L’IA per la contabilità del carbonio

Dan Cusworth

Scuola estiva virtuale CCAI

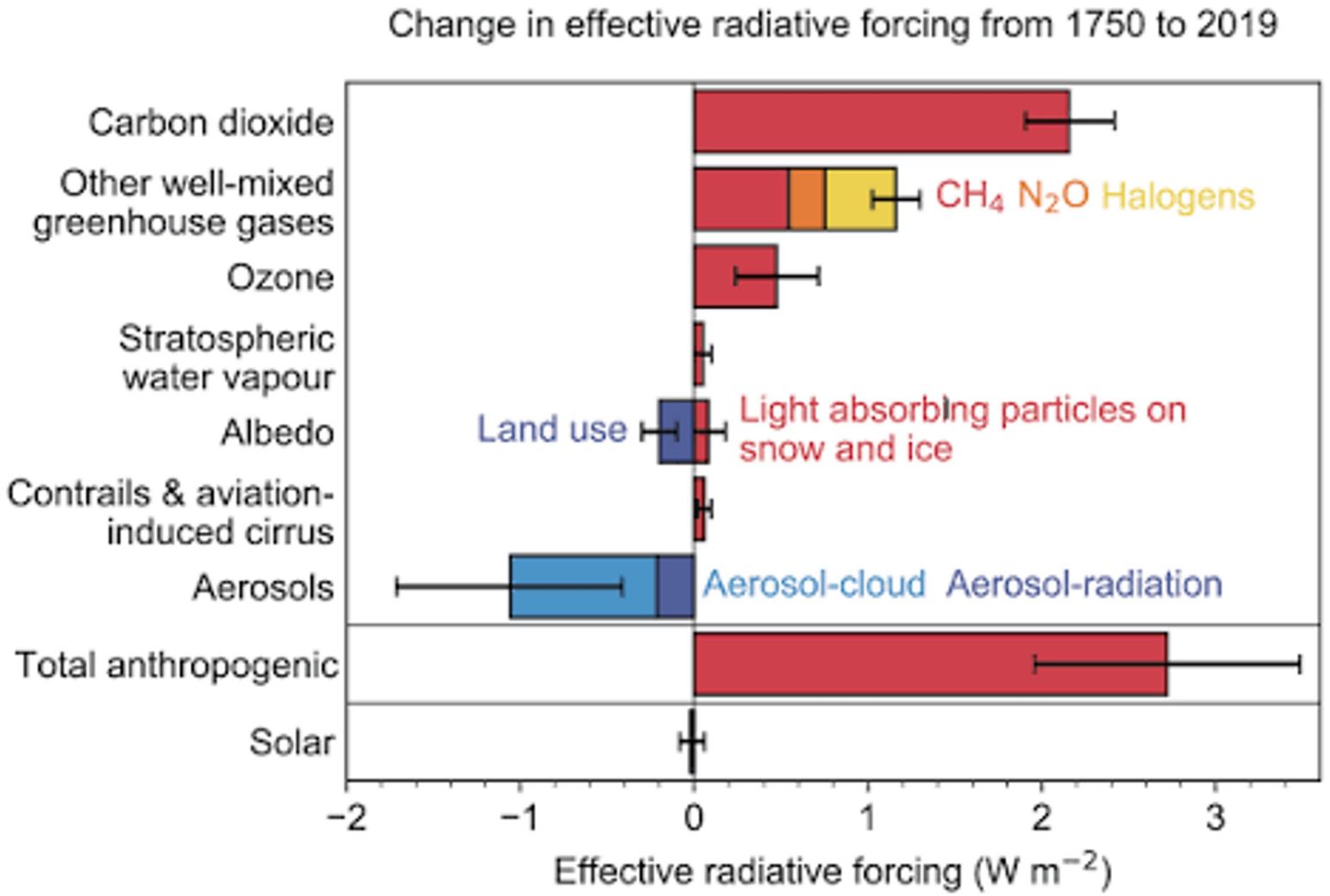
Agosto 2026

Programma della lezione

0:00–0:30	**Parte 1** Fondamenti della contabilità del carbonio
0:30–0:35	Momento di partecipazione
0:35–1:05	**Parte 2** Telerilevamento per la contabilità del carbonio
1:05–1:15	Pausa + momento di partecipazione
1:15–1:45	**Parte 3** Usare l'IA per migliorare la contabilità del carbonio
1:45–2:00	Discussione e conclusioni

Parte 1 Fondamenti della contabilità del carbonio

Perché si vuole contabilizzare il carbonio?



Emissioni di due molecole di carbonio

Anidride carbonica (CO2)

Metano (CH4)

Responsabili della maggior parte del riscaldamento dall'epoca preindustriale

Fonte: IPCC

Perché si vuole contabilizzare il carbonio:

- Stimare le emissioni di gas serra (GHG)
- Monitorare gli stock di carbonio e gli altri gas serra
- Quantificare le incertezze

Tema della lezione di oggi

- Migliorare la contabilità aziendale
- Rafforzare la valutazione del ciclo di vita
- Supportare i processi di verifica e audit

Una tassonomia: dove interviene l'IA nella contabilità del carbonio?

Usate questa mappa come guida: ogni nodo viene trattato più avanti nella lezione

Dati di attività	Stima delle emissioni	Rendicontazione e aggregazione	Verifica e audit
Quali attività sono in corso e su quale scala?	Quanti gas serra si emettono per unità di attività?	Combinare le fonti negli inventari	Controlli incrociati indipendenti dei dati autodichiarati
Immagini: rilevamento di oggetti (allevamenti, pozzi petroliferi, acciaierie, alberi)	Rilevamento e segmentazione dei pennacchi	Omogeneizzazione/organizzazione automatizzata dei dati di attività	Validazione incrociata satellitare
Immagini: rilevamento di deforestazione/cambio d'uso del suolo	Inversione atmosferica (flusso top-down)	Estensione della valutazione del ciclo di vita a tutti i tipi di prodotto	Segnalazione di anomalie/super-emettitori
Proxy: raccolta di dataset pubblici (ad es. concessioni degli operatori)	Miglioramento dei fattori di emissione	Stima delle emissioni Scope 3 della filiera	Quantificazione dell'incertezza

Questa lezione approfondisce la stima delle emissioni (rilevamento dei pennacchi) e i dati di attività, con collegamenti costanti alla verifica.

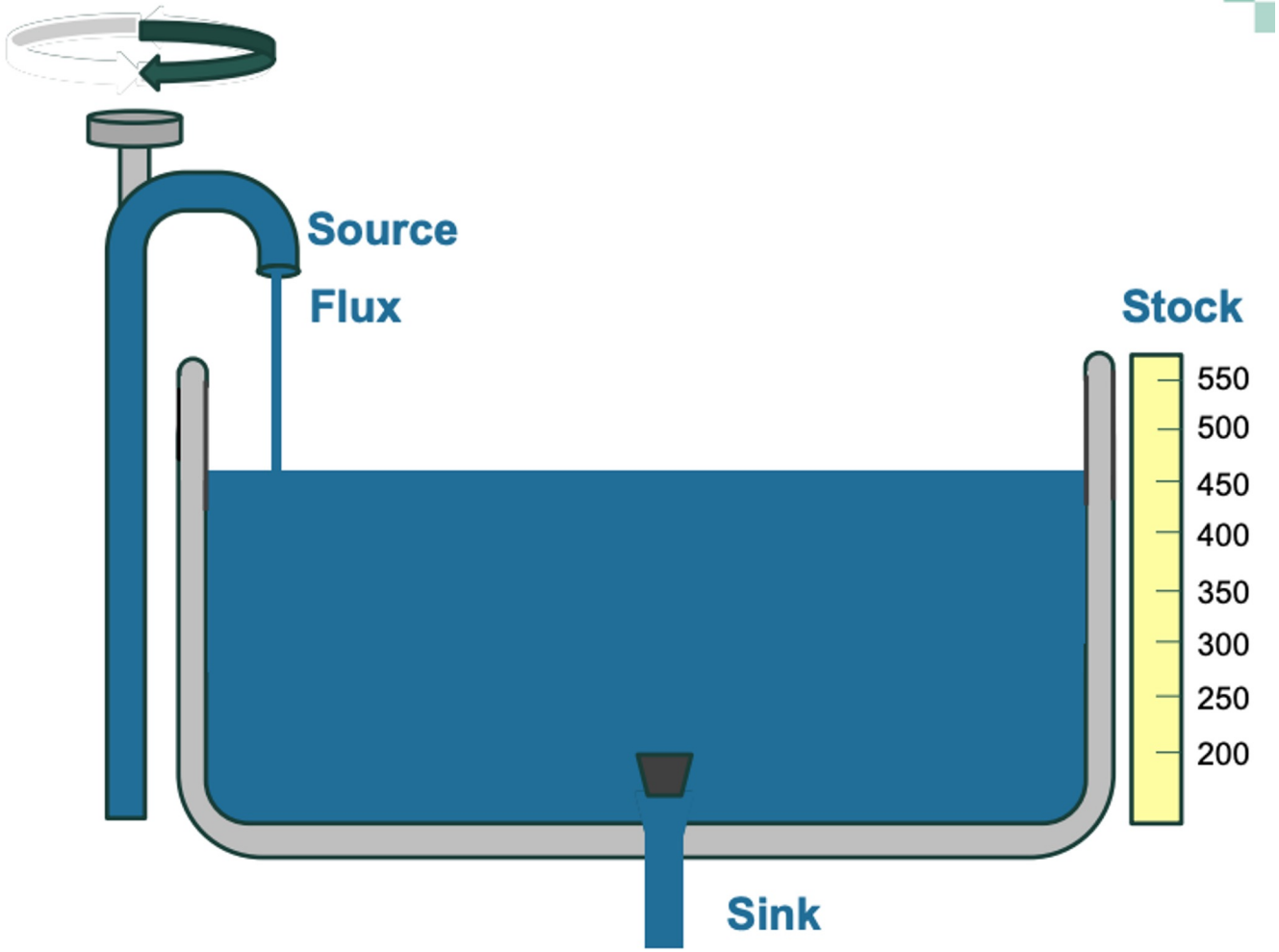
Relazione tra sorgenti, pozzi e stock

Immaginate un lavandino con un rubinetto e un tappo sul fondo.

- **Stock**: l'acqua nel lavandino
- **Sorgente**: aggiungere acqua al lavandino
- **Pozzo**: togliere acqua dal lavandino

- Il tasso di aumento dello stock nel lavandino si chiama flusso.

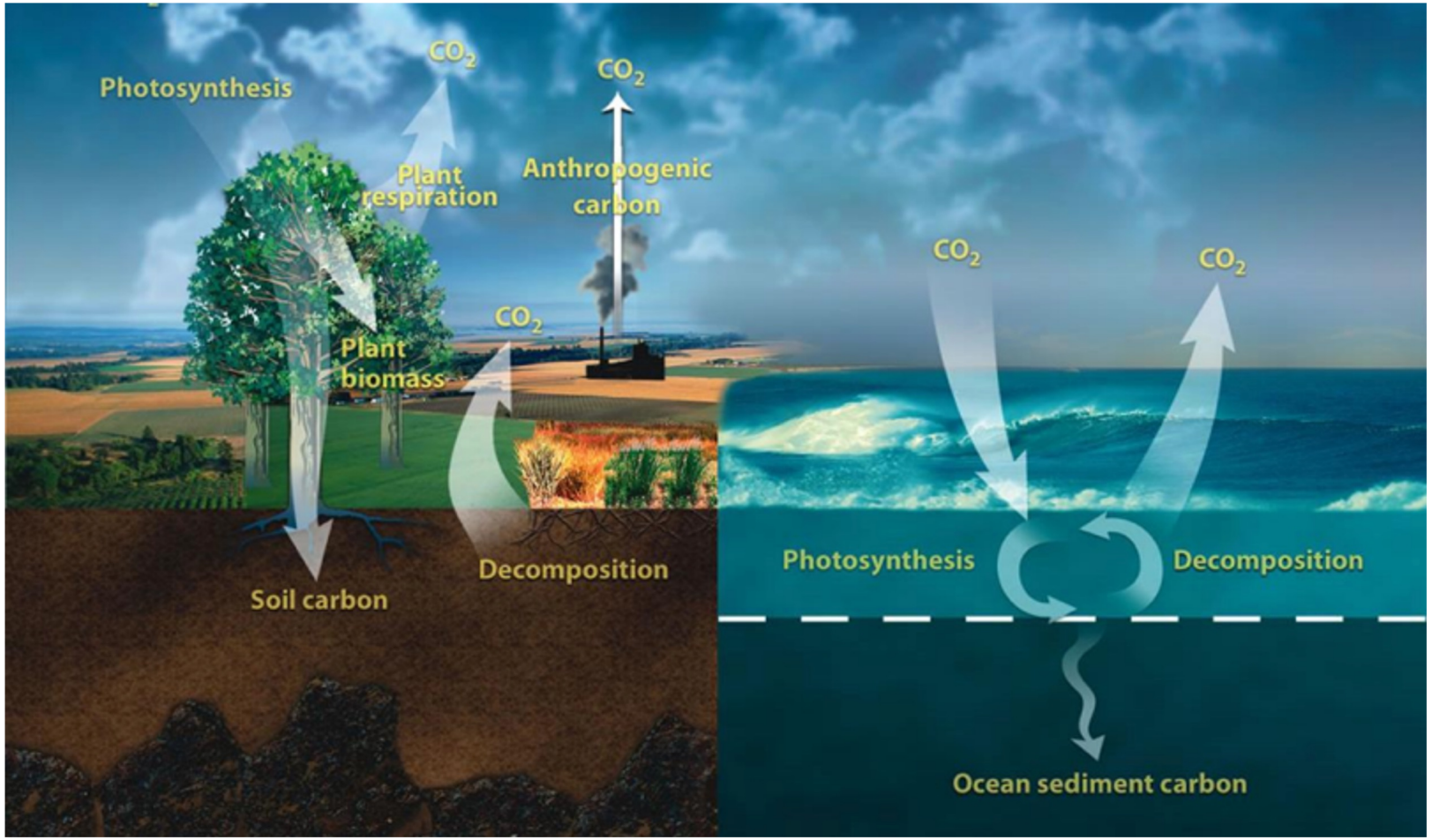
– Le sorgenti producono flussi positivi.
– I pozzi producono flussi negativi.



Fonte: NASA ARSET

Quali sono le principali sorgenti e i principali pozzi di carbonio?

Sorgenti e pozzi di carbonio



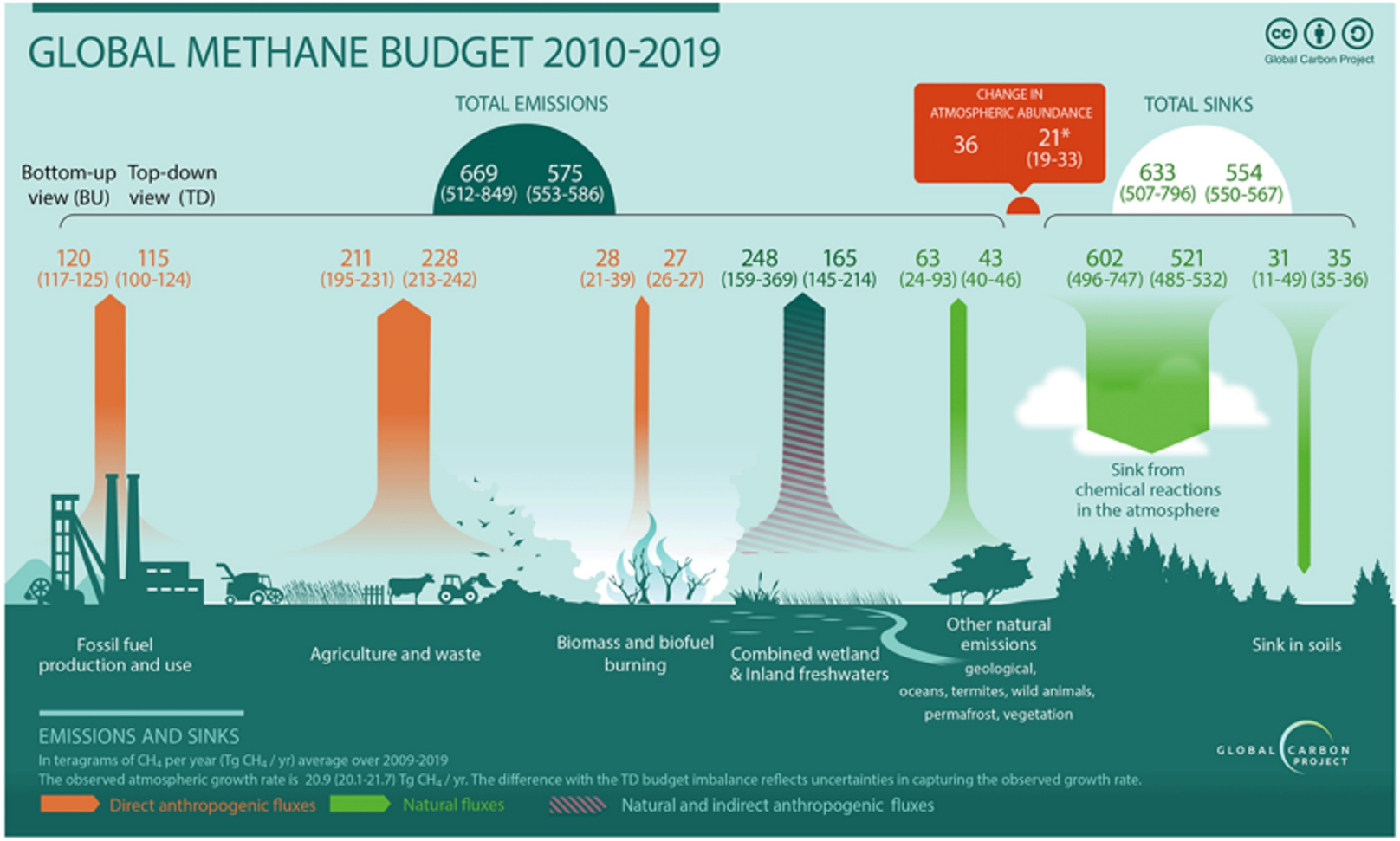
Contabilizzare il carbonio/la CO2 richiede di capire

- La dimensione degli stock di carbonio nei vari «serbatoi»
- I processi che modificano gli stock (ad es. cicli ed emissioni)

Fonte: ORNL

Quali sono le principali sorgenti e i principali pozzi di carbonio?

