa intuizione rende il lavoro di Carey particolarmente interessante poiché propone un'analogia con la fisica: come l'attrazione gravitazionale agisce fra particelle di materia, così nella società, gli individui (definiti "molecole della società") sono soggetti a una forza d'attrazione sociale reciproca. Tale impostazione viene ripresa da Ravenstein (1885) nella Legge sulla migrazione, secondo cui un "centro popolato" attrae migranti da altri centri in proporzione diretta rispetto alla dimensione della popolazione e inversa rispetto alla distanza tra i centri. La formalizzazione matematica di questo principio, proposta successivamente da Philbrick (1973), è la seguente:

$$M_{ji} = f\left(\frac{Pi}{Dij}\right) \tag{4}$$

dove M_{ji} è il flusso migratorio dal centro *j* al centro *i*[3], $f(P_i)$ è una funzione della dimensione della popolazione *i*, e *Dij* è la distanza tra i due centri abitati. L'equazione esplicita

[2] In letteratura, la distanza viene stimata utilizzando diverse variabili geografiche e di politica commerciale, come le distanze bilaterali, le tariffe (dollari), la presenza di valute uguali o diverse, la presenza di accordi regionali (*regional trade agreements*, RTAs) ecc.

[3] Bisogna considerare che nella formula è la popolazione del Paese *i* ad attrarre i flussi migratori.

l'idea secondo cui il flusso migratorio atteso aumenta con la dimensione demografica del centro di destinazione e diminuisce all'aumentare della distanza tra i due centri.

Questa tradizione di ricerca trova una significativa estensione contemporanea nel lavoro di Lewer e Van den Berg (2007), i quali formalizzano un modello gravitazionale dell'immigrazione specificamente calibrato per analizzare i flussi migratori tra i Paesi membri dell'Organizzazione per la cooperazione e per lo sviluppo economico (OCSE) nel periodo 1991-2000. Coerentemente con i postulati fondamentali del modello gravitazionale, l'analisi empirica mostra che la dimensione demografica esercita un effetto attrattivo significativo sui flussi migratori, mentre la distanza agisce come fattore di attrito, riducendo l'intensità degli spostamenti all'aumentare della separazione geografica. I risultati dimostrano che questi due elementi fondamentali spiegano una quota rilevante della varianza nei flussi migratori osservati, confermando la validità dell'analogia gravitazionale anche per lo studio della mobilità umana internazionale. Tuttavia, come osservato da Zhang e Li (2024), il modello utilizzato non coglie le dinamiche temporali del fenomeno, né chiarisce le ragioni alla base dello spostamento. Di conseguenza, i flussi osservati non sempre riflettono adeguatamente l'attrattività che i centri di destinazione esercitano sulla popolazione. Inoltre, è opportuno sottolineare che i fenomeni migratori possono essere influenzati sia dall'esistenza di aree di libera circolazione sia da leggi sull'immigrazione. Da un lato, questi fattori sono tra loro strettamente connessi e spesso svolgono un ruolo determinante nella configurazione dei flussi migratori; dall'altro, poiché la migrazione non è sempre pienamente regolabile o controllabile, le aree di movimento e le relative normative risultano talvolta poco efficaci. Elementi come politica, lingua, cultura e tassazione influenzano la percezione della distanza dei migranti e, in alcuni casi, la capacità attrattiva di un Paese. Al contempo, questi stessi elementi sono a loro volta influenzati dagli accordi sul libero scambio e, più in generale, dai flussi migratori[4].

Nel XX secolo, il modello gravitazionale è stato progressivamente adattato per spiegare fenomeni sociali più complessi, soprattutto nell'ambito della geografia economica e urbana. Reilly (1929) estese il concetto di "gravitazione sociale" ai consumatori e alle città, spiegando che la forza di attrazione esercitata dalle città sui consumatori dei dintorni è direttamente proporzionale alla dimensione della popolazione e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le due[5]. Pertanto, a parità di condizioni, i consumatori tenderanno a spostarsi verso le città più grandi, spinti dalla convinzione di avere più possibilità di successo. Tuttavia, in linea con la Legge di Newton, il livello di attrattività si neutralizza nel "punto di rottura", che delimita l'area entro la quale un gruppo di persone sarà più incline a dirigersi verso una città piuttosto che verso un'altra. In questo punto, i consumatori risultano indifferenti tra le città in competizione.

Un passaggio cruciale si ebbe con l'astrofisico John Q. Stewart (1941), il quale contribuì all'applicazione di strumenti e concetti della fisica alle scienze sociali, tra cui quello della curva normale di Carl F. Gauss (1809), utile per l'analisi della distribuzione di diversi aspetti della società – quali attributi sociali, comportamenti, disuguaglianze e dati sociodemografici – all'interno di una popolazione. Stewart osservò anche regolarità empiriche nella distanza, estendendo metaforicamente la Legge di gravità ai fenomeni demografici. In

[4] Per questi motivi, ho considerato gli accordi commerciali come la terza leva macroeconomica del potere economico, e gli accordi sui movimenti delle persone come la quarta leva macroeconomica invisibile. Quest'ultima è invisibile perché questi accordi sono più difficili da valutare economicamente.

[5] La distanza considerata da questa legge è una linea retta: ostacoli come montagne, fiumi, deserti ecc. non vengono presi in considerazione.

questa prospettiva, lo studioso propose un'analogia tra le regolarità empiriche individuate nello studio dei flussi demografici, in funzione di distanza e dimensioni dei centri abitati, e la legge di gravitazione universale. L'astrofisico formulò così il "modello di gravitazione demografica", in cui l'intensità dei flussi tra due centri *i* e *j* è direttamente proporzionale al prodotto delle loro popolazioni e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa. In altre parole, secondo il modello, alte concentrazioni di persone esercitano una forza di attrazione maggiore sugli individui esterni, mentre il fattore della distanza agisce in direzione opposta. In formula:

$$F_{ij} = k \left(\frac{P_i P_j}{D_{ij}^2} \right) \tag{5}$$

dove F_{ij} è la forza di interazione tra i centri demografici *i* e *j*, *k* è una costante[6], P_i è la popolazione dell'area *i*, P_j è la popolazione dell'area *j*, e D_{ij} è la distanza tra *i* e *j*. Stewart, come Reilly, considera le distanze in linea retta, pur riconoscendo che, in alcuni casi, la distanza dovrebbe essere interpretata in altro modo. Più specificamente, Stewart propose di adottare valori diversi per la popolazione in base alla nazionalità, considerando il "peso molecolare" di ciascun membro della popolazione, ossia un coefficiente di ponderazione. Secondo questo principio, alcuni individui contribuiscono più di altri alla "massa" totale del centro in questione e quindi alla forza di attrazione stimata dal modello. Viene scelta come unità di misura di riferimento la massa molecolare media della popolazione americana.

