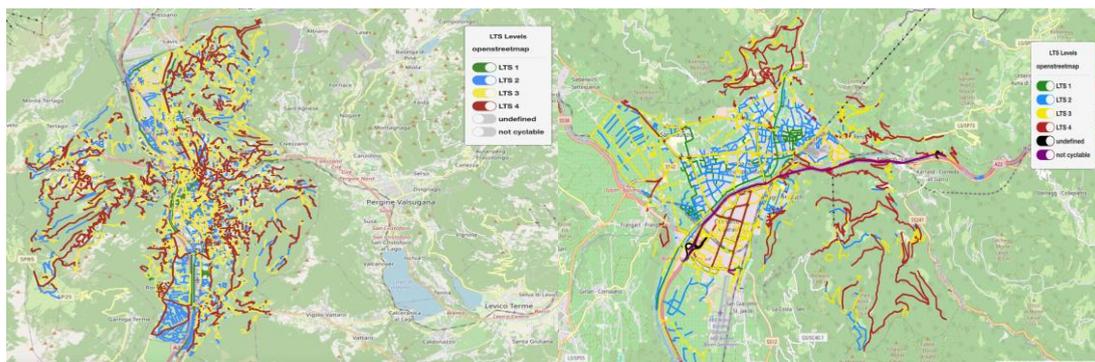


Oggi, il trasporto sostenibile, e in particolare l'uso quotidiano della bicicletta, è un elemento centrale nella pianificazione urbana europea, grazie ai suoi benefici nella riduzione delle emissioni di carbonio e nel miglioramento della salute pubblica. A livello normativo, molte città hanno adottato strategie come i Biciplan e i Piani Urbani di Mobilità Sostenibile (PUMS) per potenziare le infrastrutture ciclabili, rispondendo alla crescente preferenza per la bicicletta e garantendo sicurezza e accessibilità in ambito urbano e interurbano. Nel mio lavoro di tesi ho sviluppato LTS-BikePlan, uno strumento di Intelligenza Artificiale progettato per guidare le Pubbliche Amministrazioni negli interventi stradali mirati. LTS-BikePlan analizza i fattori che influenzano la scelta tra bicicletta e auto, integrando variabili logistiche, ambientali e temporali. L'obiettivo è quantificare la relazione tra i livelli di stress da traffico e la percezione del rischio, considerando condizioni infrastrutturali come misure di centralità e gap di rete, oltre a fattori qualitativi come accessibilità e incidenti. Trento e Bolzano sono stati scelti come casi studio per la loro variabilità geomorfologica, che rappresenta una sfida per l'accessibilità e la mobilità sostenibile. Il metodo si basa sui concetti del metodo Livello di Stress del Traffico - LTS, il quale classifica i segmenti stradali in quattro categorie di stress per i ciclisti, valutando fattori come limite di velocità, larghezza della carreggiata, numero di corsie e incroci. Il livello di stress più elevato riscontrato su un percorso influisce sull'intero tracciato, seguendo la logica dell'anello debole. Il metodo Bike Network Analysis - BNA utilizza questa classificazione per assegnare punteggi di accessibilità ai blocchi censuari, in base alla vicinanza a servizi chiave come scuole e supermercati. I blocchi con meno connessioni a basso stress ottengono punteggi più bassi.

La ricerca esplora domande chiave: in ambienti urbani con variabilità geomorfologica, quali strade hanno un LTS alto o basso? Quali aree ottengono punteggi elevati nel BNA? Le reti urbane sono frammentate in sottografi per livello di stress? Quanti gap critici ad alto stress si trovano in aree a basso stress? Esiste una correlazione tra incidenti e aree ad alto stress? È possibile prevedere zone ad alto rischio integrando misure di centralità, accessibilità e stress del traffico? La metodologia adottata classifica i Livelli di Stress del Traffico (LTS) delle città utilizzando dati Open Street Map e GIS, e valuta il punteggio BNA con dati open source, come quelli sugli incidenti stradali degli ultimi 5 anni. Il processo di identificazione dei gap ad alto stress adatta la procedura IPDC per generare un elenco di gap ad alto stress che necessitano di intervento urgente nella rete stradale. La rete è divisa in componenti a basso stress (LTS 1-2) e ad alto stress (LTS 3-4). Vengono mappati i percorsi ad alto stress con l'algoritmo di Dijkstra, filtrando i gap in base a criteri come bidirezionalità e distanza, e classificati secondo il beneficio che la loro chiusura apporterebbe ai ciclisti. Infine, la fase finale associa ogni gap all'infrastruttura coinvolta (strada, ponte, rotonda ecc.).