Sorgenti e pozzi di metano (CH4)



Il metano è diverso dalla CO2:

- Il suo pozzo principale è l'atmosfera, per ossidazione
- Vita breve (~10 anni contro centinaia di anni)
- Gas serra 80 volte più potente della CO2 (per unità emessa) su un orizzonte di 20 anni

Fonte: Sanuois et al. (2020)

Accordo di Parigi: trattato internazionale giuridicamente vincolante con l'obiettivo di mantenere il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2 °C



- **Contributi determinati a livello nazionale (NDC):** ogni paese deve presentare e aggiornare progressivamente il proprio piano di riduzione delle emissioni ogni cinque anni.

- **Trasparenza e responsabilità:** i membri monitorano e comunicano i progressi verso i propri NDC con una rendicontazione standardizzata e una revisione internazionale.

- Un **Global Stocktake** periodico, in cui i paesi valutano i progressi collettivi verso obiettivi come mantenere l'aumento della temperatura globale ben al di sotto dei 2 °C.

Quali metodi tradizionali si usano per la contabilità del carbonio?

1

Dati di attività

Che cosa è stato fatto?
Combustibile bruciato, numero di capi, terreni disboscati

2

Fattori di emissione

Quanti gas serra per unità di attività?
Fattori predefiniti IPCC o specifici del settore

3

Autodichiarazione

I soggetti presentano gli inventari alle autorità di regolamentazione o a standard volontari (GHG Protocol)

4

Verifica e audit

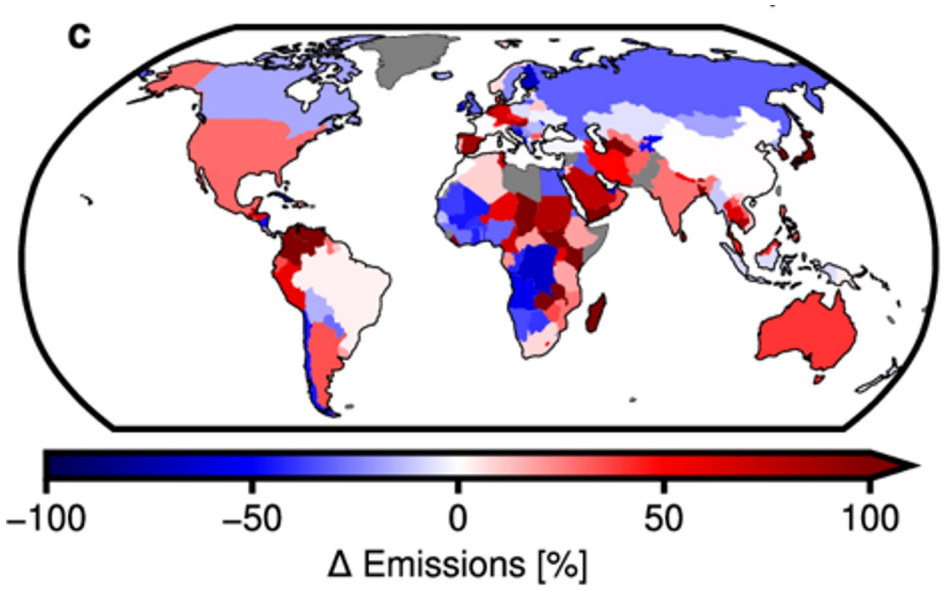
Verifiche di terzi; controlli a campione; validazione incrociata satellitare

Dove può complicarsi?

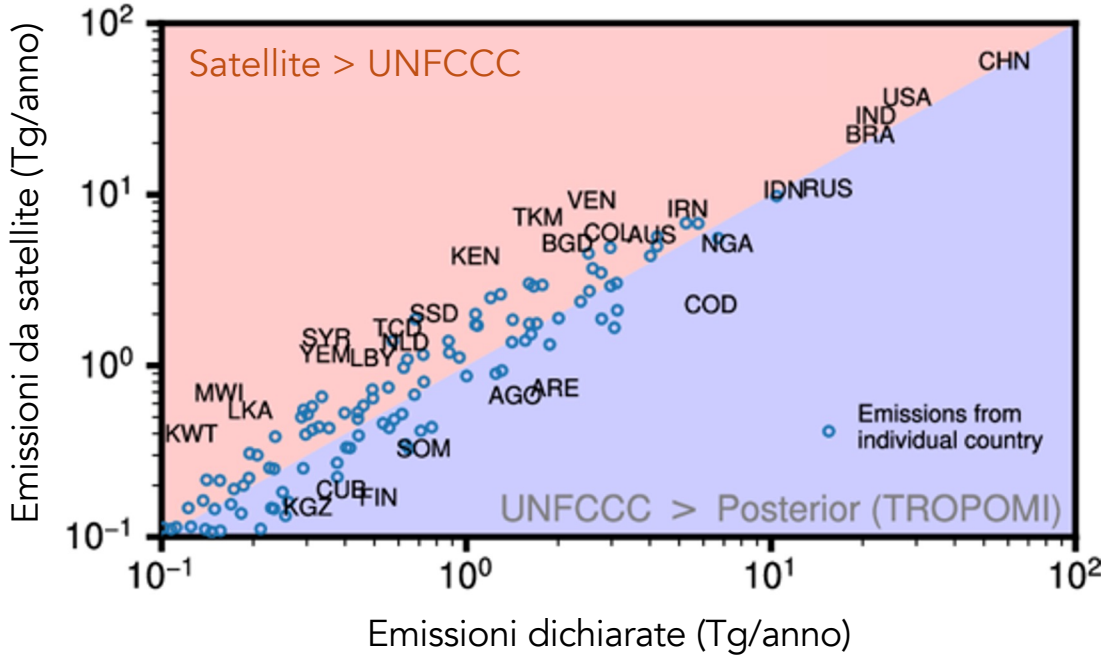
- I dati autodichiarati possono essere distorti da incentivi
- I fattori di emissione possono non rappresentare le condizioni locali
- La verifica richiede molte risorse ed è spesso incompleta.

Esempio: studio satellitare «top-down» confrontato con le comunicazioni di CH4 all'IPCC/all'UNFCCC

Differenza relativa tra satellite e comunicazioni all'UNFCCC



Satellite e comunicazioni all'UNFCCC



Fonte: East et al. (2025)

Domande per la classe

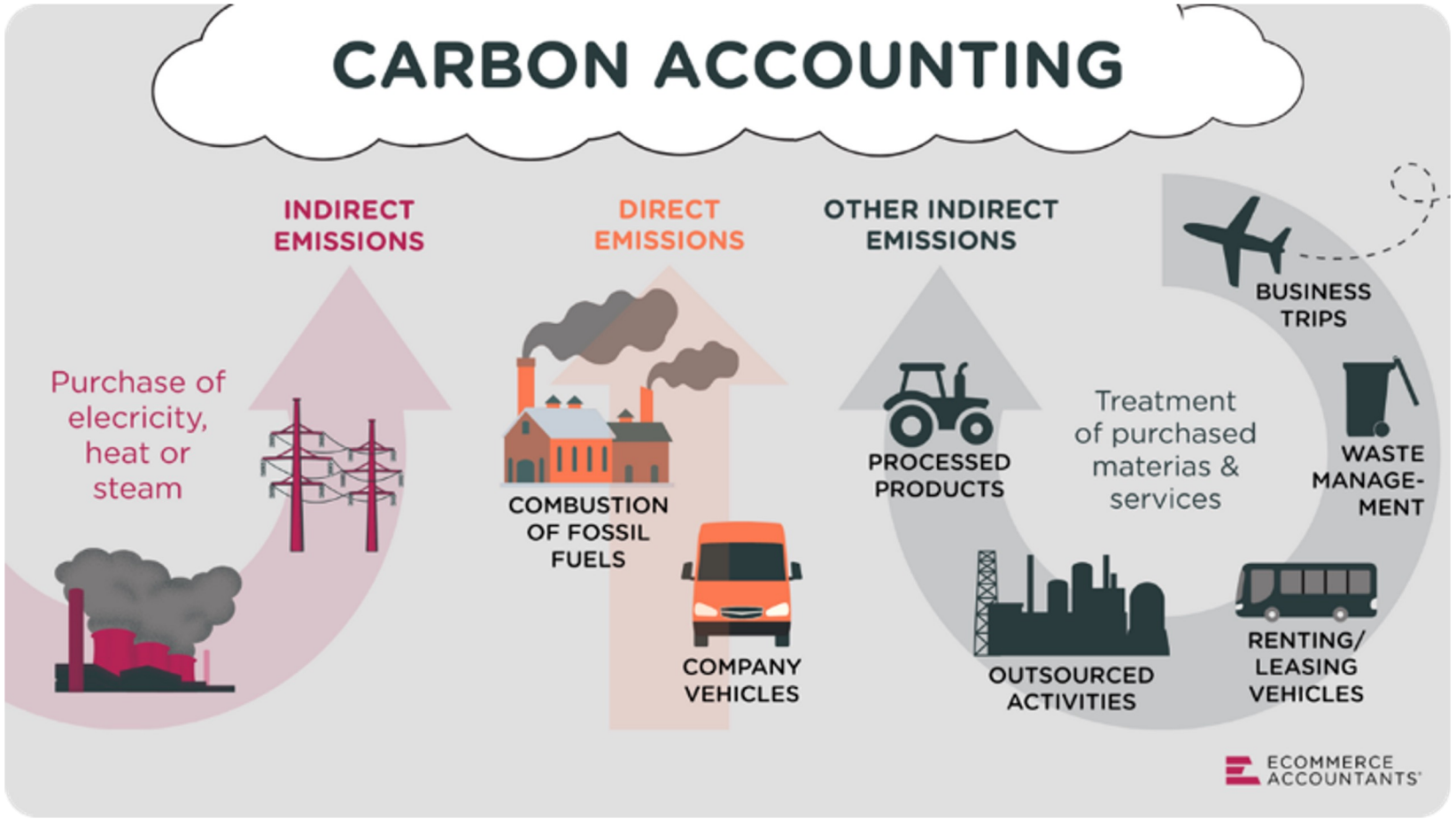
- Tra poco approfondiremo i metodi «top-down» (basati su misure atmosferiche) per la contabilità del carbonio. Ma in base a ciò che sapete e avete visto sulle misure top-down e bottom-up

  - Sondaggio dal vivo: di quale vi fidate di più? Perché?
    - Votate: di che cosa vi fidate di più, top-down o bottom-up?

  - Come costruireste la fiducia in un metodo, o in entrambi?

  - Quanto è «abbastanza buono»?

Panoramica rapida di altri usi della contabilità del carbonio: la contabilità del carbonio aziendale



Contabilità:

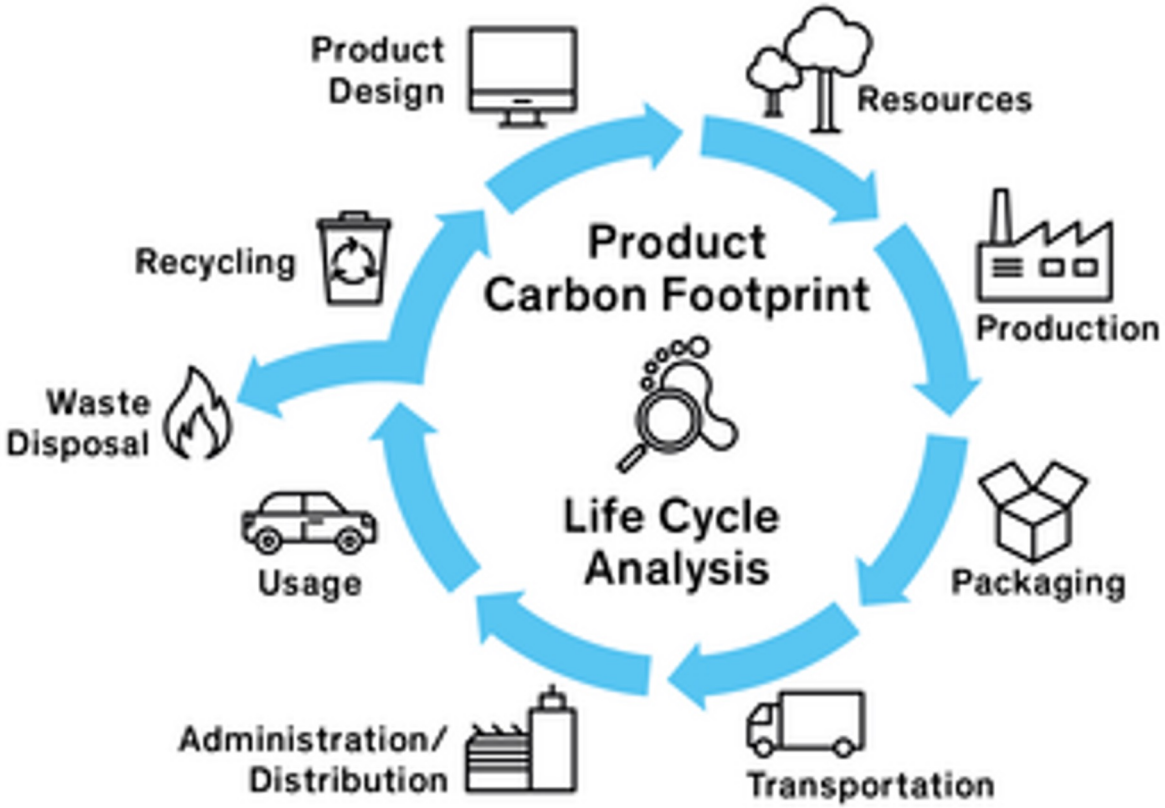
- Quantificazione di tutte le fonti di emissione, dirette e indirette

Mercati:

- Acquisto di crediti o quote di emissione se/quando le emissioni sono in eccesso:
  - Cap-and-trade (conformità): acquisto di emissioni «in eccedenza» da un soggetto a basse emissioni
  - Crediti di carbonio (volontari): acquisto di crediti da progetti verificati che rimuovono o mitigano le emissioni

Fonte: ecommerceaccountants.co.uk

Valutazione del ciclo di vita: scomporre il carbonio di singoli prodotti o processi



Segue in genere procedure standard (ad es. ISO 14040 e 14044) per contabilizzare tutti i materiali, l'energia e l'acqua usati per un prodotto/processo

Possibili applicazioni dell'IA:

- Estrazione automatizzata dei dati
- Modellazione predittiva (ad es. se mancano i dati dei fornitori)
- Modellazione predittiva dei potenziali benefici in termini di carbonio se si aggiornano parti del processo
- Estensione a tutti i prodotti/processi di un portafoglio (non solo ai prodotti di punta)

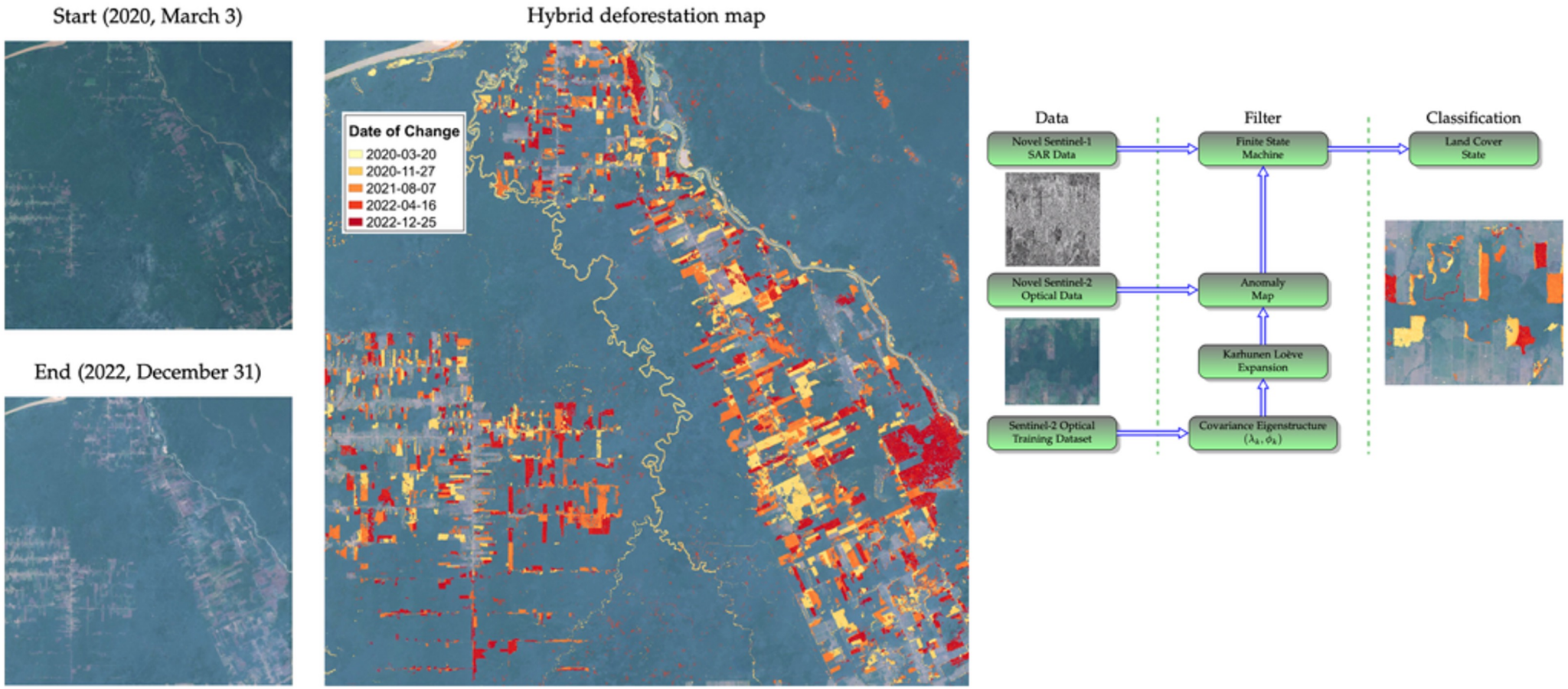
Fonte: myclimate.org

Parte 2 Telerilevamento per la contabilità del carbonio

Tornando alla quantificazione delle emissioni: il ruolo del telerilevamento satellitare

Dati di attività: uso di immagini ad alta risoluzione (visibile, infrarosso, radar) per identificare impianti, processi e cambiamenti

Esempio: combinazione di visibile (RGB) e radar ad apertura sintetica (SAR) per seguire la deforestazione