Il contenuto e il metodo del suo approccio si basano sulle formule interdisciplinari radicate nella fisica, con la convinzione che i fenomeni umani possano essere studiati con la stessa precisione delle leggi fisiche. Partendo dal concetto di gravitazione demografica, Stewart progredì nell'analisi demografica seguendo le stesse leggi valide in fisica. Tenendo conto della proprietà vettoriale già menzionata, questo può essere espresso anche nel punto *i* come (Philbrick, 1973, p. 42):

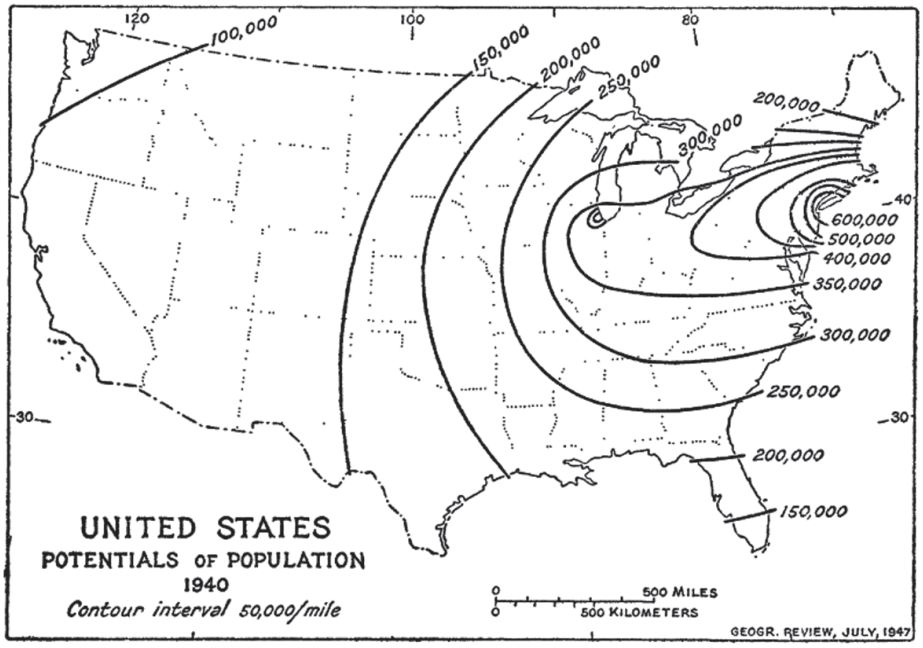
$$V_i = k \sum_{J=1}^{n} \frac{P_j}{D_{ij}} \tag{6}$$

dove V_i è il potenziale di attrazione della popolazione verso il centro *i*, *k* è una costante, P_j è la popolazione, e D_{ij} è la distanza. Mentre la sommatoria indica che si sta sommando il contributo di tutti i punti *j* rispetto al centro *i*. Stewart dimostrò come il risultato della sua formula possa essere utilizzato per tracciare una mappa della superficie impiegando i "contorni di equipotenziale", ovvero curve che uniscono punti con lo stesso valore di potenziale. Questo modello ricorda una carta meteorologica sinottica, conosciuta anche come "carta del tempo", e serve per visualizzare le variazioni spaziali di un fenomeno

[6] Stewart non esplicita il valore della costante *k*, la cui determinazione è lasciata alla calibrazione empirica o alla normalizzazione delle unità di misura.

meteorologico (come la temperatura, l'altitudine, la pressione atmosferica o qualsiasi altra grandezza che può essere misurata in modo continuo su una superficie) per mezzo di linee circolari. Nella figura 1, prodotta da Stewart, è possibile osservare come queste linee assumano una forma circolare, affine a quella delle linee presenti nelle carte meteorologiche. I contorni di equipotenziale collegano punti con lo stesso valore del potenziale, esattamente come avviene nei campi gravitazionali. Questa rappresentazione risulta essere particolarmente utile in quanto consente di visualizzare le variazioni del fenomeno studiato (come l'attrattività potenziale di un punto) in maniera chiara e continua nello spazio.

Figura 1
Contorni del potenziale di popolazione uguale per gli Stati Uniti, 1940



Fonte: Stewart (1948).

In parallelo, Rice e Gallagher (1948) contribuirono ad affinare il modello introducendo pesi differenziati per la popolazione nelle loro analisi sul traffico urbano a New Haven, tenendo conto della ricchezza delle diverse aree. Questa scelta consentiva di attribuire un'importanza maggiore alle zone più prospere, riflettendo in modo più accurato il comportamento e le dinamiche reali dei viaggiatori. Venne introdotto anche il concetto di "directionally zoned populations", ossia di popolazioni suddivise per zone direzionali, un approccio che considerava non solo la distribuzione spaziale della popolazione, ma anche la "distanza dalla stazione ferroviaria" (o da un'area terminale). Tale parametro risultò

cruciale, poiché evidenziava come la vicinanza a nodi di trasporto strategici influenzasse fortemente la scelta della città di origine del viaggiatore e, di conseguenza, la dinamica dei flussi di traffico. Questo studio venne ripreso da Stewart, che, sempre nel 1948, notò come alcune città avessero un'influenza maggiore e, di conseguenza, assegnò pesi molecolari diversi alle popolazioni delle varie regioni.

La linea evolutiva del modello gravitazionale prosegue poi con Alan Voorhees (1955/2013), in *Una teoria generale del movimento del traffico*, dove propose uno dei primi tentativi di applicazione del principio gravitazionale all'analisi del traffico nelle aree urbane. Secondo questa impostazione, ogni viaggio comporta quattro decisioni fondamentali, spesso prese contemporaneamente. Esse riguardano la scelta di effettuare il viaggio (costo-opportunità della distanza), la scelta della destinazione (attrattiva), la scelta del mezzo di trasporto e quella del percorso (ruolo della tecnologia e dell'informazione). L'analisi del traffico, di conseguenza, può essere molto utile per affrontare i problemi che di norma colpiscono le aree urbane, come la congestione e l'inquinamento (Zhao *et al.*, 2017). In questo contesto, si può parlare di *population nodes* (Thompson *et al.*, 2019), termine che rappresenta la concentrazione di un gruppo di persone nelle varie reti stradali, prendendo in considerazione sia la dimensione dell'insieme di abitanti delle città circostanti che la loro posizione geografica. In questo modo, si può rilevare quali siano le strade e le autostrade più o meno frequentate in base alla vicinanza o alla distanza dai centri più popolati.

Tale studio segue lo stesso principio delle formule analizzate in precedenza. Infatti, il flusso di traffico diminuisce all'aumentare della distanza da tali grandi centri urbani, mentre cresce in nodi con una maggiore popolazione o attrattività[7].

