

Abstract of the thesis

Although the Sentinel-5 Precursor (S5P) satellite provides valuable global information on key air pollutants, its spatial resolution remains insufficient to capture their fine-scale distribution in confined areas such as cities, where concentrations are typically highest. Ground-based monitoring networks, while more detailed, are sparse or even absent in many regions, making satellite observations indispensable. Among current platforms, S5P offers the best compromise between spectral resolution — allowing the monitoring of multiple pollutants — spatial resolution, and global coverage. Nevertheless, physical constraints prevent improvements beyond its nominal spatial resolution, underscoring the relevance of image enhancement techniques.

This thesis presents the first application of a super-resolution approach — single-image super-resolution (SISR) — to S5P radiance data. We introduce S5Net, a lightweight deep-learning-based model that delivers excellent performance while remaining simpler than state-of-the-art architectures. In particular, we characterise S5P's payload by modelling its imaging acquisition process and generating realistic low-high resolution pairs, making the framework explicitly PSF-aware — an aspect often overlooked in remote sensing studies. Additionally, we propose a dynamic multi-directional cascade fine-tuning scheme that adaptively determines the number of iterations per channel from inter-band correlations. This approach preserves spectral fidelity while optimising both spatial reconstruction and computational efficiency.

Our framework achieves excellent results. Across all orbits, PSF-aware SISR consistently outperforms existing methods, showing that explicitly modelling the sensor's degradation substantially improves spatial reconstruction. S5Net achieves the optimal balance between spatial detail and spectral fidelity, aligning quantitative metrics with visual quality. Furthermore, the proposed dynamic fine-tuning outperforms both PCA-based and static cascade approaches, achieving a superior balance between spatial enhancement, spectral consistency preservation, and computational efficiency. This results in particularly improved performance on spectrometer-partitioned sub-images.

To demonstrate practical benefits, we additionally apply the framework to S5P imagery over a polluted urban area, extracting surface features from both original and super-resolved images to predict the oxidative potential (OP) of particulate matter. Predictions from super-resolved imagery consistently outperform those from nominal-resolution data. Since OP is a key indicator of particulate matter's toxicity, closely linked to adverse health effects, these results highlight the framework's potential for supporting urban exposure assessment.

By integrating sensor-specific characteristics and addressing the challenges of hyperspectral remote sensing, our PSF-aware and spectrally scalable SISR framework enhances S5P imagery in a problem-tailored way, enabling more accurate urban exposure assessments and supporting large-scale air quality monitoring.

Abstract della tesi

Sebbene il satellite Sentinel-5 Precursor (S5P) offra dati globali preziosi sui principali inquinanti atmosferici, la sua risoluzione spaziale non è sufficiente a descriverne la distribuzione su piccola scala, soprattutto in contesti urbani dove le concentrazioni sono generalmente più elevate. Le reti di monitoraggio a terra, pur fornendo misure molto dettagliate, risultano spesso rade o assenti in molte aree del mondo, rendendo le osservazioni satellitari uno strumento indispensabile. Tra le piattaforme oggi disponibili, S5P rappresenta il miglior compromesso fra risoluzione spettrale — che permette di monitorare diversi inquinanti — risoluzione spaziale e copertura globale. Tuttavia, limiti fisici impediscono di superare la sua risoluzione nominale, evidenziando l'importanza di tecniche dedicate al miglioramento delle immagini.

Questa tesi propone la prima applicazione di un approccio di super-risoluzione — nella variante single-image super-resolution (SISR, letteralmente super-risoluzione a singola immagine) — ai dati di radianza di S5P. Presentiamo S5Net, un modello di deep learning capace di offrire ottime prestazioni mantenendo una complessità inferiore rispetto alle architetture più avanzate. Un aspetto centrale del lavoro è la caratterizzazione del processo di acquisizione di S5P, utilizzata per generare coppie realistiche di immagini a bassa e alta risoluzione: in questo modo il framework diventa esplicitamente coerente con la point spread function (PSF, letteralmente funzione di diffusione del punto), una componente spesso trascurata negli studi di telerilevamento. Inoltre, introduciamo uno schema di fine-tuning dinamico, basato su un meccanismo a cascata multidirezionale, in cui il numero di iterazioni per ciascun canale è stabilito in modo adattivo sfruttando le correlazioni inter-banda. Questo approccio permette di preservare la coerenza spettrale ottimizzando al contempo la ricostruzione spaziale e i tempi di calcolo.

Il framework proposto ottiene risultati molto positivi. Su tutte le orbite analizzate, la SISR coerente con la PSF supera costantemente i metodi esistenti, dimostrando come la modellizzazione esplicita delle degradazioni del sensore porti a un miglioramento significativo della ricostruzione spaziale. S5Net offre un equilibrio ottimale tra dettaglio spaziale e fedeltà spettrale, con una piena coerenza tra le metriche quantitative e la qualità visiva. Inoltre, il fine-tuning dinamico proposto risulta superiore sia agli approcci basati su PCA sia ai meccanismi a cascata statici, garantendo un bilanciamento più efficace tra miglioramento spaziale, preservazione della coerenza spettrale ed efficienza computazionale. Ciò si traduce in un netto incremento delle prestazioni nelle sotto-immagini suddivise per spettrometro.

Per evidenziare l'impatto applicativo, il framework è stato testato anche su un'area urbana fortemente inquinata, estraendo caratteristiche della superficie sia dalle immagini originali sia da quelle ottenute tramite super-risoluzione, utilizzate poi per la stima del potenziale ossidativo (OP) del particolato. Le previsioni basate sulle immagini processate risultano sistematicamente migliori rispetto a quelle ottenute dalle immagini alla risoluzione nominale del satellite. Poiché l'OP è un indicatore chiave della tossicità del particolato, correlato a importanti effetti sulla salute, questi risultati sottolineano il potenziale del metodo nel supportare la valutazione dell'esposizione in ambiente urbano.

Integrando le caratteristiche specifiche del sensore e affrontando le principali sfide del telerilevamento iperspettrale, il framework sviluppato — coerente con la PSF e scalabile dal punto di vista spettrale — consente di migliorare le immagini S5P in modo mirato, rendendo possibili valutazioni più accurate dell'esposizione urbana e contribuendo al monitoraggio della qualità dell'aria su larga scala.