Fonte: Castrillon-Candas et al. 2026: https://arxiv.org/pdf/2510.14092´

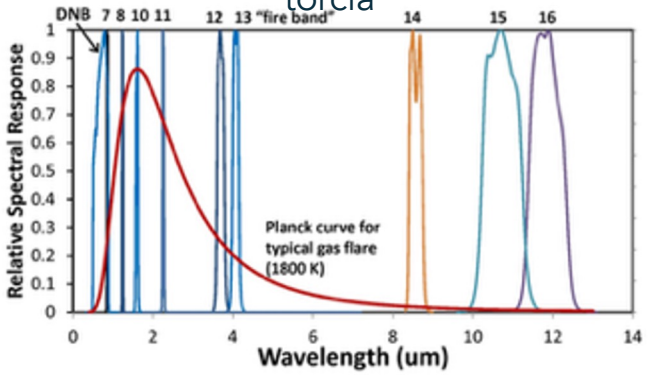
Tornando alla quantificazione delle emissioni: il ruolo del telerilevamento satellitare

Dati di attività: rilevamento della combustione termica nei settori naturali e antropici

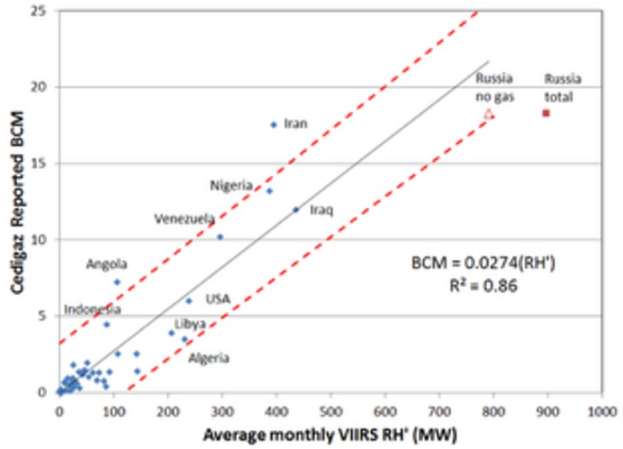
Gas flaring (satellite VIIRS)



Adattare una curva di Planck allo spettro osservato per stimare il calore della torcia



Correlare la firma termica al volume di gas bruciato

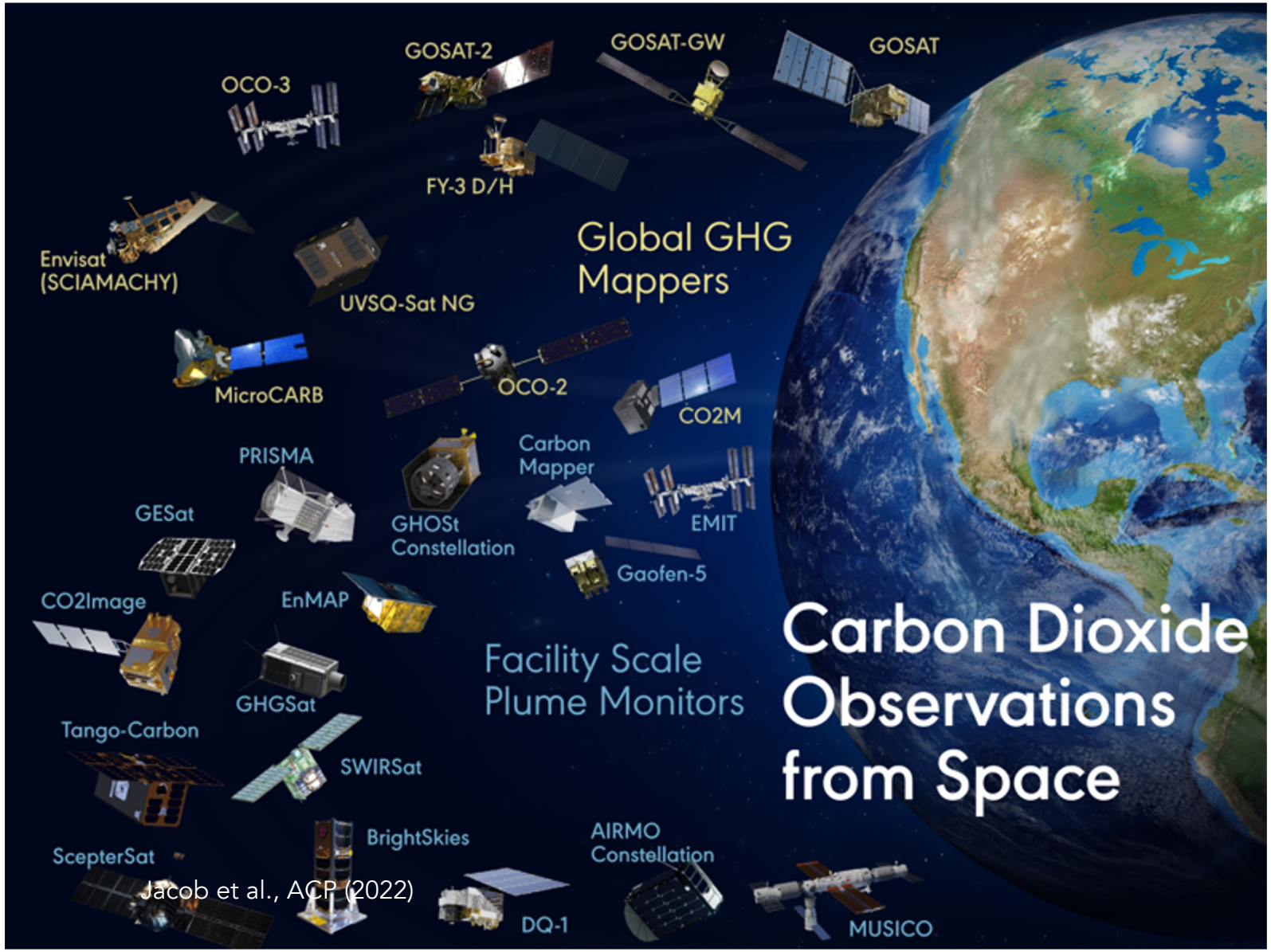


Incendi (satellite VIIRS)



Fonte: Elvidge et al. (2016), NASA Worldview

Tornando alla quantificazione delle emissioni: il ruolo del telerilevamento satellitare



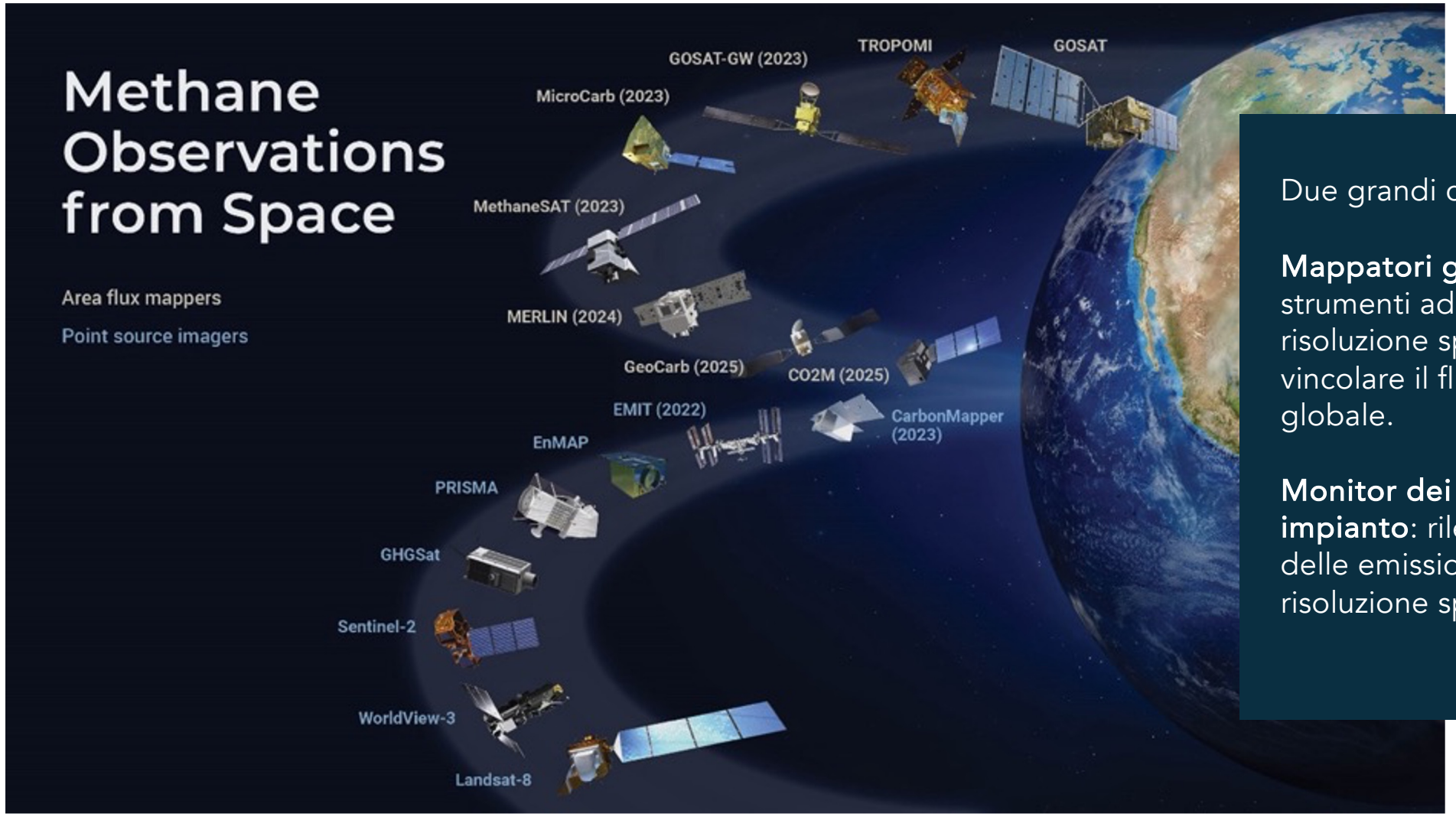
Jacob et al., ACP (2022)

Due grandi categorie:

Mappatori globali dei gas serra: strumenti ad ampia fascia e bassa risoluzione spaziale, progettati per vincolare il flusso netto da regionale a globale.

Monitor dei pennacchi a scala di impianto: rilevamento e quantificazione delle emissioni dei super-emettitori ad alta risoluzione spaziale

Tornando alla quantificazione delle emissioni: il ruolo del telerilevamento satellitare



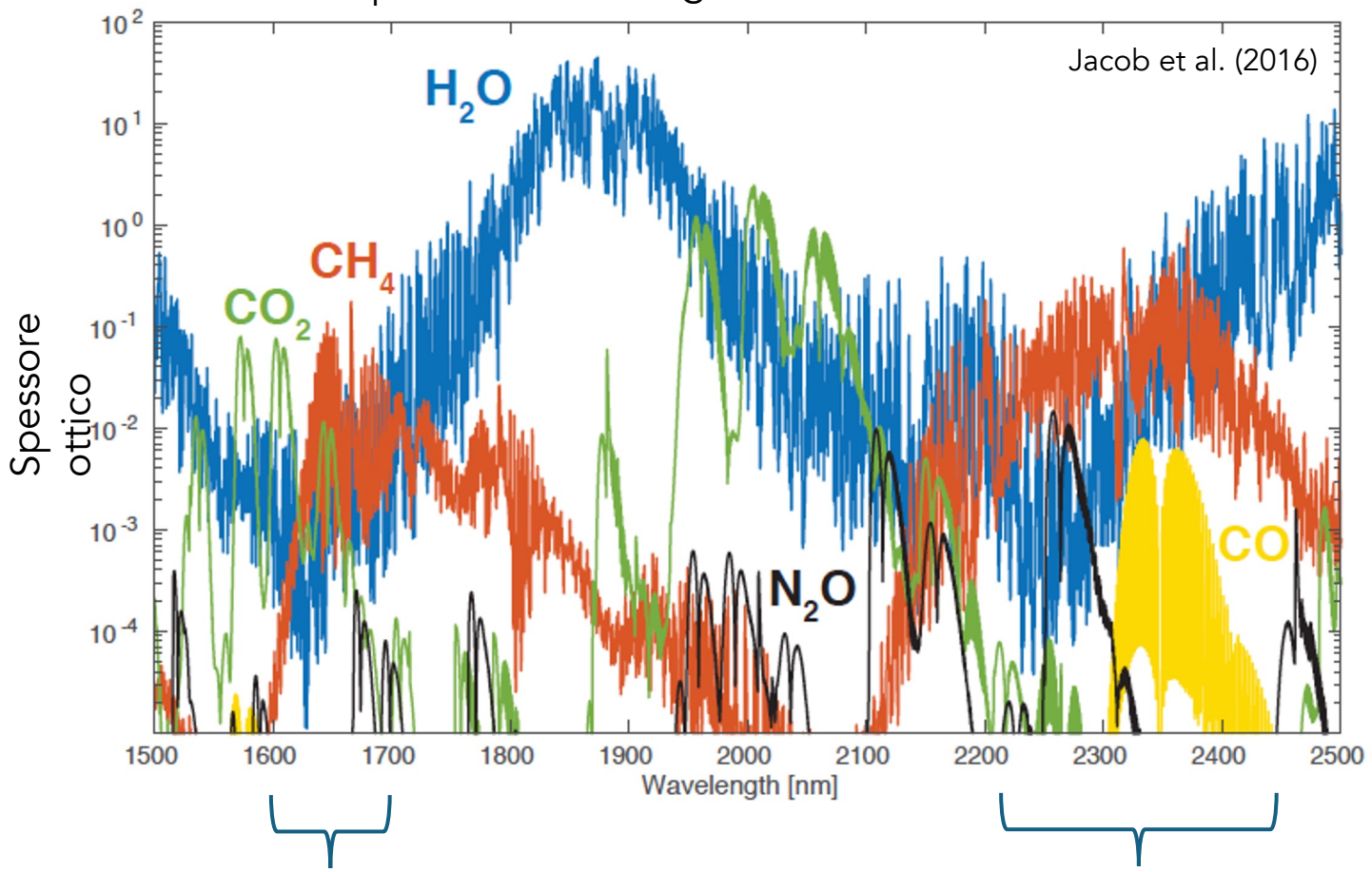
Due grandi categorie:

Mappatori globali dei gas serra: strumenti ad ampia fascia e bassa risoluzione spaziale, progettati per vincolare il flusso netto da regionale a globale.

Monitor dei pennacchi a scala di impianto: rilevamento e quantificazione delle emissioni dei super-emettitori ad alta risoluzione spaziale

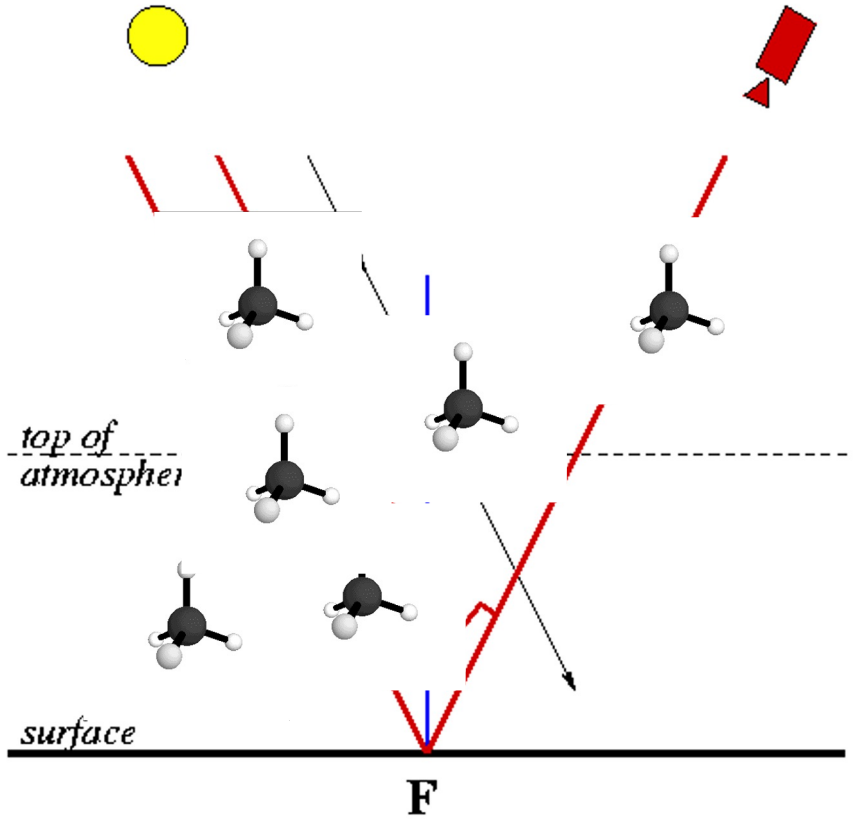
Il telerilevamento del CH4 si basa sull'osservazione della radianza in prossimità delle bande di assorbimento rovibrazionali del CH4.

Spessori ottici dei gas in tracce atmosferici



Banda SWIR 1

Banda SWIR 2



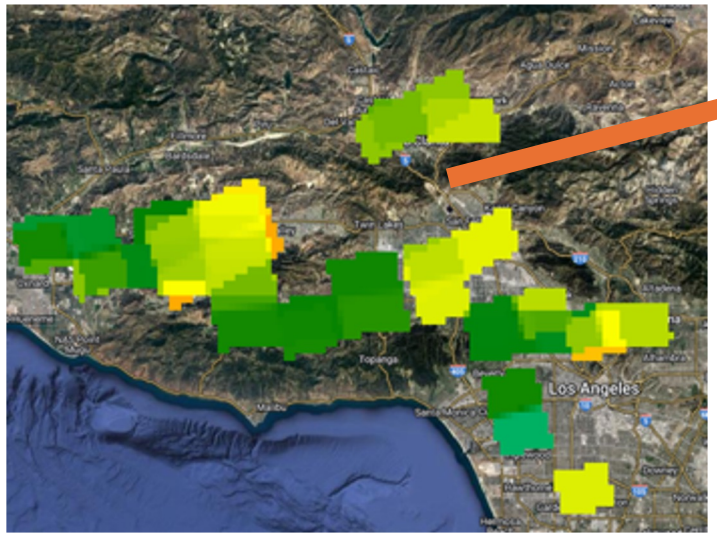
Trasmittanza atmosferica:

$$T = \frac{\Phi_e^t}{\Phi_e^i} = e^{-\tau} = 10^{-A}$$

Spessore ottico (dipende dall'assorbimento del gas)

La distinzione tra mappatore globale dei gas serra e monitor a scala di impianto dipende dal compromesso tra risoluzione spaziale e spettrale.