In questa stessa cornice, si colloca il contributo di Hansen (1959), che introdusse l'Indice di accessibilità (*Accessibility Index*, AI), un metodo spaziale creato per stimare lo sviluppo di terreni residenziali in ambito urbano. Hansen definisce l'accessibilità come la misura del potenziale di opportunità di interazione disponibili in una determinata zona, in funzione della dimensione delle attività localizzate nelle altre aree e della distanza (o tempo di viaggio) che le separa. Sostanzialmente, l'Indice serve a stimare quanto una determinata area sia "accessibile" per l'insediamento residenziale in base alla facilità con cui i residenti possono raggiungere servizi quali lavoro, istruzione, supermercati, farmacie. Zone vicine a poli ricchi di servizi, o a essi ben collegate, risultano essere più accessibili e potenzialmente più inclini a svilupparsi. Formalmente, l'AI della zona *i* è espresso come:

$$A_1 = \frac{S_2}{T_{1,2}^x} + \frac{S_3}{T_{1,3}^x} + \ldots + \frac{S_n}{T_{1,n}^x} \tag{7}$$

dove *Sj* rappresenta la dimensione dell'attività nella zona j, T_{ij} il tempo di viaggio (o distanza) tra le zone *i* e *j*, e *x* un esponente che descrive l'effetto dell'impedenza spaziale.

Questo Indice è concettualmente legato alla Legge di gravità di Newton e si inserisce per definizione nelle teorie classiche di localizzazione economica. La sua forza risiede nella

[7] Studi recenti non rifiutano l'idea che le variabili dimensionali (masse) siano determinate in modo esogeno al sistema: i totali economici e demografici sono generalmente trattati come dati esogeni e non variabili sconosciute da determinare. Questi modelli includono l'attrattività, che è sensibile alla rete di trasporto (Philbrick, 1973, p. 45).

capacità di considerare sia la natura delle attività svolte dagli individui, sia la qualità e l'efficienza delle connessioni offerte dai mezzi di trasporto.

L'Indice di accessibilità ha avuto un impatto significativo nella ricerca degli ultimi 60 anni, affermandosi come uno strumento fondamentale nella geografia urbana e nella modellazione spaziale. Grazie alla sua applicazione, è stato possibile comprendere con maggior chiarezza il ruolo determinante esercitato da un'elevata accessibilità e da un efficiente sistema di trasporti sullo sviluppo urbano. Tale Indice può essere utilizzato anche in altri campi accademici, come la geografia rurale, la geografia sanitaria, la geografia temporale, l'economia spaziale e l'ingegneria dei trasporti (Geurs *et al*., 2015). Sulla stessa linea di ricerca, l'economista Quandt (1965) creò un modello gravitazionale di viaggio, estendendo l'impostazione ai movimenti tra aree di origine e destinazione e integrando variabili socio-economiche[8]. Tale modello è collegato anche ai viaggi extraurbani attraverso diverse riformulazioni e adattamenti del modello originale. Esso fornisce un quadro concettuale che considera la domanda di viaggio come una forza attrattiva tra due luoghi, dove la quantità di movimento è influenzata da variabili chiave.

Sul piano applicativo, Quandt scompone la forza attrattiva tra due aree geografiche in determinanti osservabili che influenzano la mobilità. *In primis*, le dimensioni demografiche delle due aree giocano un ruolo fondamentale, poiché zone più popolate tendono a generare un maggior numero di flussi.

Allo stesso modo, il livello economico, espresso attraverso i redditi medi, influisce sulla propensione delle persone allo spostamento, con redditi più alti che favoriscono viaggi più frequenti. Inoltre, la struttura economica locale viene analizzata attraverso la distribuzione della forza lavoro nei settori industriali, manifatturieri e in altre occupazioni specifiche, evidenziando che le esigenze lavorative rappresentano uno dei principali motori della mobilità. Parallelamente, il tempo e il costo di viaggio incidono direttamente sulla decisione di spostarsi, poiché viaggi più lunghi o costosi tendono a essere meno frequenti, mentre una maggiore disponibilità di mezzi per il trasporto pubblico rende le destinazioni più accessibili e attraenti. In conclusione, i parametri calibrati combinano tutti questi elementi per rappresentare le dinamiche reali degli spostamenti, consentendo al modello di stimare i flussi di traffico tra l'area di origine e l'area di destinazione.

3. La gravità applicata ai flussi economici

L'applicazione del modello gravitazionale si estende ben oltre l'ambito delle migrazioni, della demografia e dei viaggi, trovando una delle sue formulazioni più significative nell'analisi del commercio internazionale. Questo passaggio metodologico rappresenta una delle evoluzioni concettuali più rilevanti della sociofisica. La logica sottostante si ispira direttamente al lavoro di Stewart e ne riproduce la dinamica. Walter Isard (1954) fu il primo a utilizzare il modello gravitazionale nello studio del commercio internazionale, introducendo il concetto di "potenziale di reddito" nell'economia internazionale, basato sull'idea di "gravitazione demografica" precedentemente proposta da Stewart. Tuttavia, fu Tinbergen (1962) a rendere il modello più semplice e diffuso nella sua versione bilaterale standard, ispirata alla Legge di gravitazione di Newton. Questa formulazione offre un approccio

[8] In seguito, sarà sviluppato dallo stesso economista e dai suoi colleghi e studenti. Il lettore interessato è indirizzato a Quandt (1992).

operativo per analizzare gli scambi tra Paesi, evidenziando il ruolo di fattori come la distanza e il reddito. A differenza di Isard, che ha approfondito un quadro teorico più ampio dell'economia internazionale, Tinbergen si focalizza sugli aspetti empirici, sviluppando strumenti per misurare e prevedere i flussi commerciali (Capoani, 2023a).

Entrambi gli approcci innovativi hanno facilitato la comparsa di nuove prospettive nello studio dei flussi commerciali internazionali, contribuendo significativamente alla comprensione delle dinamiche economiche su scala globale. Secondo l'ipotesi di Isard, le nazioni tendono strutturalmente allo scambio in base alle loro dimensioni economiche e alla vicinanza geografica. Quest'ultima favorisce i contatti e le comunicazioni, i quali permettono l'istituzione di rapporti commerciali, per mezzo di variabili[9] come bassi costi di trasporto e somiglianze culturali, istituzionali e linguistiche tra Stati e regioni[10].

Di conseguenza, dovrebbe sussistere una relazione di gravità in qualsiasi modello che analizzi la distanza come fattore determinante dell'aumento dei costi. La sua formula in economia internazionale è la seguente (Isard, 1954, p. 308):

$$i\,V = \sum_{j=1}^{n} i\,V_j = \sum_{j=1}^{n} k\frac{Y_j}{d_{ij}^{a}} \tag{8}$$

dove iV è il potenziale di reddito prodotto da tutti gli Stati sullo Stato i, e iV_j il potenziale di reddito prodotto dello Stato j sullo Stato i, d_{ij} è la distanza effettiva media tra gli Stati i e j considerando anche fattori di trasporto o costi relativi[11], k è una costante paragonabile alla costante gravitazionale, mentre a è un esponente che modella l'effetto della distanza sui flussi, inferiore all'esponente al quadrato di Stewart[12]. Pertanto, secondo questa formula, uno Stato con reddito elevato e geograficamente vicino a un altro Stato esercita un potenziale maggiore. Il modello sviluppato da Isard potrebbe essere utile per valutare l'implicita attrattività economica tra Paesi e analizzare le opportunità di sviluppo di specifiche regioni, considerando sia il livello di ricchezza dei loro partner economici sia la loro distanza geografica.