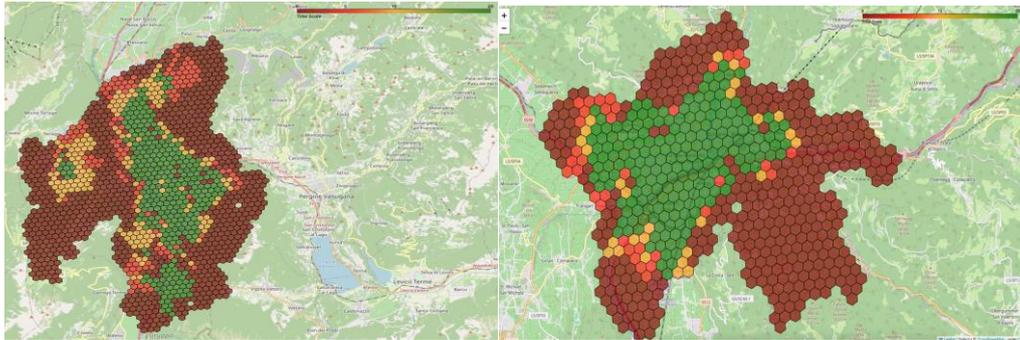
Per quanto riguarda l'analisi della correlazione spaziale, applicando il metodo LISA (Indicatori Locali di Autocorrelazione Spaziale), lo studio calcola la relazione spaziale tra incidenti e lacune ad alto stress

nella rete. L'analisi predittiva finale ha utilizzato modelli come il Random Forest Classifier, la Support Vector Machine e la Regressione Logistica per classificare le aree a "alto" o "basso" rischio, basandosi sui punteggi BNA e sui valori di centralità (grado, intermediazione, prossimità). Questa classificazione a due livelli rende il modello intuitivo per pianificatori urbani e autorità locali. Come mostrato in figura 1, le strade con LTS 1 (basso stress) sono adatte a tutti i ciclisti, mentre LTS 4 (alto stress) è destinato a ciclisti esperti, con LTS 3 che prevale in Trento. I percorsi LTS 2 si trovano principalmente nelle periferie nord e sud, mentre LTS 1 è concentrato nel centro, dove il traffico è limitato e corre lungo direttrici ciclabili. Le aree LTS 3 si diffondono in città lungo strade trafficate senza infrastrutture ciclabili, mentre LTS 4 prevale nelle zone orientali e settentrionali, caratterizzate da strade tortuose e aree industriali senza adeguate infrastrutture.



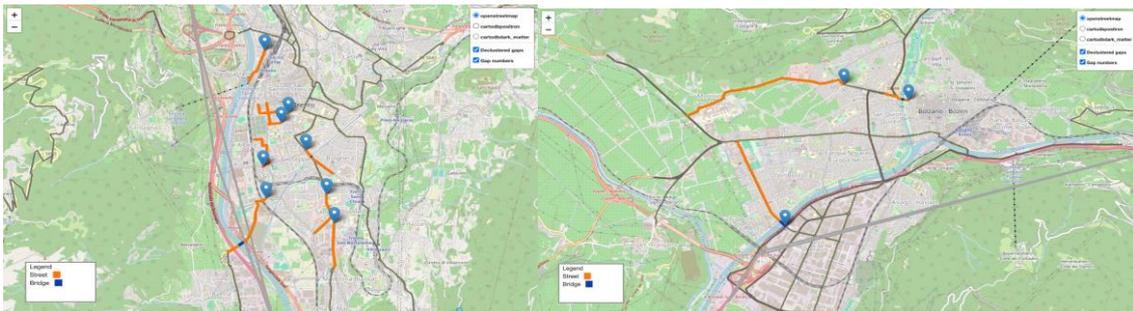
*Figura 1: Distribuzione LTS a Trento (sinistra) e Bolzano (destra).*