TROPOMI su Los Angeles/Aliso Canyon (15/09/2020)

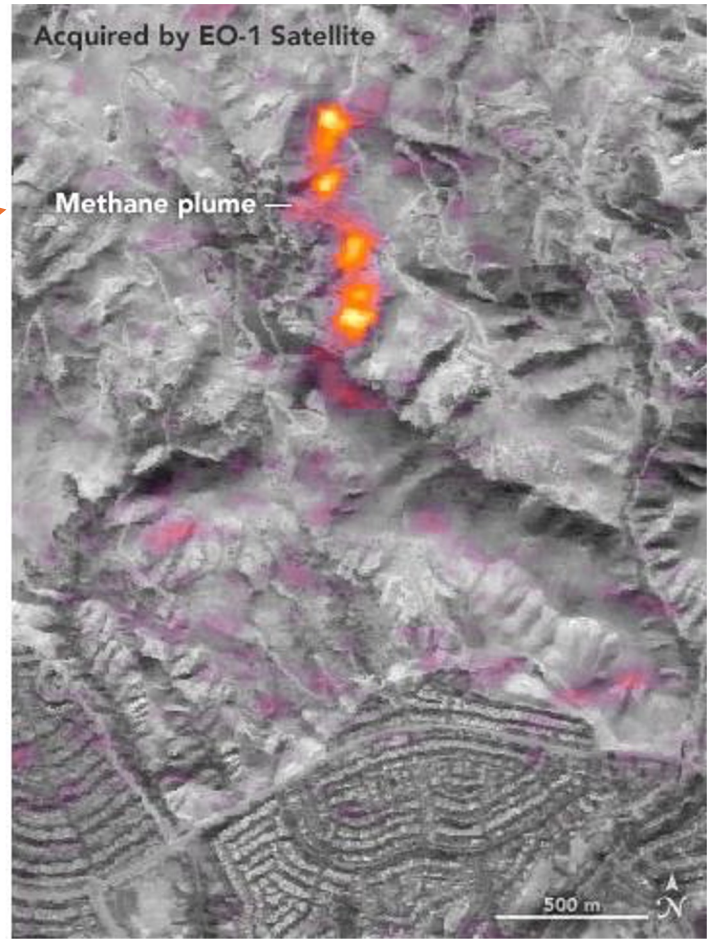


Google Earth Engine





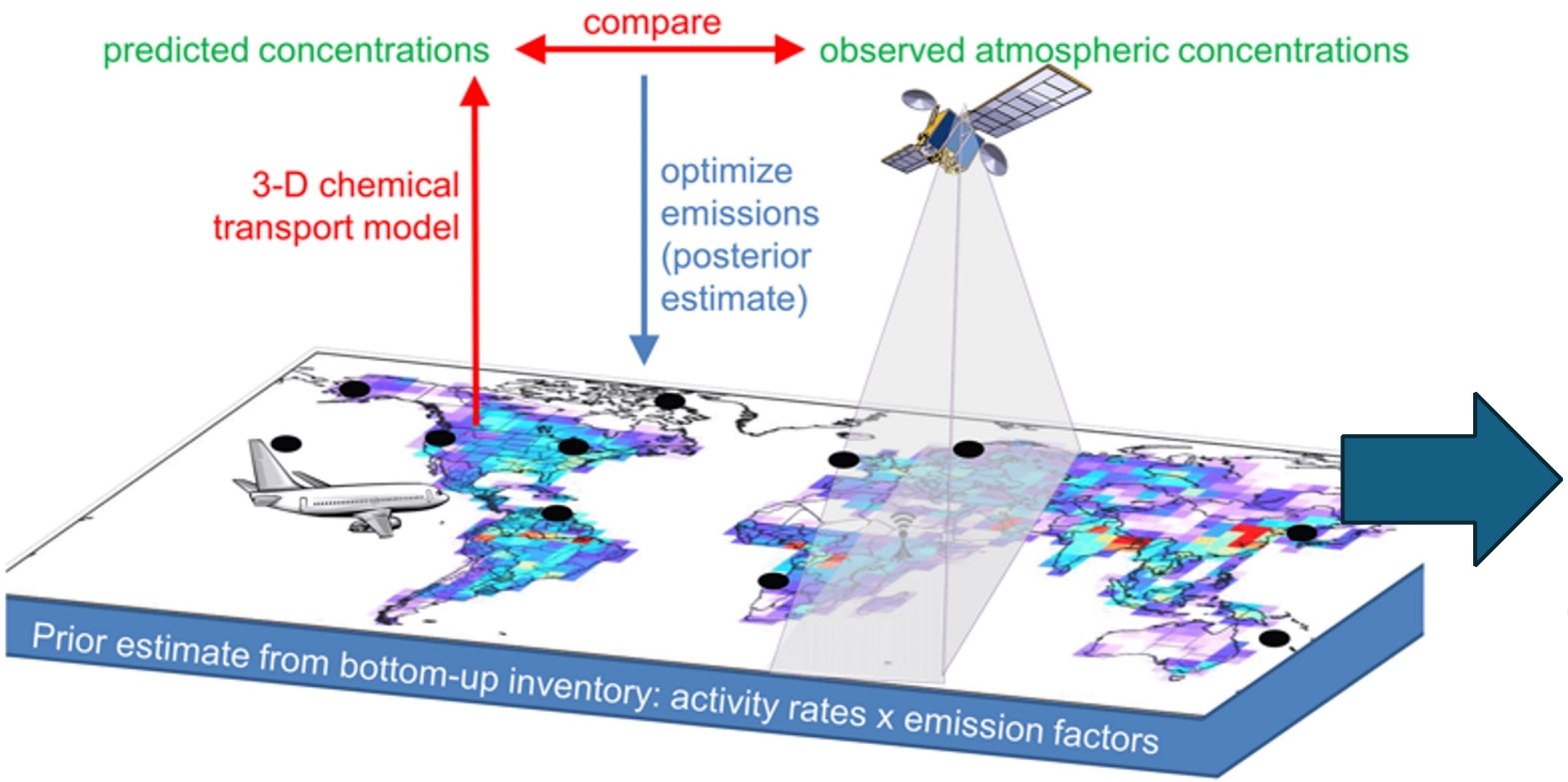
Strumento Hyperion di EO-1: blowout di Aliso Canyon (2016)

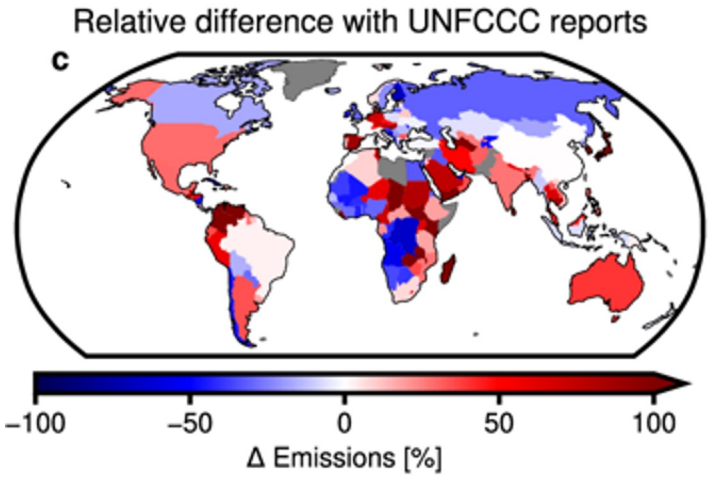


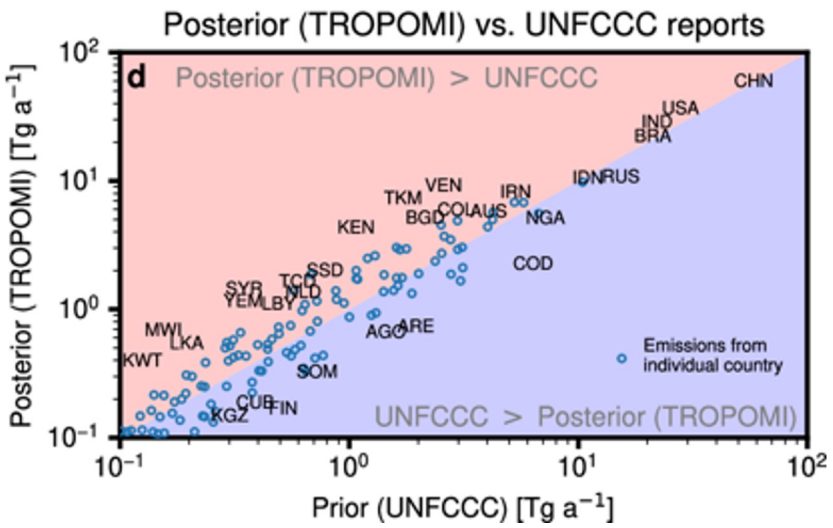
Thompson et al., GRL (2016)

Risoluzione spettrale più grossolana -> risoluzione spaziale più fine. Capacità di risolvere grandi pennacchi a scala di impianto.

I satelliti di mappatura globale dei gas serra stimano le emissioni regionali «invertendo» le concentrazioni atmosferiche osservate in flussi di emissione





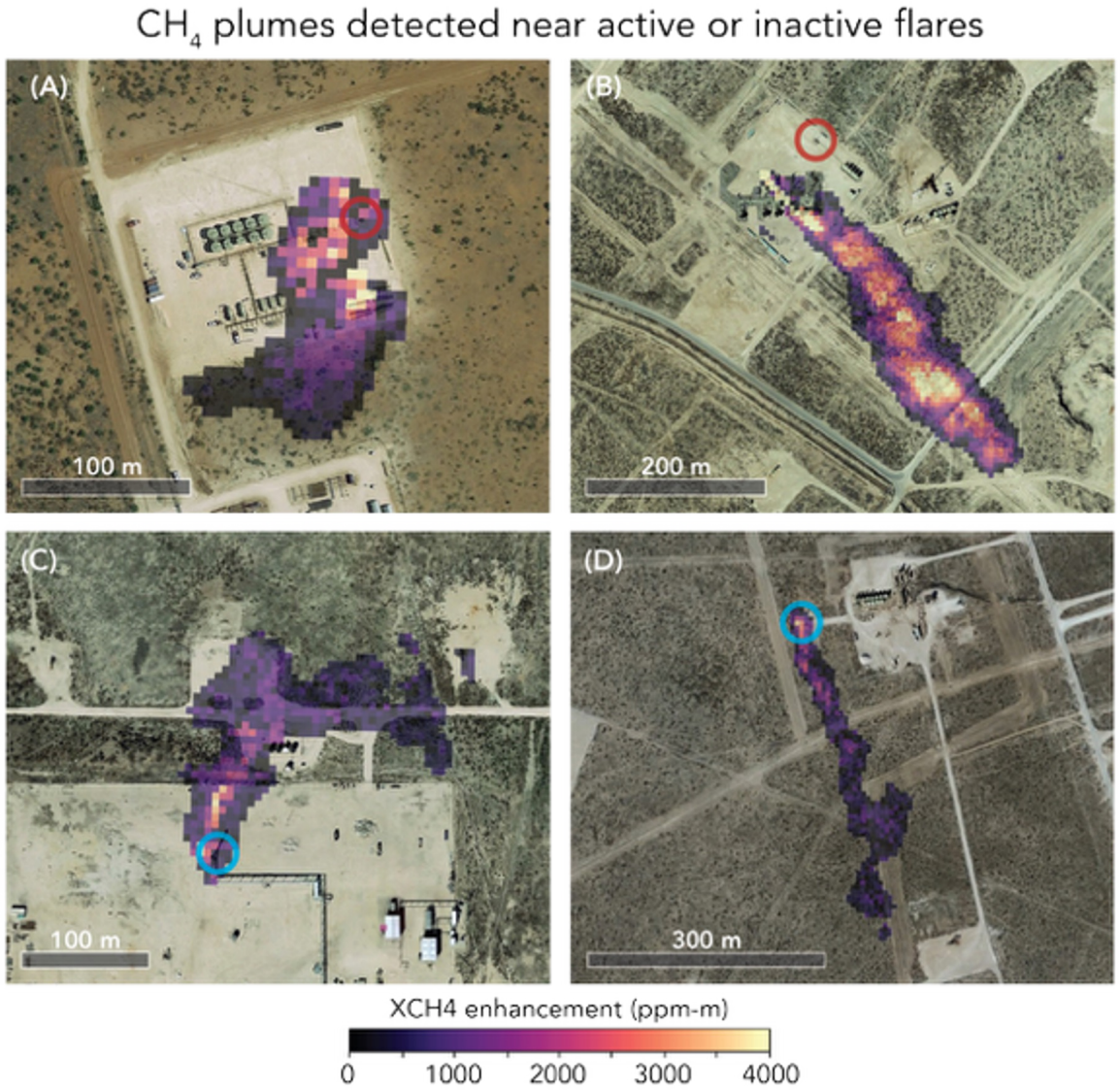


$$\hat{\mathbf{x}} = \arg\min \left\{ \|\boldsymbol{y} - \mathbf{H}\boldsymbol{x}\|_{S_o} + \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_A\|_{S_A} \right\}$$

Qui **x** rappresenta le emissioni, **y** le concentrazioni e **H** un modello di trasporto.

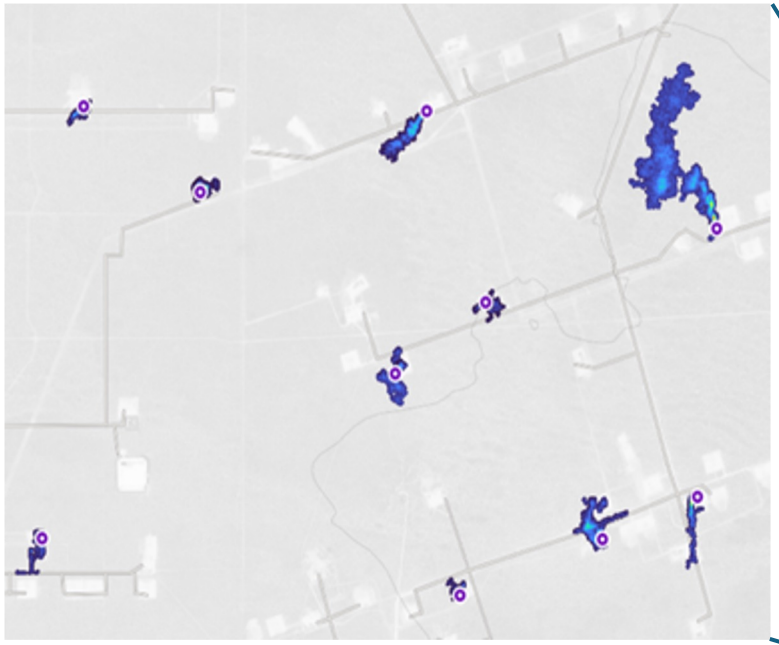
Worden et al., ACP (2022); East et al. (2025)

I satelliti a scala di impianto rilevano solo una parte delle sorgenti, ma consentono l'attribuzione al singolo impianto

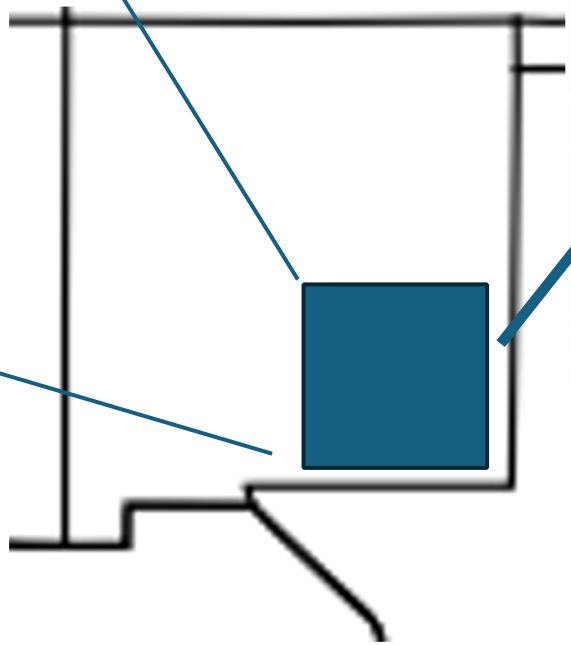


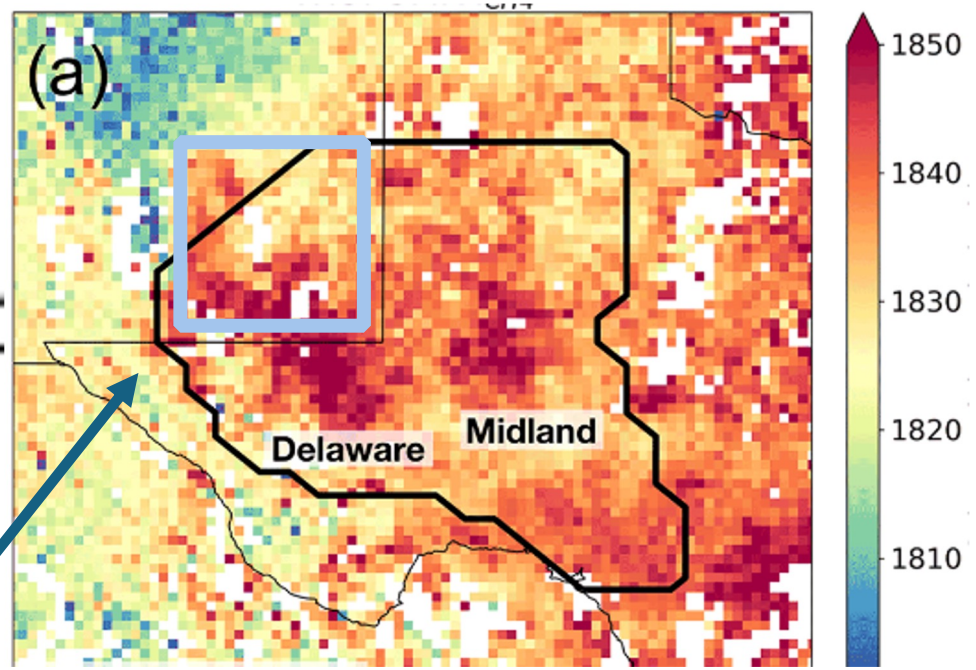
Capire le emissioni alla scala del bacino:
flusso totale, super-emettitori, dataset attribuiti

Studio aereo + satellitare del 2024 nel Permiano del Nuovo Messico



Mappatura aerea completa di tutte le infrastrutture del Permiano del Nuovo Messico: oltre 200.000 siti visitati in 3 settimane