Sempre Tinbergen (1962), in *Plasmare l'economia mondiale*, sviluppò l'equazione di gravità comunemente applicata nei successivi studi di economia internazionale, derivata – come anticipato – dall'equazione di Newton. In questo modo, elaborò un semplice modello bilaterale per l'analisi del commercio tra coppie di Paesi. La formula seguente rappresenta una versione semplificata del modello originale di Tinbergen (1962, p. 264, Appendice VI, Equazione 1), che prevede esponenti (a_1, a_2 e a_3) sulle variabili anziché una proporzionalità diretta:

[9] Il potenziale di reddito varia inversamente alla distanza. Tra un gruppo di Stati, quello più simile per cultura e tecnologia alla nazione i, avrà un potenziale di reddito maggiore su i.

[10] Tuttavia, come osserva Capoani, nel *gravity model* la distanza non coincide esclusivamente con una misura geografica, ma rappresenta un fattore di resistenza che include l'insieme delle variabili che incidono negativamente sull'intensità dei flussi, come costi di trasporto o altre frizioni economiche e istituzionali (Capoani, 2023a, p. 6; 2023b, p. 868)

[11] Si noti che la distanza, applicata al commercio, fa parte del "fattore di resistenza" che comprende tutte le variabili che agiscono come barriere commerciali, come una sorta di tassa "a cuneo" che impone costi e influenza le scelte. Inoltre, secondo Isard, la distanza dovrebbe coprire il movimento relativo delle merci su diversi mezzi di trasporto.

[12] Rispetto a Stewart, Isard perde l'esponente al quadrato. Pertanto, sebbene il modello di Isard segua anche la sociofisica, lo fa in misura minore rispetto a quello dell'astrofisico.

$$F_{ij} = A \frac{Y_i Y_J}{D_{ij}} \quad (9)$$

in cui F_{ij} rappresenta il valore del commercio tra i Paesi *i* e *j*, *A* è una costante paragonabile alla costante gravitazionale, Y_i è il PIL del Paese *i*, Y_j è il PIL del Paese *j*, e D_{ij} è la distanza tra i due Paesi.

Egli, infatti, sviluppò un modello basato sull'idea che il commercio internazionale tra due Paesi fosse influenzato da due forze principali: in modo direttamente proporzionale al loro PIL, e in modo inversamente proporzionale alla loro distanza reciproca. Tuttavia, questo modello si è evoluto progressivamente nel tempo e alcuni studi successivi hanno evidenziato l'esistenza di ulteriori fattori che determinano il commercio tra due Paesi, come la politica, il grado di apertura al commercio estero, nonché diversi aspetti culturali come la religione e la lingua (Mele, Baistrocchi, 2012).

In questa direzione, Anderson e van Wincoop (2003) hanno fornito una formulazione strutturale del modello gravitazionale, introducendo il concetto di resistenze multilaterali, ossia l'idea che gli scambi tra due Paesi non dipendono solo dalla distanza tra essi, ma anche da tutti gli ostacoli che ciascuno dei due incontra nel commercio con gli altri partner. In questa prospettiva, il termine "distanza" non si riferisce solo alla componente geografica, ma riflette anche barriere politiche e istituzionali. Questo approccio si sviluppa a partire dall'evidenza empirica fornita da McCallum (1995), il quale aveva documentato per la prima volta gli effetti del cosiddetto "border effect" (effetto confine), secondo cui i confini nazionali rappresentano un ostacolo significativo agli scambi commerciali. Anderson e van Wincoop (2003) forniscono una spiegazione teorica del fenomeno, mostrando che i confini nazionali riducono gli scambi tra Paesi industrializzati di un ordine di grandezza "moderato" (20-50%). Inoltre, applicando il loro approccio al caso Stati Uniti-Canada, gli autori riscontrano come la presenza del confine nazionale comporti una riduzione del commercio del 44% tra Stati Uniti e Canada, e del 29% tra altri Paesi industrializzati.

Ulteriori evidenze empiriche confermano l'importanza della struttura gravitazionale nei flussi commerciali contemporanei. In uno studio recente basato su un ampio campione di coppie di Paesi nel periodo 1948-2021, Cevik (2023) stima un modello gravitazionale che mostra come un aumento del 10% del PIL *pro capite* del Paese esportatore sia associato a un incremento dell'8,8% dei flussi commerciali bilaterali, mentre un aumento analogo nel Paese importatore comporta un incremento del 6,5%. Al contrario, un aumento del 10% della distanza geografica tra due Paesi è associato a una riduzione superiore al 16% degli scambi. Tali risultati confermano la centralità della dimensione economica e della distanza come determinanti strutturali del commercio internazionale.

In parallelo, la letteratura economica ha proposto diversi tentativi volti a fornire una spiegazione teorica della regolarità empirica osservata nei flussi commerciali. Un primo contributo è rappresentato dal modello di Armington (1969), secondo il quale i flussi di commercio derivano dalla differenziazione dei beni in base al Paese di origine e dalle preferenze dei consumatori. In questa prospettiva, Eaton e Kortum (2002) propongono un quadro teorico in cui le differenze tecnologiche tra Paesi, insieme alle barriere geografiche, determinano i flussi commerciali e conducono alla formulazione di un'equazione di gravità. In tale contesto di riferimento, il processo di globalizzazione può essere inteso come un processo di diminuzione dei *trade costs*, mentre gli shock geopolitici tendono ad accrescere

tali costi e a comprimere gli scambi bilaterali, come suggerito empiricamente da Cevik (2023) attraverso un modello gravitazionale dei flussi commerciali.

Tinbergen evidenziò, inoltre, che la dimensione economica del Paese importatore svolge una doppia funzione: da un lato, riflette la domanda complessiva; dall'altro, può essere letta come un indicatore della diversità produttiva.

Tuttavia, egli rilevò empiricamente che i Paesi più ricchi tendevano a commerciare "meno del normale" rispetto a quanto previsto da una relazione lineare tra dimensione economica e intensità degli scambi. Con relazione lineare, in questo caso, si intende l'ipotesi che, all'aumentare del reddito o del PIL, gli scambi aumentano in modo proporzionale. In più, i modelli di gravità sono stati utilizzati in modo simile ed estensivo in economia per valutare i flussi di investimenti diretti esteri (IDE). Sulla base del modello di Tinbergen (1962), vista la sua adattabilità a diversi tipi di flussi commerciali internazionali, Eaton e Tamura (1994), Graham (1994) e Frankel e Wei (1996) impiegarono la gravità in tale ambito. In effetti, i governi considerano sempre più gli IDE un motore di sviluppo[13], attribuendo loro un ruolo centrale sia nelle strategie di crescita che nei negoziati sugli accordi commerciali internazionali. Intuitivamente, l'adesione a tali trattati, orientati a diminuire le barriere, dovrebbe contribuire ad aumentare gli investimenti. Inoltre, l'esistenza di una lingua condivisa, di una moneta comune o di un sistema giuridico condiviso tra i Paesi potrebbe favorire un incremento delle opportunità di investimento. Nel caso degli IDE, la formulazione del modello è la seguente:

$$FDI_{ij} = A\,\frac{y_i y_j}{D_{ij}} \tag{10}$$

con FDI_{ij} che rappresenta il flusso di IDE tra due Paesi i e j; A è una costante; y_i è il PIL o il PNL del Paese i; y_j è il PIL o il PNL del Paese j; e, infine, D_{ij} è la distanza tra i Paesi i e j.