A Bolzano, i percorsi LTS 1 e LTS 2 si concentrano principalmente nel centro, ma anche nelle aree occidentali e meridionali. Le strade LTS 3 sono distribuite in tutta la città, con prevalenza nelle aree occidentali e meridionali, mentre le zone LTS 4 si trovano principalmente nelle parti orientali e settentrionali, caratterizzate da terreni elevati e strade tortuose. Oltrisarco, una zona industriale, ha un'elevata presenza di strade LTS 4. Per i punteggi di accessibilità (Fig. 2), gli esagoni comunali sono colorati in base al BNA: le aree centrali, con esagoni verdi, mostrano punteggi più alti grazie a una rete ciclabile più densa, minore stress da traffico e vicinanza ai servizi. Le periferie, invece, hanno punteggi più bassi, evidenziati dagli esagoni rossi o arancioni, a causa di infrastrutture limitate, condizioni geomorfologiche sfavorevoli o traffico intenso. Le aree rurali, come le regioni montuose, sono escluse dall'analisi poiché riflettono attività ricreative e influenzano il punteggio complessivo (Trento: 47/100, Bolzano: 51/100).



*Figura 2: Punteggi BNA per Trento (sinistra) e Bolzano (destra).*

L'adattamento della procedura IPDC all'LTS ha rivelato la presenza di diversi sottografi isolati a basso stress sia a Trento sia a Bolzano, indicando reti ciclabili frammentate e disconnesse, intervallate da connessioni ad alto stress. È emersa però una differenza nel numero di lacune ad alto stress: otto per Trento e tre per Bolzano. Come illustrato in Fig. 3, le lacune ad alto stress a Trento si concentrano intorno al centro urbano con picchi di congestione in momenti specifici della giornata, mentre a Bolzano si estendono anche alle aree industriali e dei servizi. In entrambe le città, le strade ad alto stress coincidono in gran parte con le zone di intervento pianificate nei Biciplan, basate su analisi di misurazioni dirette, dati di mobilità e flusso. Anche senza dati governativi ufficiali, i risultati mostrano una coerenza significativa, evidenziando l'efficacia della metodologia nel identificare aree critiche per migliorare le infrastrutture ciclabili, senza richiedere grandi quantità di dati.



*Figura 3: Gap ad alto stress trovati per Trento (sinistra) e Bolzano (destra).*

L'analisi della correlazione spaziale tra incidenti e gap ad alto stress nella rete urbana di Trento, tramite l'indice di Moran, ha evidenziato un'autocorrelazione significativa in alcune aree. Quattro gap ricadono nel primo quadrante con alti incidenti sia sui collegamenti che nelle aree adiacenti; due nel terzo quadrante, con pochi incidenti sui collegamenti ma molti nelle zone circostanti; e due nel centro città, nel quarto quadrante, dove lo stress da traffico è concentrato nei gap. A Bolzano la situazione è meno critica, con solo due gap nel terzo quadrante e pochi incidenti nei collegamenti ma più nelle aree limitrofe. Questa categorizzazione aiuta a comprendere le dinamiche incidentali in relazione ai gap stradali ad alto stress. L'analisi ha classificato le aree a maggior rischio di incidenti usando metriche quantitative (centralità) e qualitative (punteggio BNA e incidenza degli incidenti), stabilendo una soglia

di rischio del 15% (85° percentile). Data l'autocorrelazione rilevata, sono stati inclusi spatial lags nei predittori. Tra tre modelli confrontati, il Random Forest Classifier è emerso come il più equilibrato, con recall elevato e meno falsi allarmi (precisione 0.79 e accuratezza 0.89 nel test di validazione per Trento). Questo modello, ideale per evitare di trascurare aree a rischio riducendo i falsi allarmi, ha mostrato nelle mappe (Fig. 5) le aree ad alto rischio in rosso, concentrate nei centri urbani. Riaddestrato per Bolzano, ha mostrato un'accuratezza ancora maggiore (0.92).



*Figure 2: Highest risk areas (in red) for Trento (left) and Bolzano (right).*

Lo studio presenta alcune limitazioni, principalmente legate alla dipendenza dai dati OSM, che variano in accuratezza e aggiornamenti. In aree meno conosciute, i dati sono spesso scarsi e di qualità inferiore, con incoerenze nei tag. Inoltre, l'esclusione dei dati sui luoghi di lavoro nei calcoli del BNA limita la comprensione dei flussi di mobilità. Nonostante queste limitazioni, lo strumento identifica le aree che necessitano di miglioramenti infrastrutturali urgenti e valuta i rischi di incidenti per promuovere la mobilità sostenibile. LTS-BikePlan è versatile e applicabile in vari contesti geografici, espandibile a diversi dataset pubblici o privati.