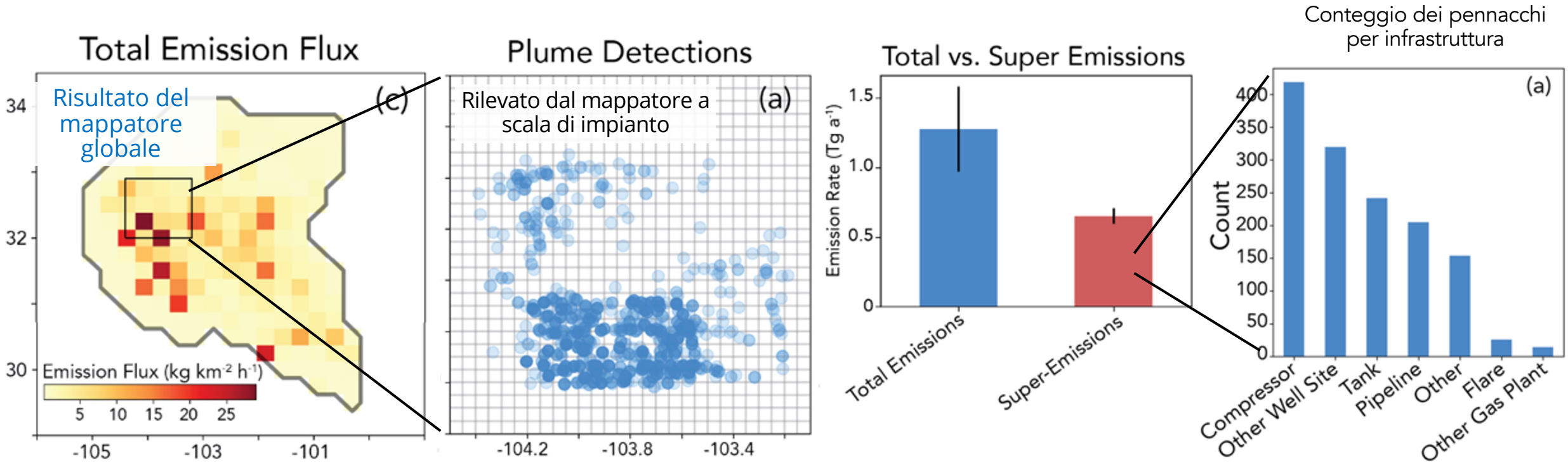




Stima del flusso del bacino con le osservazioni del satellite TROPOMI

Capire le emissioni alla scala del bacino:
flusso totale, super-emettitori, dataset attribuiti

Studio aereo + satellitare del 2024 nel Permiano del Nuovo Messico

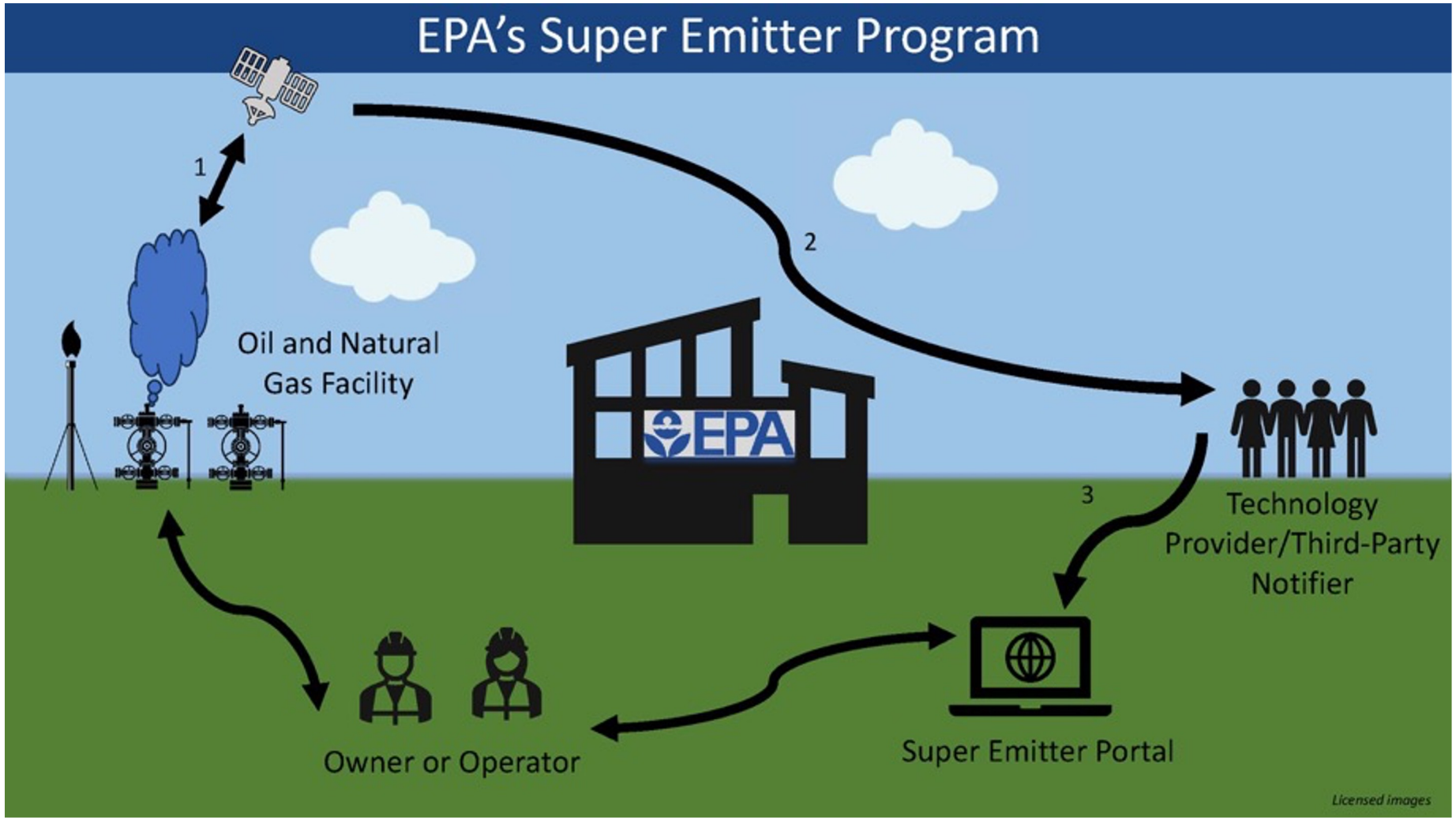


Cusworth et al. (in revisione)

Intensità + infrastrutture + attribuzione agli operatori: una via per la mitigazione

Cusworth et al. (2026)

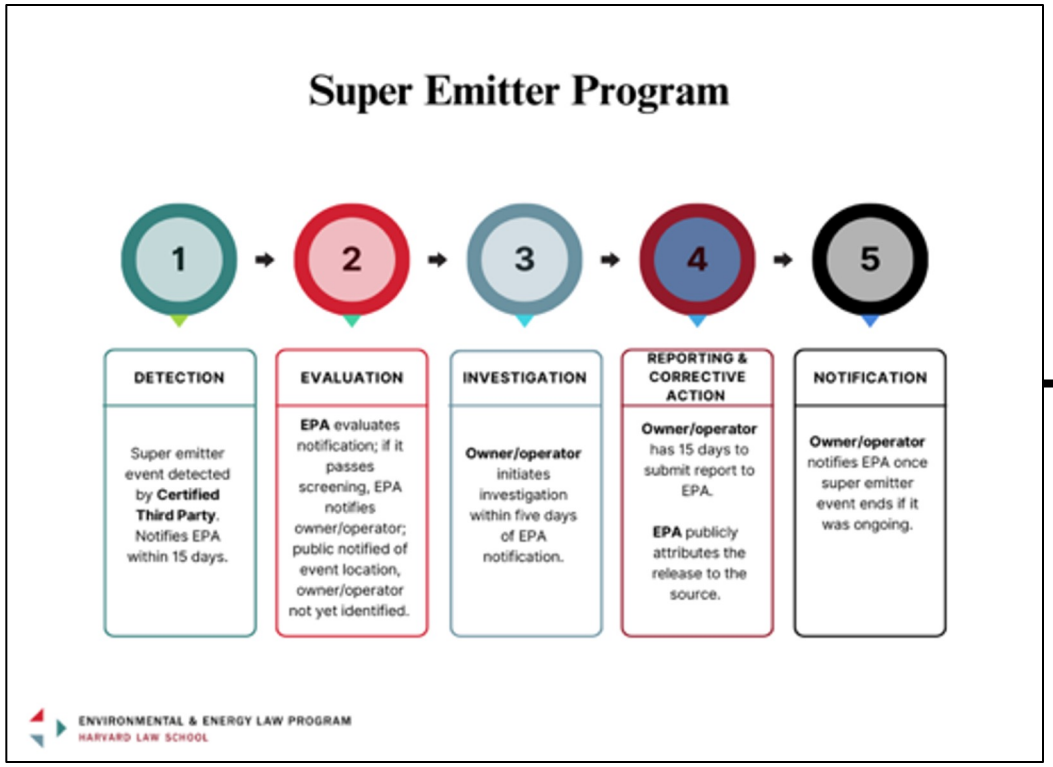
Tornando ai programmi di rendicontazione:



Nuova norma negli USA: i rilevamenti satellitari di super-emettitori effettuati da terzi possono essere segnalati all'EPA (da segnalatori approvati), con obbligo di risposta per gli operatori

Fonte: epa.gov

Ci si aspettava che ogni rilevamento di super-emettitore venisse poi dichiarato dagli operatori nel programma obbligatorio di rendicontazione (Greenhouse Gas Reporting Program)



Ogni anno: l'operatore deve dichiarare qualsiasi emissione > 100 kg/h indipendentemente dalla durata

Ogni anno: gli operatori pagano la Waste Emissions Charge per le perdite oltre 1.000 tCH4/anno

EPA GHGRP (sottoparte W)*
emissioni totali di metano
per qualsiasi attività oltre 1.000 tCH4/anno

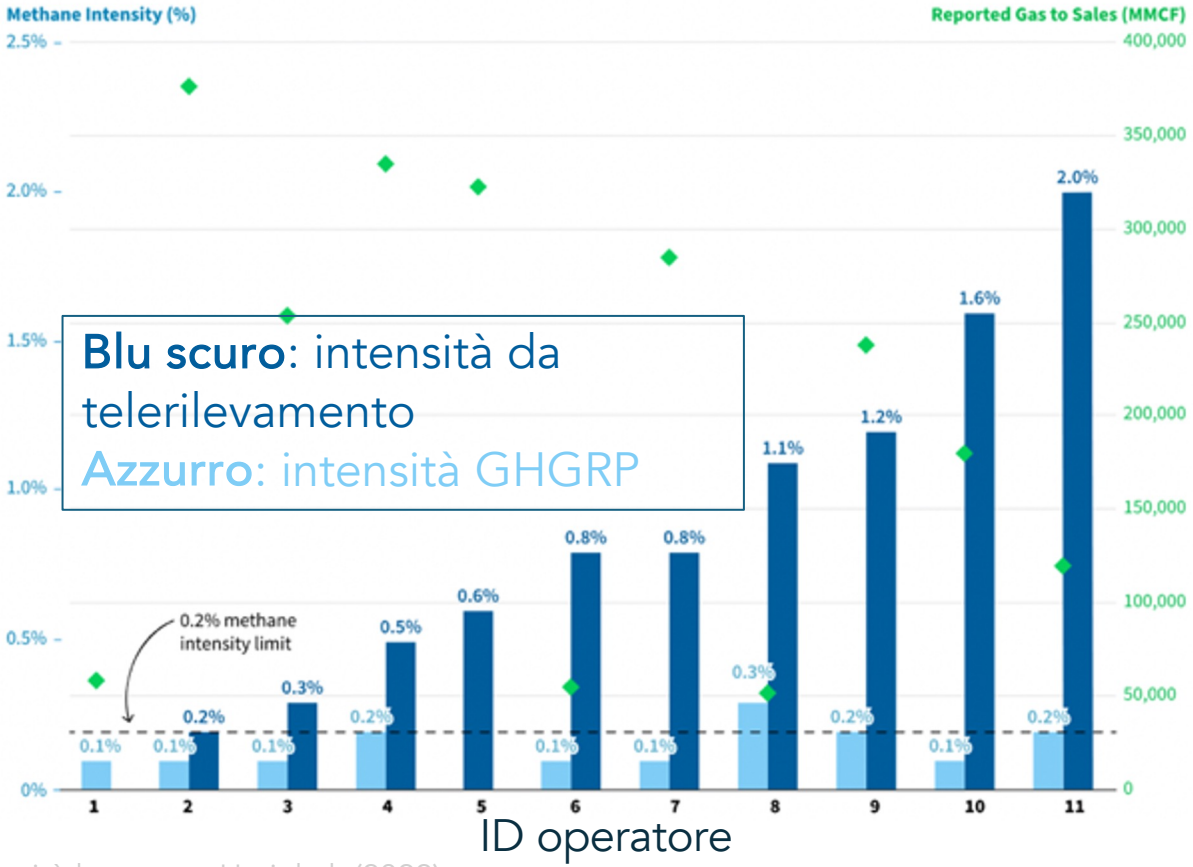
Programma di riduzione delle emissioni di metano dell'IRA (MERP)*

Altre misure empiriche di metano (non super-emettitori) e/o stime bottom-up

Altre segnalazioni di singoli rilevamenti di super-emettitori (ad es. screening LDAR dell'operatore)

L'Inflation Reduction Act (IRA) ha stabilito che ogni emissione di spreco comporti un onere (Waste Emissions Charge, WEC), calcolato in base alle dichiarazioni al GHGRP.

Intensità osservata per operatore nelle campagne aeree rispetto agli attuali protocolli GHGRP



Blu scuro: intensità da telerilevamento
Azzurro: intensità GHGRP

Intensità basata su Hmiel al. (2022)

Analisi prudenziale della sottodichiarazione a cura di RMI

Waste emissions charge difference: Super-emitter observations vs. reported emissions for the Permian Basin in 2020

Operator	**Reported to EPA:** Tax payments at $900/ton	**Aerial measurements:** Tax payments at $900/ton	**Cumulative difference** between tax payments
1	$0	$0	$0
2	$0	$0	$0
3	$0	$5,000,000	$5,000,000
4	$300,000	$16,000,000	$21,000,000
5	$0	$25,000,000	$45,000,000
6	$0	$6,000,000	$51,000,000
7	$0	$30,000,000	$81,000,000
8	$800,000	$8,000,000	$89,000,000
9	$0	$41,000,000	$130,000,000
10	$0	$42,000,000	$172,000,000
11	$900,000	$37,000,000	$208,000,000

Rilevanza per l'IRA: la sottodichiarazione non emersa negli USA potrebbe tradursi in oltre 800 M$/anno di Waste Emissions Charge non pagata

Pausa

Discussione

Come potremmo/dovremmo ancorare i risultati top-down a verità a terra, standard e validazione?

La vostra opinione sull'affidabilità della contabilità top-down rispetto a quella bottom-up è cambiata?

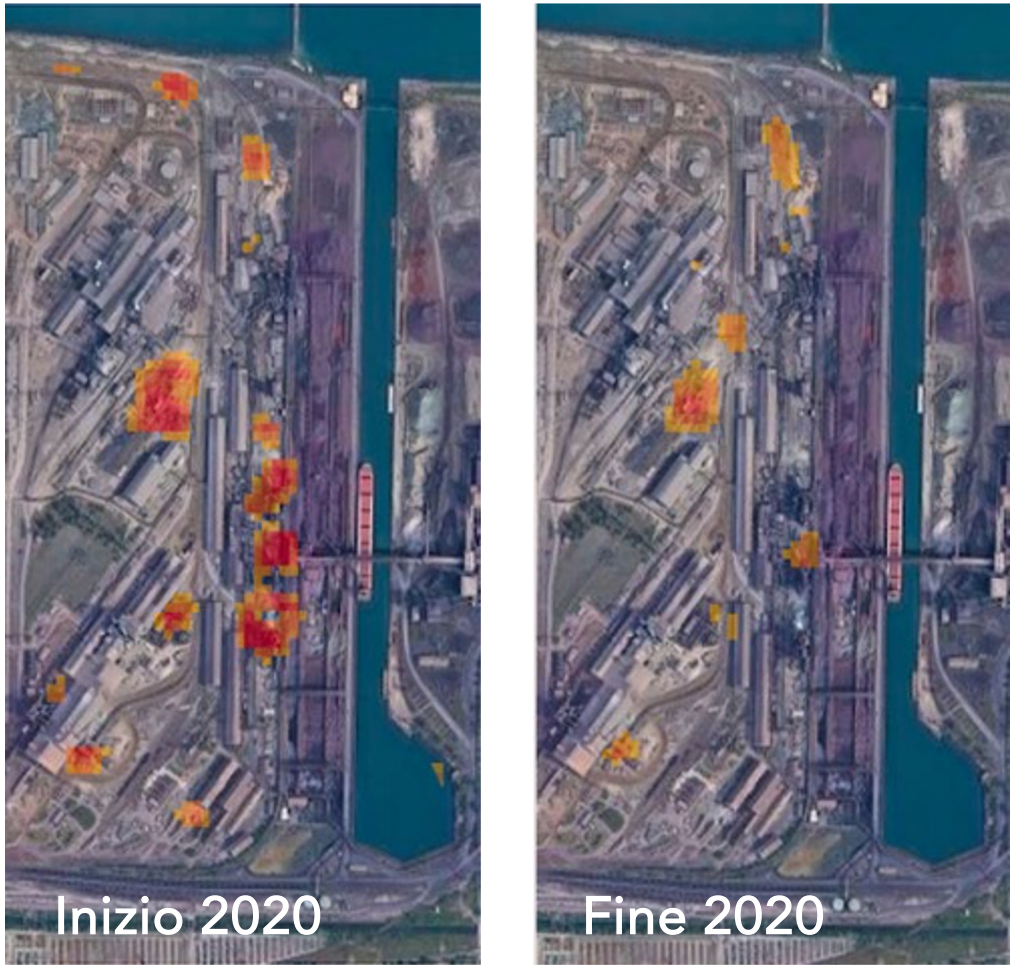
- Votate: di che cosa vi fidate di più, top-down o bottom-up?

Quali esperimenti suggerireste/condurreste per rafforzare la fiducia nelle stime top-down/da telerilevamento?