Un'applicazione ancora più raffinata della legge gravitazionale è offerta dall'economista e geografo David Huff (1963), il quale traslò il modello nell'ambito del comportamento dei consumatori – come già parzialmente affrontato da Reilly (1929) – con lo scopo di valutare quanto una variabile specifica o uno stimolo influenzi in modo significativo le scelte di acquisto e le preferenze dei consumatori. L'*appeal* di un punto vendita per il consumatore è inversamente proporzionale all'utilità percepita di qualsiasi altro punto vendita alternativo. In altre parole, più un esercizio commerciale è lontano, meno sarà attraente per i possibili consumatori. Le aziende devono quindi considerare anche altre strategie per aumentare l'attrattività (Joseph, Kuby, 2011). La probabilità viene calcolata considerando le variabili di distanza e l'attrattività, e tenendo conto della concorrenza. È importante notare che nel modello standard di Huff non si considera la differenziazione dei beni, di feedback tra i consumatori o di beni alternativi. Il solo termine di attrattività del punto vendita al dettaglio nella località j, che precede la normalizzazione necessaria a ottenere la probabilità finale, è definito come:

[13] L'aumento dei flussi di IDE è iniziato con la globalizzazione ed è proseguito negli anni, subendo però una battuta d'arresto a causa del calo provocato dalla crisi finanziaria internazionale del 2008.

$$attractiveness\ j = \frac{size\ of\ retail\ outlet\ j}{D_{ij}^{x}} \tag{11}$$

La probabilità che la domanda del consumatore nella località *i* sia soddisfatta dal negozio *j* sarà pari all'attrattività relativa di *j* rispetto a quella degli altri negozi[14]. Il modello di probabilità di Huff dimostra che la capacità attrattiva di un negozio per i consumatori cresce all'aumentare delle sue dimensioni. Tuttavia, come già detto in precedenza, la probabilità che i clienti scelgano quel punto vendita diminuisce all'aumentare della distanza.

Studi più recenti hanno perfezionato il modello gravitazionale per affrontare le sfide legate alla digitalizzazione. Anderson *et al.* (2015), ad esempio, hanno introdotto un modello strutturale di gravità per analizzare il commercio internazionale di diversi servizi, settori, Paesi e periodi di tempo, considerando anche gli effetti degli accordi di libero scambio (Kepaptsoglou *et al.*, 2010). Nello studio, oltre alle distanze commerciali, vengono considerati anche aspetti rilevanti per i servizi, come le istituzioni e le infrastrutture digitali. L'introduzione di queste variabili consente di cogliere la complessità del commercio nei servizi, che può essere influenzato da fattori differenti rispetto a quelli che incidono sul commercio di beni. Ciò consente di determinare con maggiore precisione le barriere legate alle frontiere nel commercio dei servizi che, data la loro natura intangibile, sono difficili da identificare empiricamente. Gli autori concludono che gli aspetti linguistici risultano più influenti negli scambi di servizi rispetto a quelli di beni, sottolineando l'importanza dei fattori culturali nel commercio internazionale di servizi.

In quest'ottica, la letteratura ha evidenziato come le stime del modello gravitazionale possano essere usate non solo per descrivere i flussi commerciali, ma anche per valutare l'impatto delle politiche commerciali e le implicazioni in termini di benessere, considerando la globalizzazione come un processo di riduzione dei costi di scambio (Head, Mayer, 2014).

4. Limiti del modello gravitazionale e sviluppi futuri

Nel corso del tempo, il modello gravitazionale ha trovato numerose applicazioni nelle scienze sociali; tuttavia, la sua applicazione presenta limiti epistemologici e criticità metodologiche che non possono essere trascurate. Nello specifico, il modello tende a privilegiare una visione meccanicistica delle relazioni umane, trascurando fattori non lineari e imprevedibili come i cambiamenti culturali, tecnologici e politici, spesso difficili da quantificare con rigore (Gutiérrez, Rogoff, 2003). Inoltre, pur basandosi su parametri misurabili per spiegare i flussi tra Paesi, regioni, aziende o altre entità, esso si fonda frequentemente su osservazioni e legami storici. Questo può generare un bias a favore delle entità più grandi e consolidate, sottovalutando invece fattori emergenti e contingenti (Bergstrand, 1985).

Metodologicamente parlando, dall'analisi emerge anche come l'applicazione del modello gravitazionale alle scienze sociali comporti implicitamente una certa forma di de-

[14] La domanda è anelastica: se c'è un solo negozio, sarà totalmente monopolizzata da esso.

terminismo: le relazioni tra entità vengono ricondotte a variabili strutturali quali massa e distanza, secondo una logica predittiva che può ridurre la complessità delle interazioni sociali. Questo rischio di riduzionismo è stato discusso anche da Vygotskij, in una prospettiva che enfatizza la dimensione storico-culturale del comportamento umano. Nella raccolta di saggi *Mind in Society: Storia dello sviluppo delle funzioni psichiche superiori* (1978), egli sottolinea infatti come gli stimoli provenienti dalla società, dalla cultura e dalle interazioni siano indispensabili per lo sviluppo umano, concepito come un processo dialettico non rigidamente predeterminato. In questa prospettiva, il processo individuale risulta dunque legato a dinamiche socialmente costruite e non esclusivamente a vincoli strutturali; un'eccessiva enfasi su modelli predittivi rigidi rischia pertanto di oscurare la dimensione soggettiva e culturale dell'esperienza sociale (Wertsch, 1991).

Queste criticità emergono in modo evidente nello studio dei flussi migratori. Non tutti gli spostamenti sono determinati allo stesso modo dalle medesime variabili: ad esempio, i migranti in cerca di lavoro possono essere influenzati dalla struttura demografica del Paese di destinazione, tendendo a scegliere città con un'alta percentuale di popolazione anziana, indicativa di una minore presenza di residenti in età lavorativa (Kim, Cohen, 2010). Limiti simili possono essere rilevati anche nell'analisi dei flussi economici. Uno dei problemi principali dell'applicazione del modello gravitazionale all'analisi del commercio internazionale risiede nella dipendenza da variabili prettamente economiche e spaziali, in quanto esistono innumerevoli variabili che non possono essere calcolate dalle formule fisiche a causa della loro imprevedibilità. Diversi studi hanno dimostrato che Paesi con legami coloniali e linguistici tendono a commerciare molto più del previsto, suggerendo che fattori storici, istituzionali e culturali possono incidere in modo significativo, talvolta anche quanto la distanza fisica (Frankel, 2010). Inoltre, l'inclusione di variabili specifiche sottolinea la necessità di formulare modelli sempre più sofisticati, in grado di offrire una comprensione più dettagliata delle barriere e delle opportunità in questo campo, specialmente nel contesto economico globale caratterizzato da rapidi cambiamenti tecnologici e sociali.

Pur non consentendo calcoli sempre puntuali, il modello gravitazionale può essere utilizzato per individuare tendenze generali, osservando come i risultati medi cambiano al variare dei parametri, ad esempio in presenza di improvvise oscillazioni dei prezzi. Come mostra il recente studio di Capoani (2023b), le ricerche future mirano a individuare i valori aggiuntivi che influenzano il campo gravitazionale dei flussi commerciali, considerando fattori quali l'estensione del territorio, la concentrazione delle popolazioni nelle varie città, il PIL dei Paesi, l'attività del mercato interno, e le leggi che regolano il libero scambio. In uno studio correlato viene inoltre introdotto il concetto di "flat world", un modello gravitazionale ideale in cui i valori della distanza e tutte le variabili a essa associate vengono trascurati per fare spazio a una distribuzione più equa delle masse e dei commerci (Capoani, 2023a). Altri elementi fondamentali includono l'intensità dei conflitti interni, la situazione politica interna e il tasso di occupazione e disoccupazione.

Un'ulteriore direzione di sviluppo riguarda la concezione della "distanza" come una resistenza complessiva agli scambi, capace di includere non soltanto frizioni economiche o infrastrutturali, ma anche componenti socio-politiche. In questa prospettiva, variabili di cooperazione (ad esempio, accordi e trattati) possono ridurre la resistenza e favorire i flussi, mentre variabili di ostilità (come barriere, tariffe o tensioni) la aumentano, producendo un effetto analogo a un incremento dei *trade costs* nel modello gravitazionale (Capoani *et al*., 2025).

Considerando tali limitazioni, diversi approcci probabilistici sono stati sviluppati con lo scopo di rendere più flessibile l'applicazione del modello ai fenomeni sociali. Invero, di-

versamente da quanto auspicato da Sen e Smith (1995), anche la struttura di queste teorie rimane sostanzialmente deterministica, evidenziando un ulteriore limite epistemologico: mentre i modelli fisici operano in sistemi chiusi e prevedibili, le società umane sono caratterizzate da elevata dinamicità e complessità.

Nonostante queste sfide, la sociofisica è un campo in continua evoluzione, e le ricerche future potrebbero portare allo sviluppo di modelli più contestualizzati, capaci di integrare variabili culturali, storiche e istituzionali. Un caso emblematico è rappresentato dallo studio di Anderson *et al.* (2015), che applica il modello gravitazionale al commercio internazionale integrando variabili emerse nel contesto attuale, come le aree di libero scambio, le infrastrutture digitali o gli aspetti linguistici. Un altro esempio riguarda l'applicazione del modello negli studi sulle reti digitali: Batty (1997) introdusse il concetto di "geografia virtuale", uno spazio generato e sostenuto da sistemi informatici, che si sviluppa oltre i confini della realtà fisica. Diversamente, Gorman e Malecki (2000) coniarono il termine "cybergeografia" per descrivere Internet come un sistema non omogeneo, con livelli di diffusione variabili nelle diverse aree geografiche. In questo contesto, i modelli gravitazionali hanno esaminato le relazioni reciproche tra spazio fisico e spazio virtuale, analizzando l'effetto della digitalizzazione sulla distanza fisica (Reggiani *et al.*, 2010; Tranos, 2011) e l'impatto di quest'ultima sullo spazio digitale (Barabási *et al.*, 2012; Newman, 2003; Watts, 2004).

Alla luce di queste osservazioni, le ricerche future dovranno affinare il modello integrando variabili culturali, istituzionali e tecnologiche, al fine di ridurre il rischio di semplificazioni eccessive. L'evoluzione dei contesti economici e digitali richiede, infatti, un costante adattamento dei parametri analitici. Il paradigma gravitazionale deve quindi essere inteso non come una struttura chiusa, ma come uno strumento suscettibile di revisione e progressiva calibratura.

Conclusioni

Il dibattito sulla rilevanza sociofisica del modello gravitazionale ha attraversato, nel corso dei decenni, un'evoluzione profonda, trasformandosi da una semplice trasposizione analogica della fisica newtoniana a un vero e proprio strumento di analisi interdisciplinare applicato a fenomeni complessi. La presente ricerca ha evidenziato come la legge della gravità, originariamente formulata per descrivere l'interazione tra corpi fisici, possa offrire – con le dovute integrazioni – un paradigma utile per comprendere flussi economici, migratori e demografici.

L'analisi storica ha mostrato come tale paradigma affondi le radici già in Genovesi (1766; 1769), e nella "fisica sociale" di Saint-Simon (1803), per poi essere progressivamente formalizzato nel Novecento: Isard (1954) attribuisce alla distanza un ruolo assimilabile a un costo, mentre Dodd (1950) definisce l'interazione tra gruppi in funzione di tempo, spazio, popolazione e attività *pro capite*, evidenziando il peso della prossimità e della dimensione.

Questo focus sullo spazio trova un'ulteriore cornice nella Prima legge della geografia di Tobler (1970), che ribadisce il principio del decadimento della distanza, applicabile, per esempio, alla previsione di scambi commerciali, pur distinguendosi dal modello gravitazionale per l'attenzione ai concetti immateriali.

In ambito migratorio, Carey (1858) descrisse gli individui come "molecole della società" soggette a una forza di attrazione reciproca; intuizione successivamente sistematizzata da Ravenstein (1885) che formulò una legge secondo cui un centro popolato attrae migranti in

proporzione alla propria dimensione e in misura inversa alla distanza. Questa impostazione trova continuità anche nelle analisi contemporanee, come nel modello gravitazionale dei flussi migratori tra Paesi OCSE proposto da Lewer e Van den Berg (2007), pur con i limiti evidenziati da Zhang e Li (2024). Un passaggio centrale è rappresentato da Stewart (1941; 1948), che sviluppa la "gravitazione demografica" e introduce strumenti di rappresentazione spaziale come i contorni di equipotenziale, rafforzando l'idea che le concentrazioni di popolazione e la distanza possano essere impiegate per descrivere regolarità nei flussi.

In ambito economico, Isard (1954) e soprattutto Tinbergen (1962) consolidano l'uso del modello per lo studio del commercio internazionale, formalizzando la relazione tra dimensione economica dei Paesi e distanza geografica come determinanti fondamentali dei flussi commerciali bilaterali. Successivamente, Anderson e van Wincoop (2003) introducono una formulazione strutturale del modello, incorporando il concetto di resistenze multilaterali e mettendo in evidenza il cosiddetto "border effect", ossia l'impatto dei confini nazionali e delle barriere istituzionali sugli scambi. Evidenze empiriche più recenti, come quelle fornite da Cevik (2023), confermano la persistenza della struttura gravitazionale nei flussi commerciali contemporanei, mostrando come il PIL e la distanza continuino a rappresentare variabili centrali nella spiegazione degli scambi internazionali.