Parte 3 Usare l’IA per migliorare la contabilità del carbonio

Dati di attività: colmare le lacune di produzione

Esempio: acciaieria Gary Works



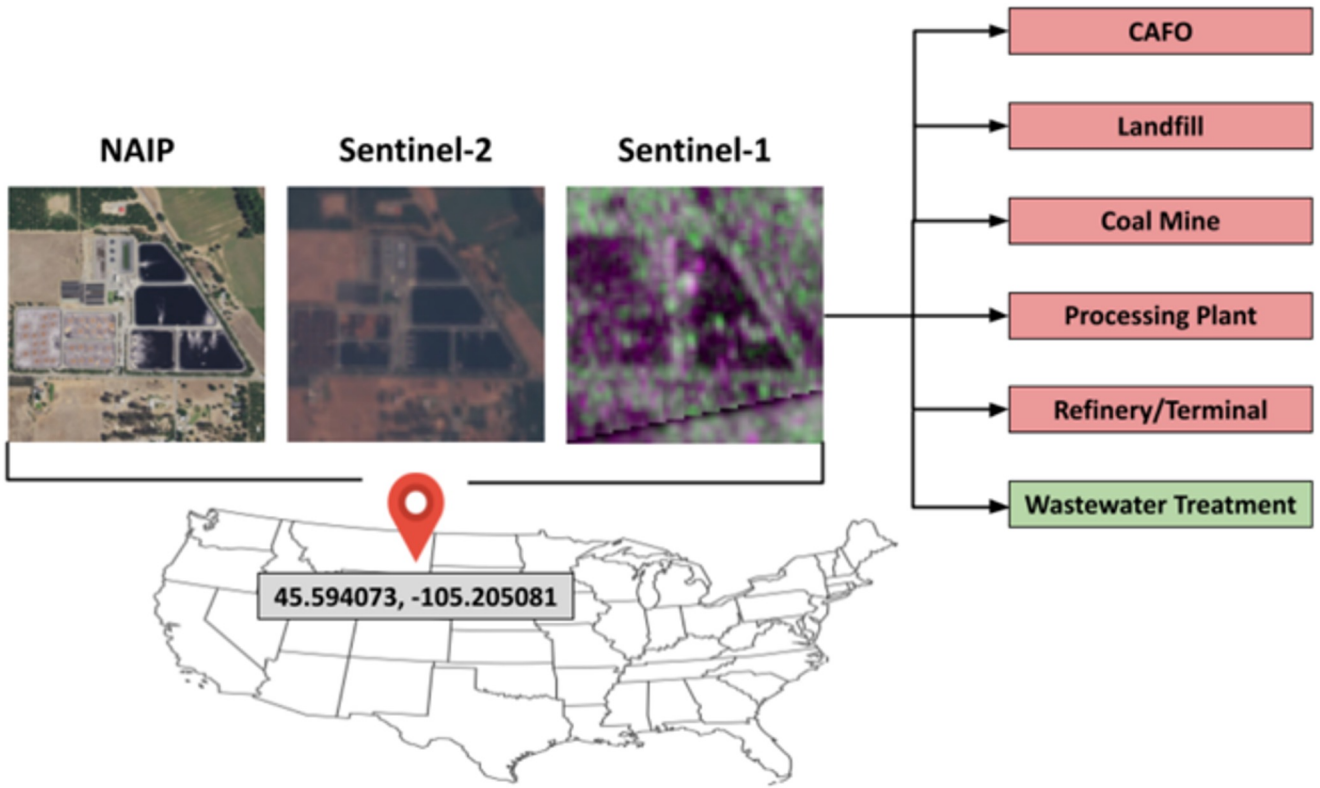
TransitionZERO

Centinaia di acciaierie nel mondo non dichiarano le proprie emissioni.

Per creare un database di emissioni stimate: addestrare un modello di apprendimento automatico sulle firme termiche rilevate nelle bande infrarosse di Landsat-8 e Sentinel-2.

Fonte: TransitionZERO; Climate TRACE

Dati di attività: rilevamento di oggetti

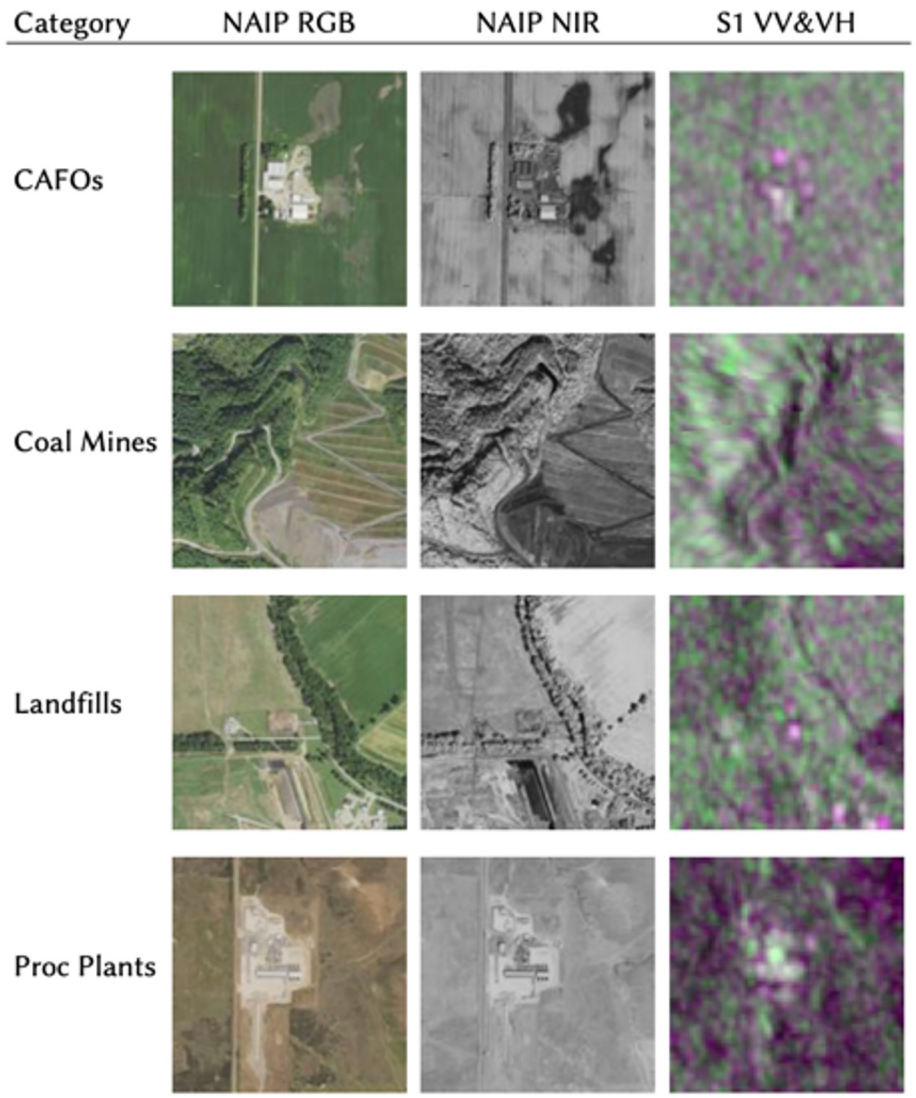


MEthane Tracking Emissions Reference (METER)

Obiettivo: costruire un database completo delle infrastrutture antropiche che emettono metano usando diverse immagini satellitari.

Fonte: METER-ML

Dati di attività: rilevamento di oggetti



Per creare le etichette, i ricercatori hanno raccolto tutti i database GIS di infrastrutture disponibili e ritagliato di conseguenza le immagini satellitari

~50.000 etichette/immagini per l'addestramento

Fonte: METER-ML

Dati di attività: rilevamento di oggetti

Risultati di classificazione (AUPRC) dopo l'applicazione di CNN ai dataset etichettati

Image Product	Bands	CAFOs	Landfills	Mines	Proc Plants	R&Ts	WWTPs	Overall
S1	VH&VV	0.519	0.107	0.152	0.218	0.487	0.119	0.267
S2	RGB	0.889	0.268	0.305	0.374	0.694	0.204	0.456
S2	All	0.889	0.189	0.382	0.368	0.690	0.183	0.450
S2 & S1	All	0.923	0.152	0.379	0.391	0.612	0.231	0.448
NAIP	RGB	0.903	0.270	0.348	0.327	0.849	0.182	0.480
NAIP	All	**0.945**	**0.276**	0.401	**0.508**	**0.857**	**0.303**	**0.548**
NAIP & S2 & S1	All	0.889	0.214	**0.473**	0.457	0.796	0.272	0.517

I dati satellitari abbondano, ma le buone etichette restano difficili da ottenere e variano molto in base all'area geografica

Validazione delle etichette: 2 revisori esperti hanno esaminato manualmente 1.500 etichette:

If the expert identified no clearly visible methane source categories in the image, the example was labeled "negative", and if the expert was uncertain about any label, the example was labeled "uncertain". The two labels per example were then resolved as follows:

1. If the experts agreed and neither was uncertain, the agreed upon label was taken as the final label.
2. If the experts disagreed, and one was uncertain but the other was not, the expert's certain label was taken as the final label.
3. If the experts disagreed, but one agreed with the original label, the original label was taken as the final label.
4. In all other scenarios, the example was reviewed jointly by the experts and a final label was assigned.

Fonte: METER-ML

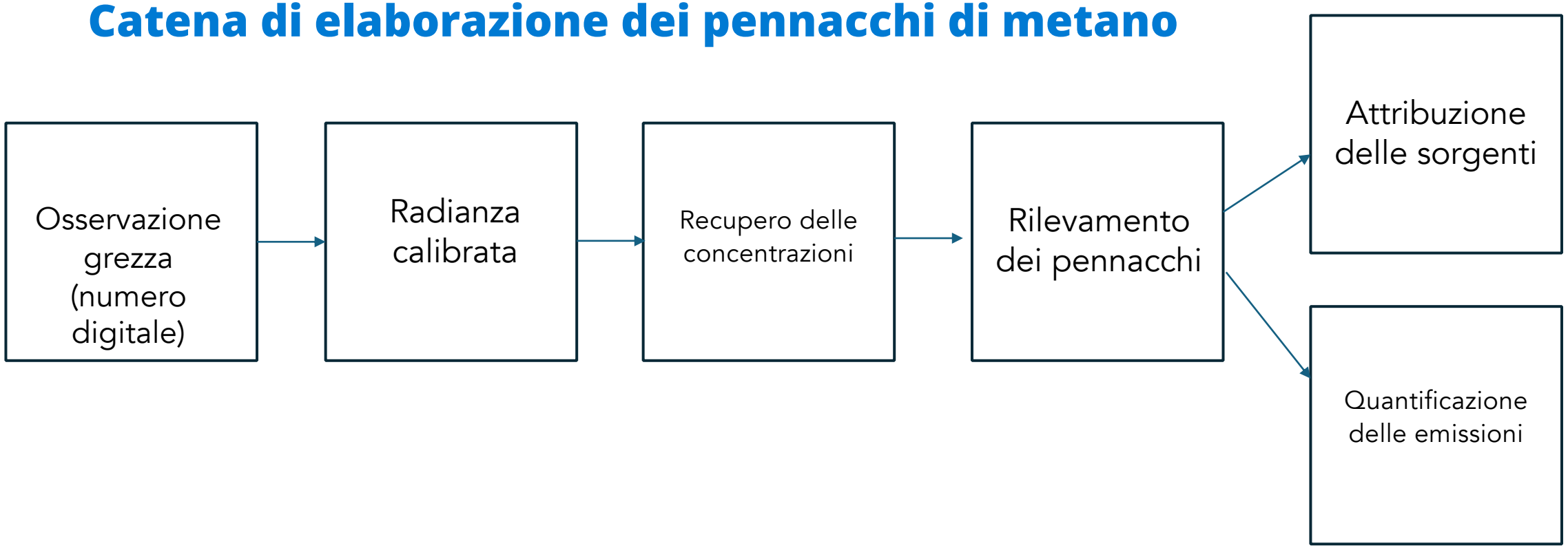
Esempio guidato:

Catena di elaborazione dei pennacchi di metano

Compito: mentre seguiamo questo esempio, pensate a come l’IA potrebbe aiutare il processo

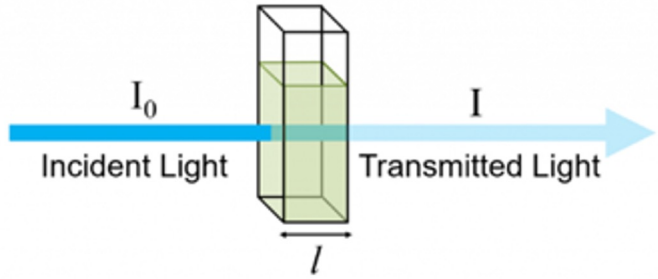
Creare prodotti di dati sui pennacchi richiede più fasi di elaborazione.

Catena di elaborazione dei pennacchi di metano



Il satellite osserva la radianza alla sommità dell'atmosfera, da cui si stimano le concentrazioni in colonna tramite un recupero.

Algoritmo di «filtro adattato» per colonna, basato sulla legge di Beer-Lambert



$$x_m = x_r e^{-k\Delta c}$$

- x_m: Spettro modellato
- x_r: Spettro di riferimento
- k: Assorbimento
- Δc: Aumento di concentrazione

Sviluppo di Taylor (caso linearizzato)

$$x_m = x_r(1 - k\Delta c)$$

Con uno stimatore di massima verosimiglianza, l'aumento di concentrazione «ottimale» che minimizza i residui tra modello e osservazione (pesati con una covarianza) è:

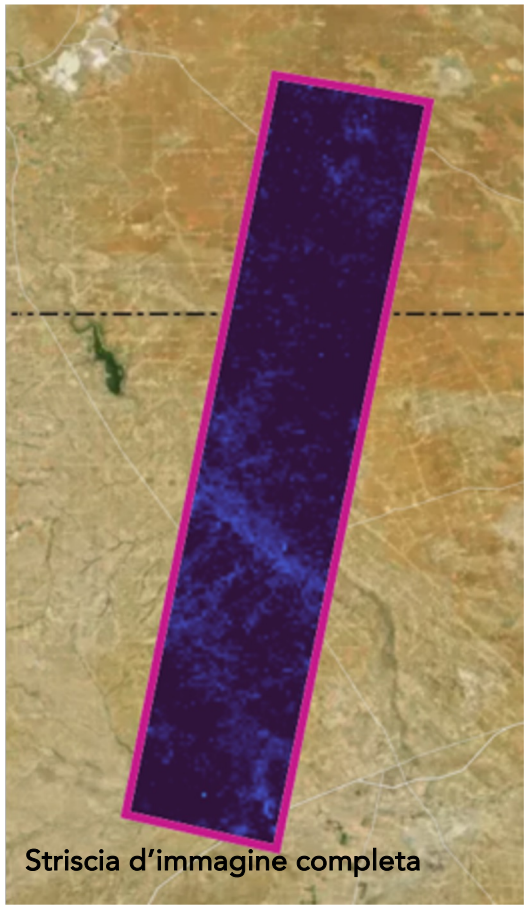
$$\Delta c = \frac{t^T \Sigma^{-1}(x_r - x_o)}{t^T \Sigma^{-1} t}$$

- Δc: Aumento di CH4 in colonna

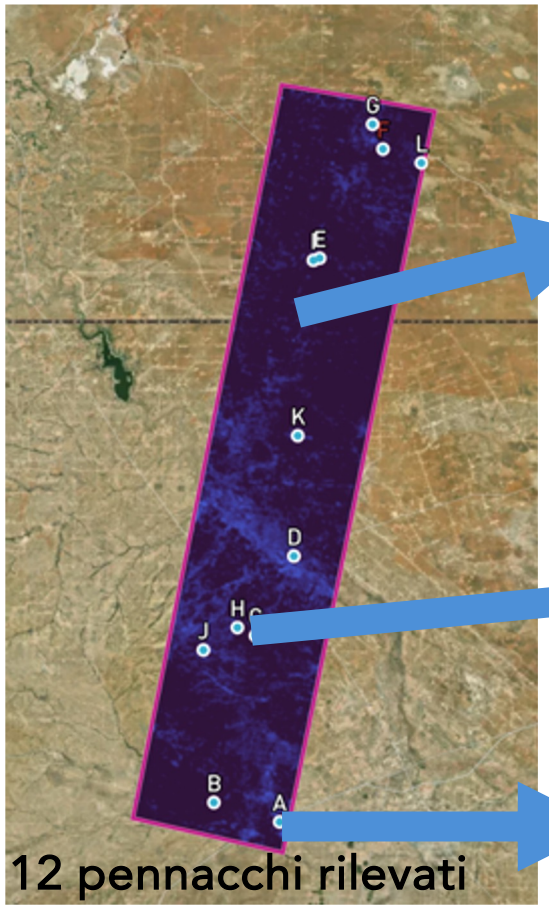
We choose x_r and Σ to be the mean and covariance of a collection of pixels in the image, and t is a mapping between radiance and concentration

Rilevamento dei pennacchi: cercare aghi in un pagliaio

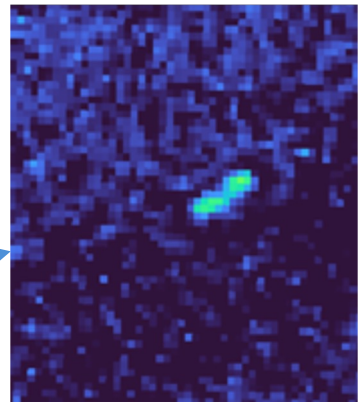
Esempio: immagine di 20 x 100 km2 (satellite Tanager) ripresa su una fitta rete di infrastrutture petrolifere e del gas in Texas