Gli sviluppi più recenti mostrano inoltre un'estensione del paradigma ai servizi e ai contesti digitali, come evidenziato da Anderson *et al*. (2015) e dagli studi sulla geografia virtuale e sulla cyber-geografia (Batty, 1997; Gorman, Malecki, 2000).

L'analisi ha però mostrato come il modello non sia esente da limiti di carattere epistemologico e metodologico: l'approccio può risultare eccessivamente meccanicistico (Gutiérrez, Rogoff, 2003); legami storici e osservazioni consolidate possono introdurre bias (Bergstrand, 1985), e la riduzione della complessità sociale a variabili strutturali può portare a un rischio di determinismo implicito (Vygotskij, 1978; Wertsch, 1991). Quest'ultimo aspetto rimane una problematica cruciale, poiché le interazioni umane non possono essere completamente descritte attraverso modelli statici derivati dalle scienze fisiche: le formule gravitazionali, ad esempio, ignorano variabili qualitative come la percezione delle opportunità, le reti sociali e le condizioni politiche, con il rischio di produrre risultati imprecisi.

In prospettiva, le ricerche future dovranno mirare a un delicato equilibrio tra la semplificazione richiesta per modellare fenomeni sociali e la necessità di tener conto delle molteplici sfaccettature e complessità della realtà sociale. Tuttavia, trattandosi di un campo di studi molto complesso, che integra diverse branche della sociologia in continua evoluzione, non si può escludere la possibilità di incorrere in limiti o incertezze anche in studi futuri.

Riferimenti bibliografici

ANDERSON J.E., LARCH M., YOTOV Y.V. (2015), *Estimating General Equilibrium Trade Policy Effects: GE PPML*, CESifo Working Paper Series, No. 5592, CESifo.

ANDERSON J.E., VAN WINCOOP E. (2003), *Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle*, "The American Economic Review", 93, 1, pp. 170-92.

ANDERSON P.L. (2004), *Business Economics and Finance with MATLAB, GIS, and Simulation Models*, Chapman and Hall/CRC, New York.

ARMINGTON P.S. (1969), *A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production*, IMF Staff Papers, 16, 1, pp. 159-78.

BARABÁSI A.-L., SIMINI F., GONZÁLEZ M.C., MARITAN A. (2012), *A Universal Model for Mobility and Migration Patterns*, "Nature", 484, pp. 96-100.

BATTY M. (1997), *Virtual Geography*, "Futures", 29, 4-5, pp. 337-52.

BERGSTRAND J.H. (1985), *The Gravity Equation in International Trade: Some Microeconomic Foundations and Empirical Evidence*, "The Review of Economics and Statistics", 67, 3, pp. 474-81.
BOURDIEU P., WACQUANT L.J.D. (1992), *An Invitation To Reflexive Sociology*, University of Chicago Press, Chicago.
CAPOANI L. (2022), *Review of the Gravity Model: A Physical Approach to Social Sciences*, "European Scientific Methods for the Social Sciences Journal", 11, 2, pp. 10-25.
ID. (2023a), *Review of the Gravity Model: Origins and Critical Analysis of its Theoretical Development*, "SN Business & Economics", 3, 95, in https://doi.org/10.1007/s43546-023-00461-0.
ID. (2023b), *Theory of Commercial Gravitational Fields in Economics: The Case of Europe*, "Networks and Spatial Economics", 23, 4, pp. 845-84.
CAPOANI L., BARLESE A., TUDORACHE A. (2025), *Combining Walter Isard's Location, Trade, and Peace Theories Using a Gravitational Field Model: A Case Study on the European Market and Brexit*, "Empirica", 52, 2, pp. 333-55.
CAPOANI L., TUDORACHE A., BARLESE A. (2025), *Exploring Economic Conflict through the Gravitational Field Model of Trade: Markets, Wars, and Instability*, "Conflict Resolution Quarterly", 42, 4, pp. 507-21.
CAREY H.C. (1858), *Principles of Social Science*, J.B. Lippincott & Co., Philadelphia.
CARROTHERS G.A.P. (1956), *An Historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction*, "Journal of the American Institute of Planners", 22, 2, pp. 94-102.
CEVIK S. (2023), *Long Live Globalization: Geopolitical Shocks and International Trade*, IMF Working Paper, No. WP/23/225, International Monetary Fund (IMF), Washington DC.
DODD S.C. (1950), *The Interactance Hypothesis: A Gravity Model Fitting Physical Masses and Human Groups*, "American Sociological Review", 1, 2, pp. 245-56.
EATON J., KORTUM S. (2002), *Technology, Geography, and Trade*, "Econometrica", 70, 5, pp. 1741-79.
EATON J., TAMURA A. (1994), *Bilateralism and Regionalism in Japanese and U.S. Trade and Direct Foreign Investment Patterns*, "Journal of the Japanese and International Economies", 8, 4, pp. 478-510.
FRANKEL J. (2010), *The Estimated Trade Effects of the Euro: Why Are They below Those from Historical Monetary Unions among Smaller Countries?*, in A. Alesina, F. Giavazzi (eds.), *Europe and the Euro*, The University of Chicago Press, Chicago-London, pp. 169-212.
FRANKEL J., WEI S.J. (1996), *ASEAN in a Regional Perspective*, in J. Hicklin, D. Robinson, A. Singh (eds.), *Macroeconomic Issues Facing ASEAN Countries*, International Monetary Fund (IMF), Washington DC, pp. 1-50.
GALTON F. (1890), *Kinship and Correlation*, "North American Review", 150, 401, pp. 419-31.
GENOVESI A. (1766), *Della diceosina o sia della filosofia del giusto e dell'onesto*, Nella Stamperia Simoniana, Napoli.
ID. (1769), *Lezioni di commercio o sia d'economia civile*, Biblioteca universitaria di Basilea, Basilea.
GEURS K.T., DE MONTIS A., REGGIANI A. (2015), *Recent Advances and Applications in Accessibility Modelling*, "Computers, Environment and Urban Systems", 49, pp. 82-85.
GORMAN S.P., MALECKI E.J. (2000), *The Networks of the Internet: An Analysis of Provider Networks in the USA*, "Telecommunications Policy", 24, 2, pp. 113-34.
GRAHAM E.M. (1994), *US Direct Investment Abroad and US Exports in the Manufacturing Sector: Some Empirical Results Based on Cross Sectional Analysis*, Institute for International Economics, Washington DC.
GUTIÉRREZ K., ROGOFF B. (2003), *Cultural Ways of Learning*, "Educational Researcher", 32, pp. 19-25.
HANSEN W.G. (1959), *How Accessibility Shapes Land Use*, "Journal of the American Institute of Planners", 25, 2, pp. 73-6.
HAYNES K.E., FOTHERINGHAM A.S. (2020), *Gravity and Spatial Interaction Models*, Regional Research Institute, West Virginia University, Morgantown (WV).
HEAD K., MAYER T. (2014), *Gravity Equations: Workhorse, Toolkit, and Cookbook*, in G. Gopinath, E. Helpman, K.S. Rogoff (eds.), *Handbook of International Economics*, Vol. 4, Elsevier, Amsterdam, pp. 131-95.
HUFF D.L. (1963), *A Probabilistic Analysis of Shopping Centre Trade Areas*, "Land Economics", 39, 1, pp. 81-90.
ISARD W. (1954), *Location Theory and Trade Theory: Short-run Analysis*, "The Quarterly Journal of Economics", 68, 2, pp. 305-20.
JOSEPH L., KUBY M. (2011), *Gravity Modeling and Its Impacts on Location Analysis*, in H. Eiselt, V. Marianov (eds.), *Foundations of Location Analysis*, Springer, New York, pp. 423-43.
KEPAPTSOGLOU K., KARLAFTIS M., TSAMBOULAS D. (2010), *The Gravity Model Specification for Modeling International Trade Flows and Free Trade Agreement Effects: A 10-Year Review of Empirical Studies*, "The Open Economics Journal", 3, pp. 1-13.