Striscia d'immagine completa

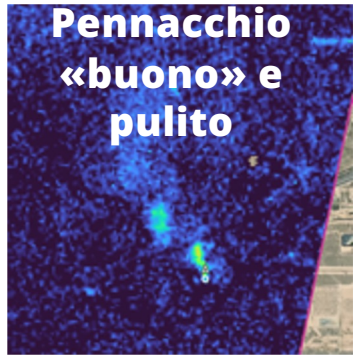


12 pennacchi rilevati

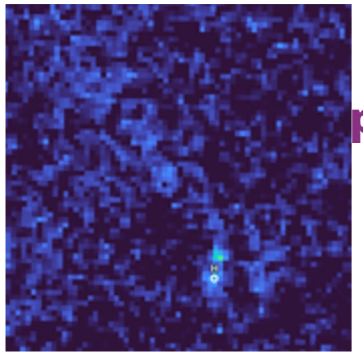




Falso aumento: tetti bianchi



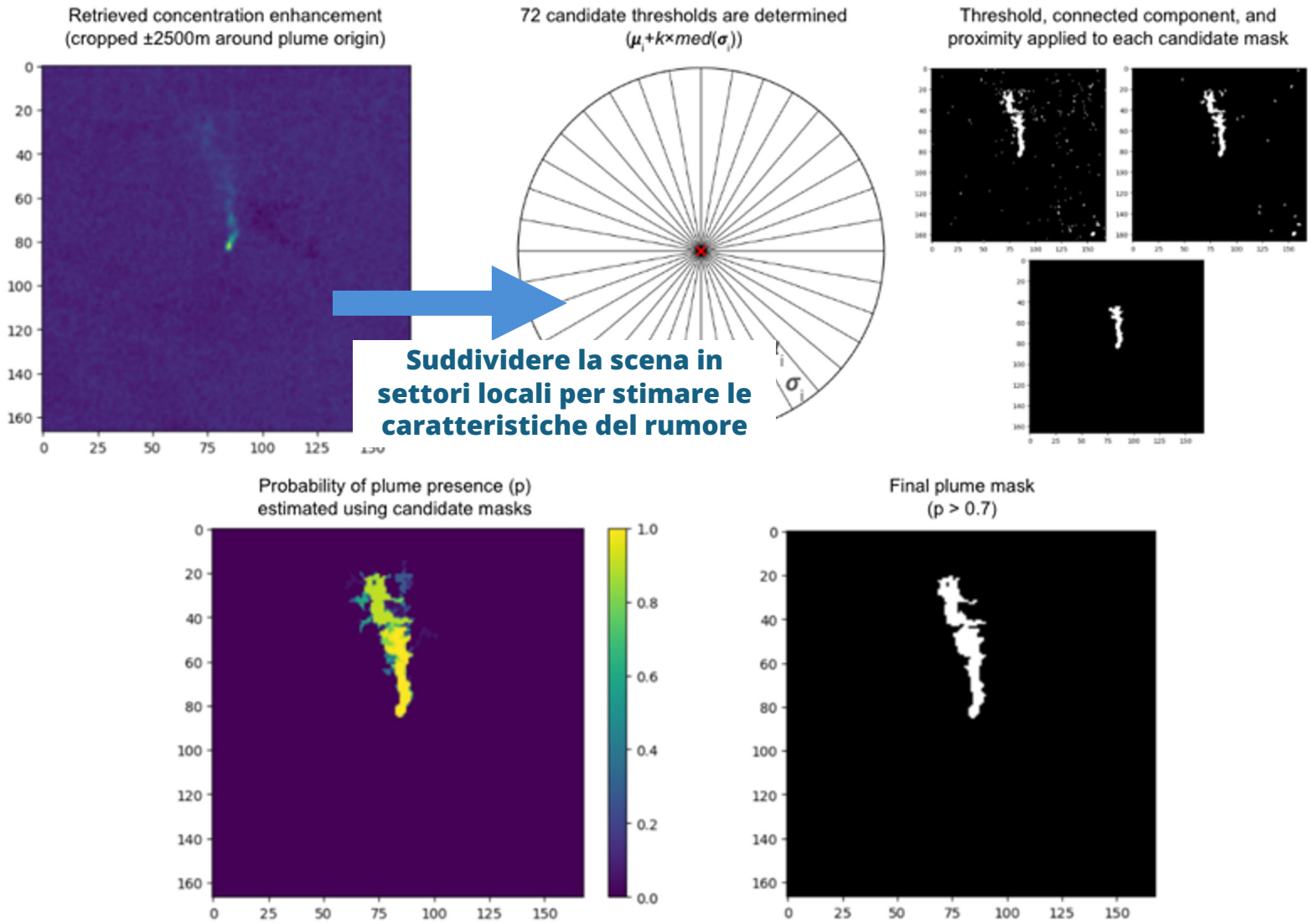
Pennacchio «buono» e pulito



Piccolo pennacchio marginale

Domanda: qual è il rischio di un singolo falso positivo (ripensate all'inizio della lezione)?

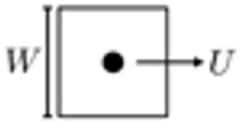
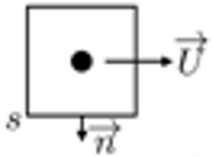
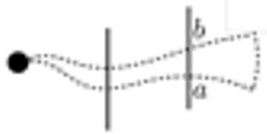
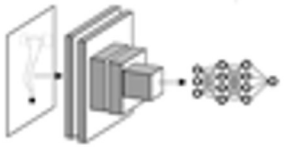
Segmentare («mascherare») i rilevamenti dei pennacchi



Passaggi critici verso la quantificazione

La segmentazione definisce i confini del pennacchio, consentendo di quantificarne massa e lunghezza

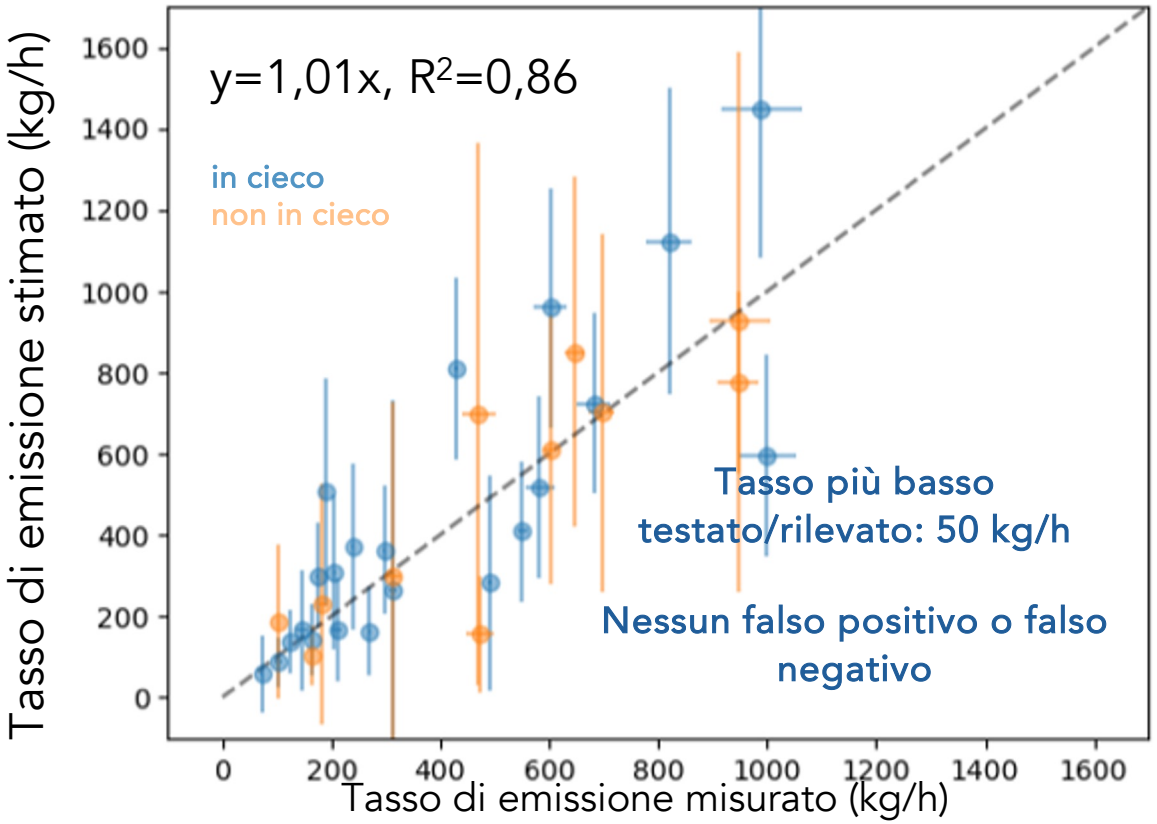
Quantificare il tasso di emissione di un pennacchio

Gaussian Plume		$Q = U\Delta\Omega(x,y)\left(\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)e^{\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}}\right)$
Local mass balance		$Q = UW\Delta\Omega$
Gauss theorem		$Q = \oint_s \Omega(s)\vec{U}\cdot\vec{n}\,ds$
Cross-sectional flux (CSF)		$Q = U\int_a^b \Delta\Omega(x,y)dy$
Integrated mass enhancement (IME)		$Q = \frac{U_{\text{eff}}\ \text{IME}}{L}$
Angular width		$Q = f(\text{IME},\theta)$
Machine learning		$Q = \text{CNN}(\text{Plume image})$

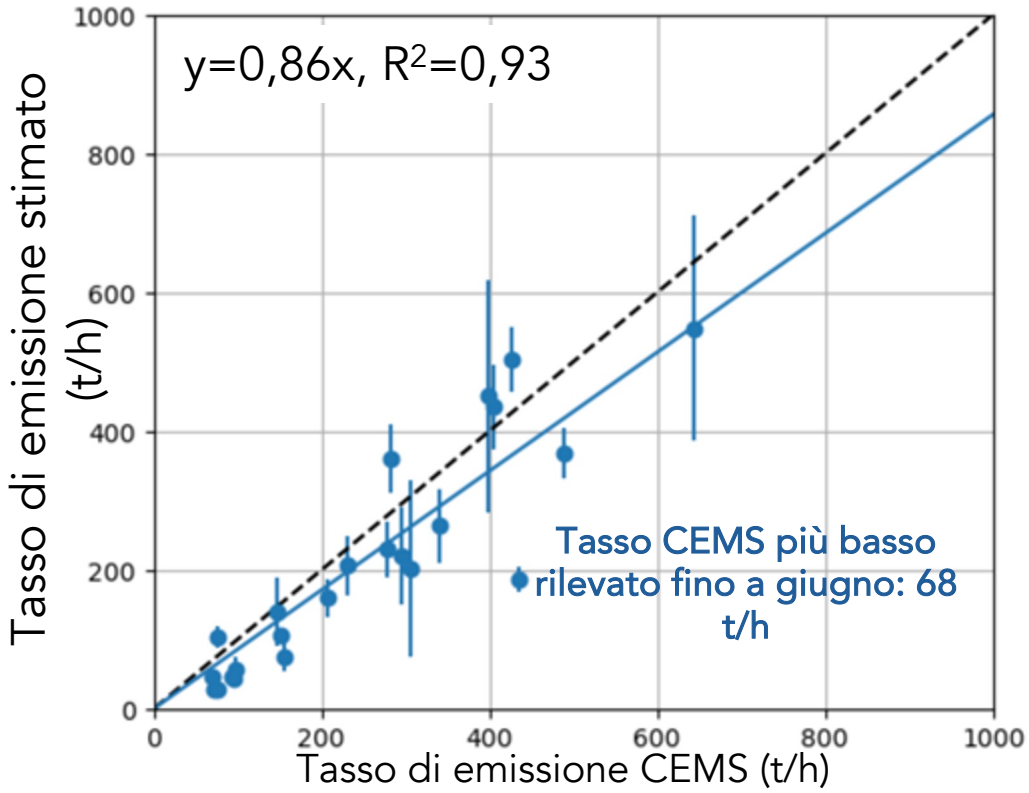
Approcci più comuni

Esperimenti di rilascio controllato permettono di valutare la distorsione e l'incertezza dei metodi di quantificazione

Rilasci controllati di CH4 per Tanager (Stanford; Casa Grande, Arizona)



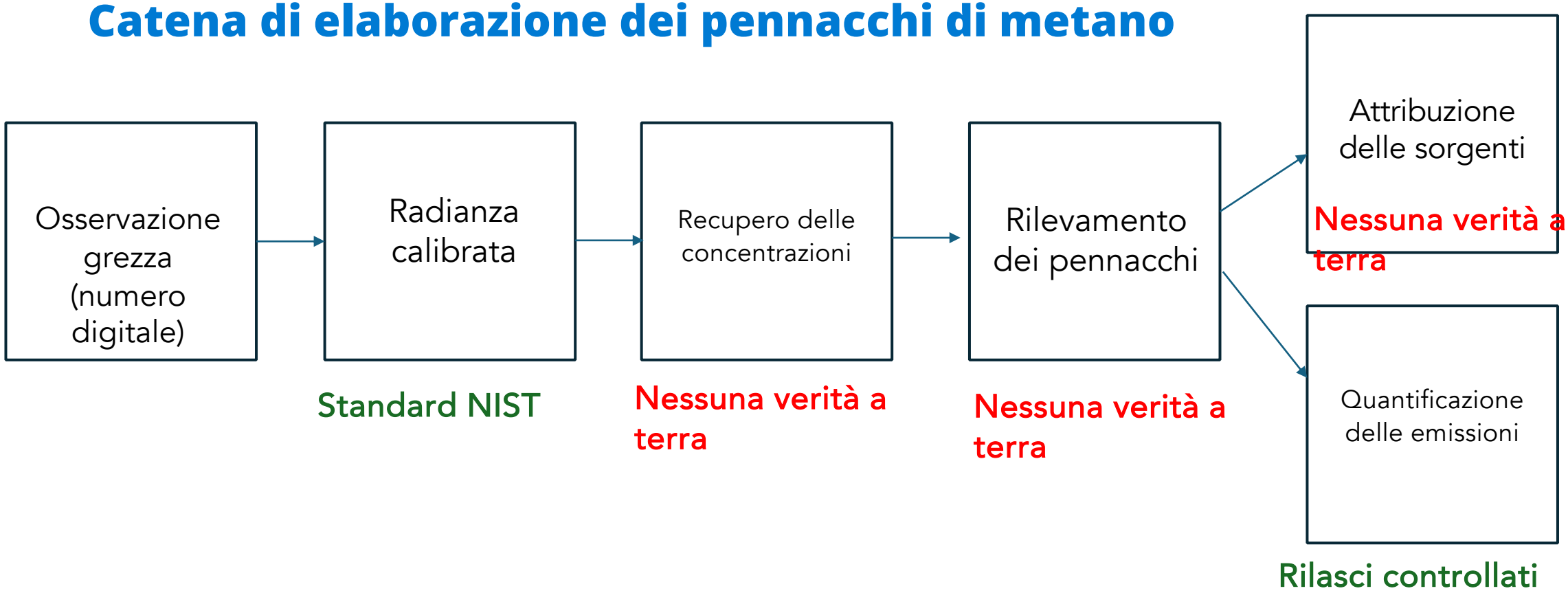
Satellite Tanager e sistemi di monitoraggio continuo delle emissioni di CO2 (CEMS, US EPA, distribuiti a livello regionale)



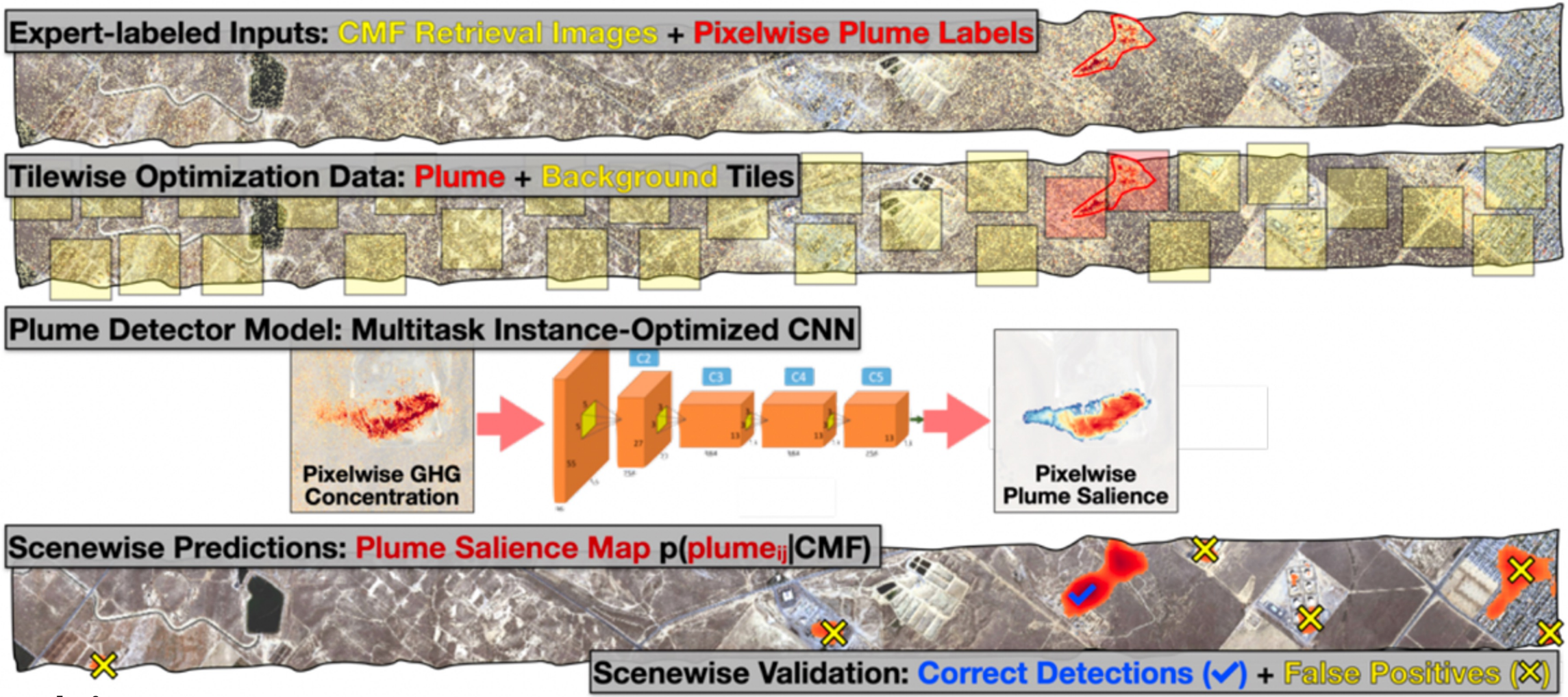
Reuland et al. (inviato)