KIM K., COHEN J.E. (2010), *Determinants of International Migration Flows to and from Industrialized Countries: A Panel Data Approach beyond Gravity*, "The International Migration Review", 44, 4, pp. 899-932.
LEWER J.J., VAN DEN BERG H. (2007), *A Gravity Model of Immigration*, "Economics Letters", 99, 1, pp. 164-7.
LOUF R., BARTHELEMY M. (2014), *How Congestion Shapes Cities: From Mobility Patterns to Scaling*, "Scientific Reports", 4, 5561.
MALTHUS T.R. (1798), *An Essay on the Principle of Population*, J. Johnson, London.
MCCALLUM J. (1995), *National Borders Matter: Canada-U.S. Regional Trade Patterns*, "The American Economic Review", 85, 3, pp. 615-23.
MELE M., BAISTROCCHI P.A. (2012), *A Critique of the Gravitational Model in Estimating the Determinants of Trade Flows*, "International Journal of Business and Commerce", 2, 12, pp. 13-23.
MURGANTE B., SCORZA F. (2023), *Autocorrelazione spaziale e pianificazione del territorio: principi ed applicazioni*, Libria, Melfi.
NEWMAN M.E.J. (2003), *The Structure and Function of Complex Networks*, "SIAM Journal", 45, 2, pp. 167-256.
NEWTON I. (1675), *Letter from Sir Isaac Newton to Robert Hooke*, Historical Society of Pennsylvania, Philadelphia,
PHILBRICK A.T. (1973), *A Short History of the Development of the Gravity Model*, "Australian Road Research", 5, 4, pp. 40-52.
QUANDT R.E. (1992), *The Collected Essays of Richard E. Quandt*, Edward Elgar Publishing, Aldershot (UK).
QUANDT R.E., BAUMOL W.J. (1965), *Studies in Travel Demand*, Vol. II, s.e., s.l.
RAVENSTEIN E.G. (1885), *The Laws of Migration*, "Journal of the Statistical Science of London", 48, 2, pp. 167-235.
REGGIANI A., BUCCI P., RUSSO G. (2010), *Accessibility and Network Structures in the German Commuting*, "Networks and Spatial Economics", 11, 4, pp. 621-41.
REILLY W.J. (1929), *Methods for the Study of Retail Relationships*, "University of Texas Bulletin", 2944.
REY S.J. (2015), *Mathematical Models in Geography*, in J.D. Wright, *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Elsevier, Amsterdam, pp. 785-90.
RICE R.A., GALLAGHER J.S. (1948), *Taking the Guesswork Out of the Passenger Business*, "Railway Age", 124, pp. 13-6.
ROGERS E. (2003), *Diffusion of Innovations*, Free Press, New York.
SAINT-SIMON C.-H. (1803), *Lettere di un abitante di Ginevra ai suoi contemporanei*, s.e., s.l.
SEN A., SMITH T.E. (1995), *Gravity Models: An Overview*, in A. Sen, T.E. Smith (eds.), *Gravity Models of Spatial Interaction Behavior. Advances in Spatial and Network Economics*, Springer, Berlin-Heidelberg, pp. 49-152.
STEWART J.Q. (1941), *An Inverse Distance Variation for Certain Social Influences*, "Science", 93, 2404, pp. 89-90.
ID. (1948), *Demographic Gravitation: Evidence and Applications*, "Sociometry", 11, 1-2, pp. 31-58.
SUI D.Z. (2004), *Tobler's First Law of Geography: A Big Idea for a Small World?*, "Annals of the Association of American Geographers", 94, 2, pp. 269-77.
SUNNY F.A., JERONEN E., LAN J. (2024), *How Does Theories of Economics Contribute to the Sustainable Development Concept Formation?*, "Sustainability", 16, 3, 1054.
THOMPSON C.A., SAXBERG K., LEGA J., TONG D., BROWN H.E. (2019), *A Cumulative Gravity Model for Interurban Spatial Interaction at Different Scales*, "Journal of Transport Geography", 79, 102461.
TINBERGEN J.J. (1962), *Shaping the World Economy; Suggestions for an International Economic Policy*, The Twentieth Century Fund, New York.
TOBLER W.R. (1970), *A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region*, "Economic Geography", 46, pp. 234-40.
TRANOS E. (2011), *The Topology and the Emerging Urban Geographies of the Internet Backbone and Aviation Networks in Europe: A Comparative Study*, "Environment and Planning A", 43, 2, pp. 378-92.
VOORHEES A.M. (1955/2013), *A General Theory of Traffic Movement: The 1955 ITE Past Presidents' award Paper*, "Transportation", 40, 6, pp. 1105-16.
VYGOTSKY L.S. (1978), *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*, Harvard University Press, Cambridge (MA).
WACQUANT L. (2004), *Following Pierre Bourdieu into the Field*, "Ethnography", 5, 4, pp. 387-414.
WATTS D.J. (2004), *The 'New' Science of Networks*, "Annual Review of Sociology", 30, pp. 243-70.

WERTSCH J.V. (1991), *Voices of the Mind: Sociocultural Approach to Mediated Action*, Harvard University Press, Cambridge (MA).
ZAMAGNI S. (2019), *L'interesse attuale nei confronti dell'economia civile di Antonio Genovesi*, in S. Zamagni, L. Becchetti, F. Sabetti (a cura di), *Attualità del pensiero di Antonio Genovesi, a 250 anni dalla morte*, Forum, "Acta Philosophica", 28, 2, pp. 319-34.
ZHANG M., LI N. (2024), *An Activity Space-based Gravity Model for Intracity Human Mobility Flows*, "Sustainable Cities and Society", 101, 105073.
ZHAO S., ZHAO P., CUI Y. (2017), *A Network Centrality Measure Framework for Analyzing Urban Traffic Flow: A Case Study of Wuhan, China*, "Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications", 478, pp. 143-57.