Verità a terra limitata

Catena di elaborazione dei pennacchi di metano

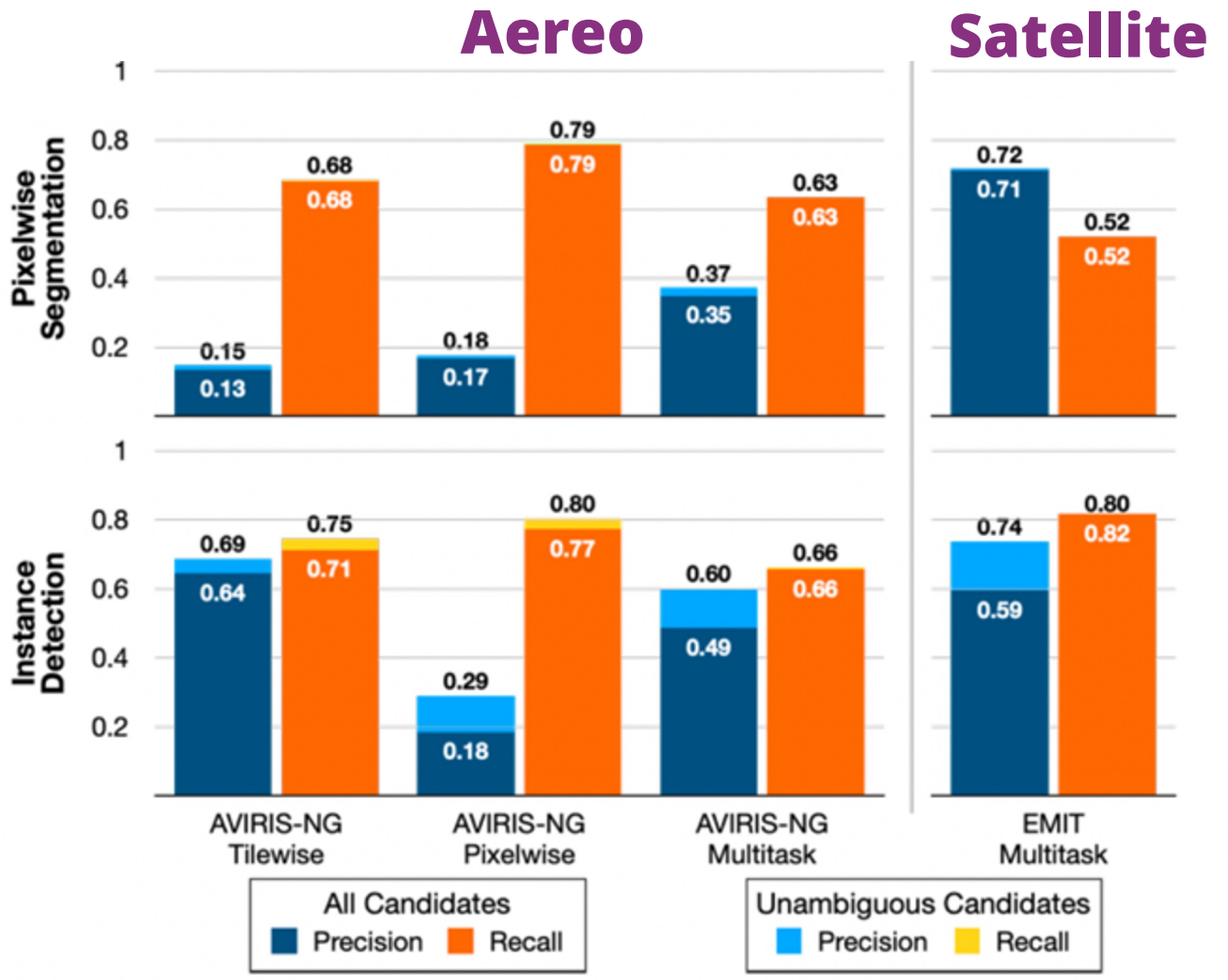


Il rilevamento dei pennacchi è il collo di bottiglia della catena di elaborazione. Esplorare metodi per ridurre la latenza/il bisogno di annotazione manuale



Bue et al. (in revisione)

Qual è l'obiettivo di apprendimento? Trovare i pixel con metano elevato (segmentazione densa) o trovare i pennacchi (rilevamento di istanze)?

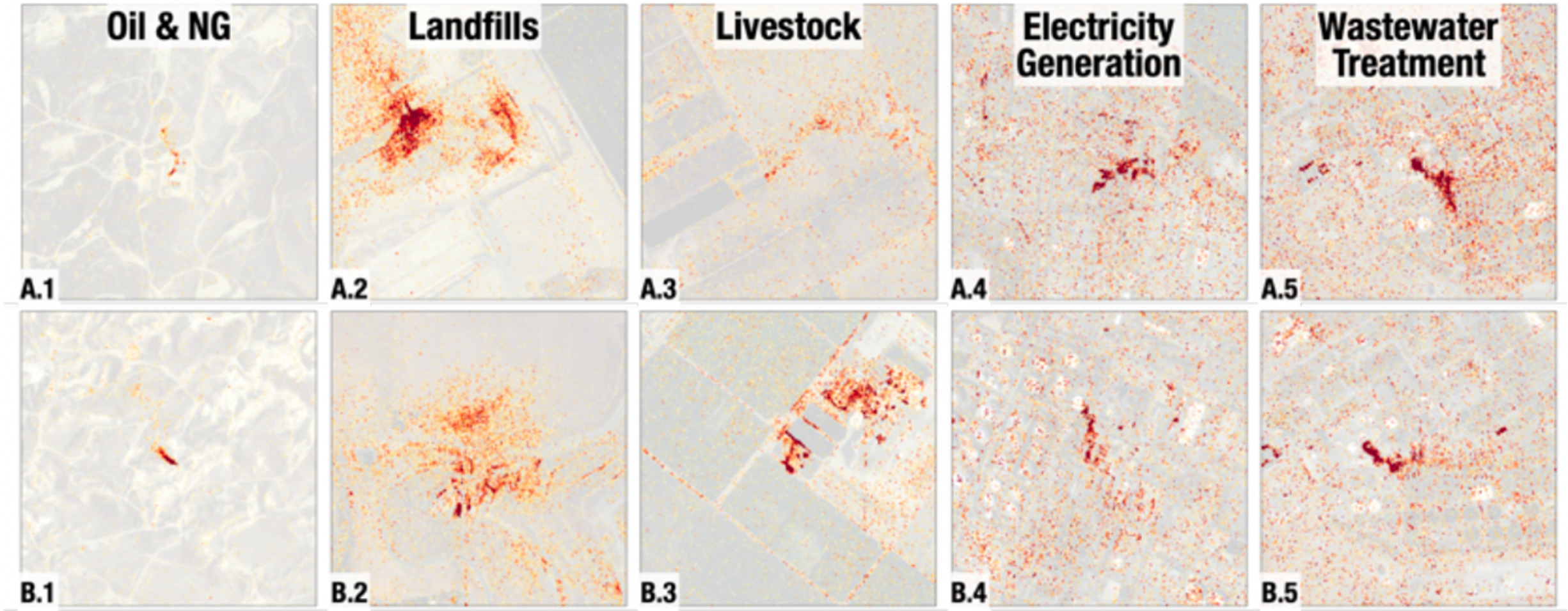


Problema: i super-emettitori di metano sono rari, poche migliaia di campioni di addestramento

Architettura del modello e funzione di perdita fanno un'enorme differenza a seconda del compito

Bue et al. (in revisione)

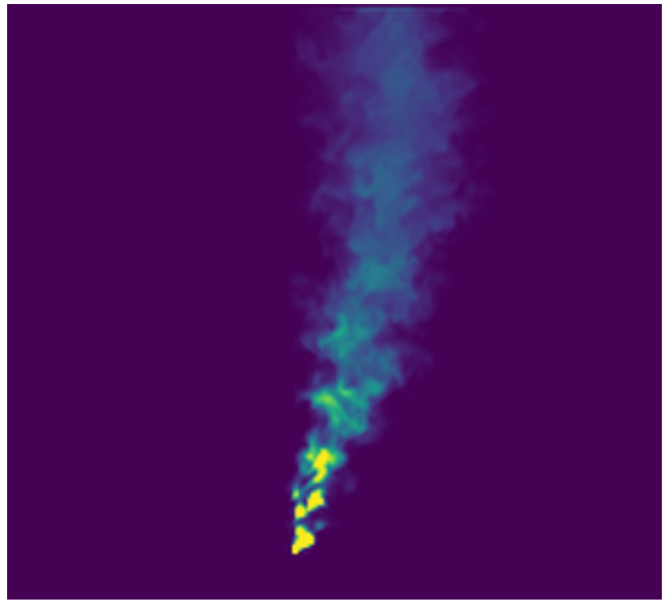
I pennacchi di metano hanno forme molto diverse a seconda del settore emissivo. Anche il rumore strumentale dipende dalla regione e dall'ambiente.

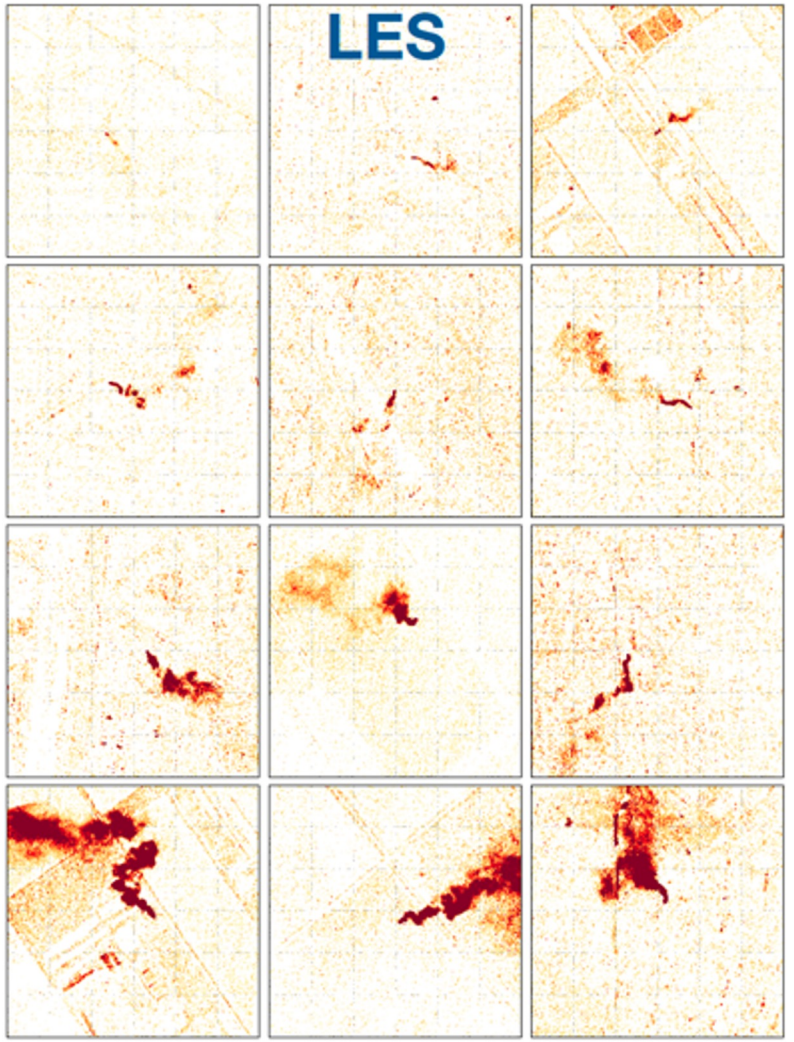


Bue et al. (in revisione)

Aumento dei dati: inserire pennacchi sintetici in immagini realistiche per creare più campioni

Generare pennacchi falsi con simulazioni a grandi vortici (LES)



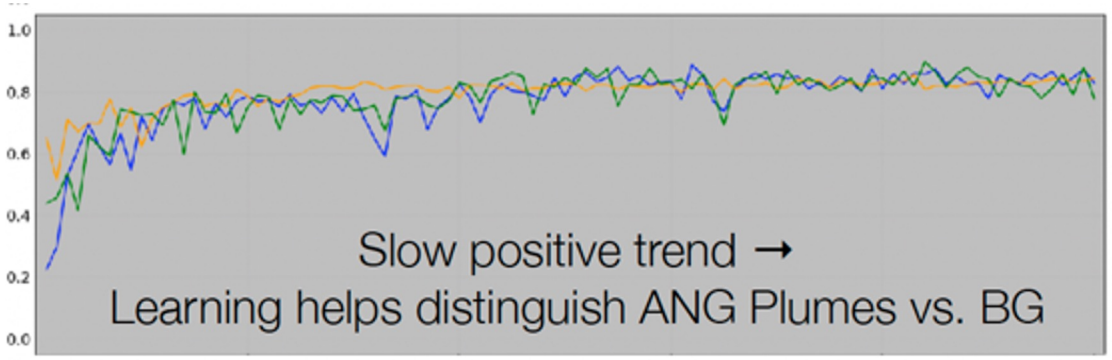


Inserire i pennacchi in riquadri con rumore realistico

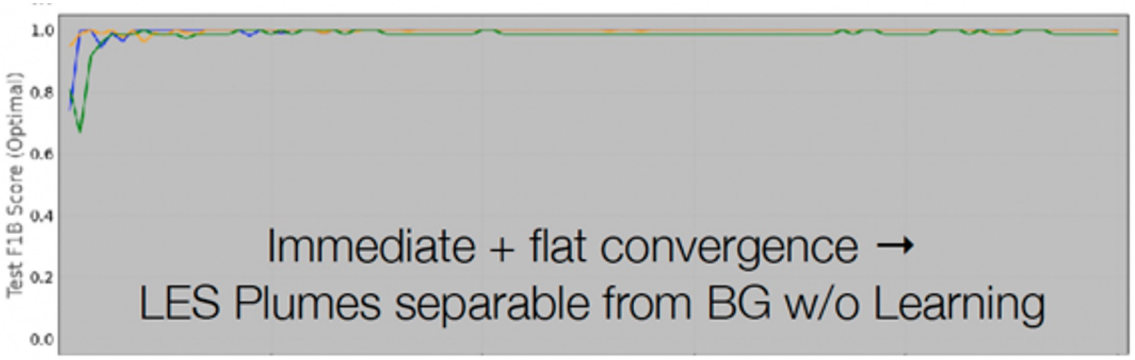
L’aumento dei dati pone un problema di generalizzazione con le architetture CNN

Punteggio F1

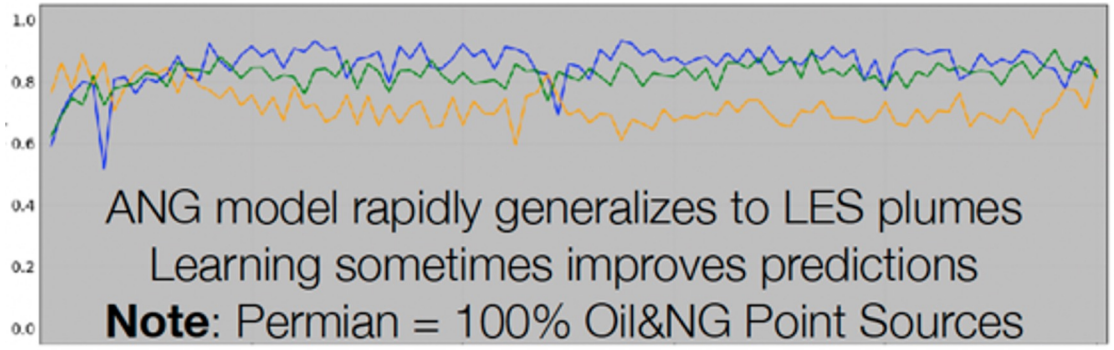
Addestramento aereo -> test aereo



Addestramento LES -> test LES



Addestramento aereo -> test LES



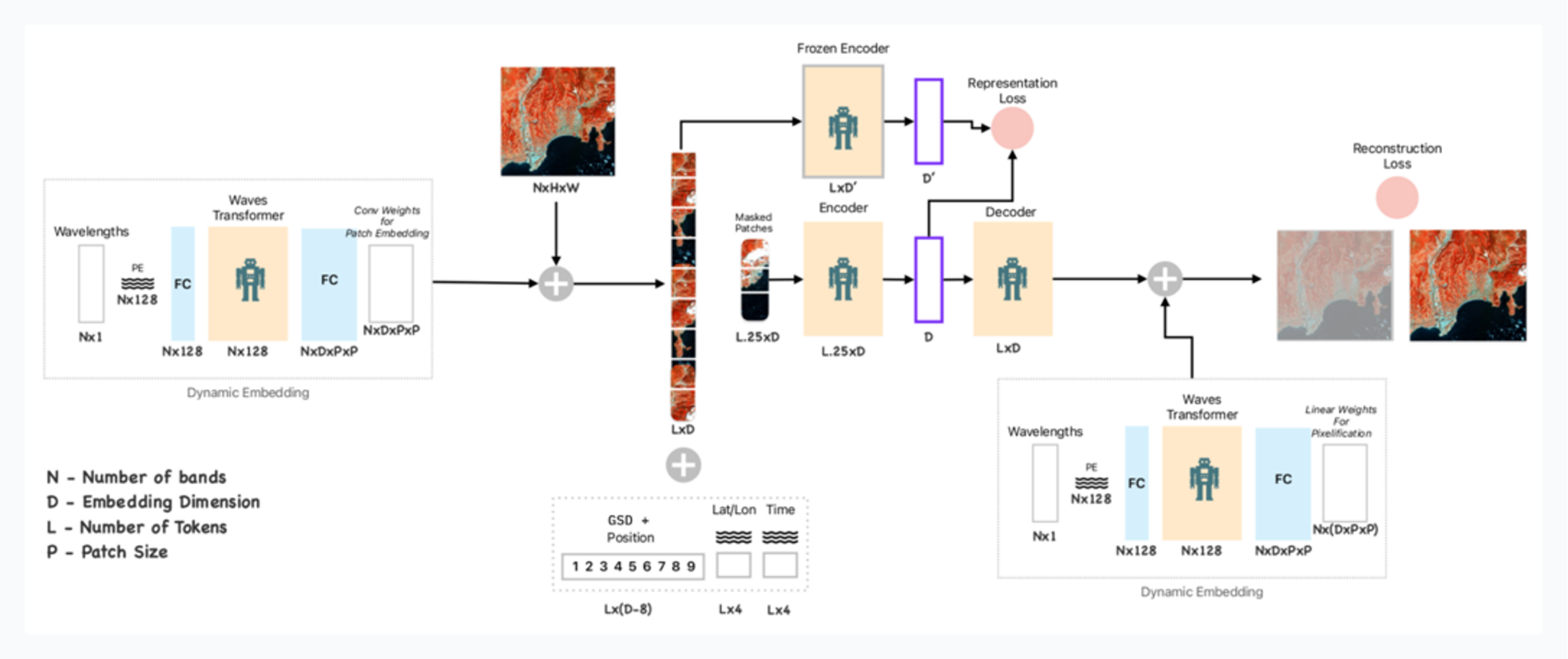
Addestramento LES -> test aereo



Epoca

Test dei modelli fondazionali della Terra su questa applicazione

Embedding di Clay



Testati diversi embedding esistenti e nuovi con Tanager, Sentinel-2 e dimensioni dei riquadri variabili.

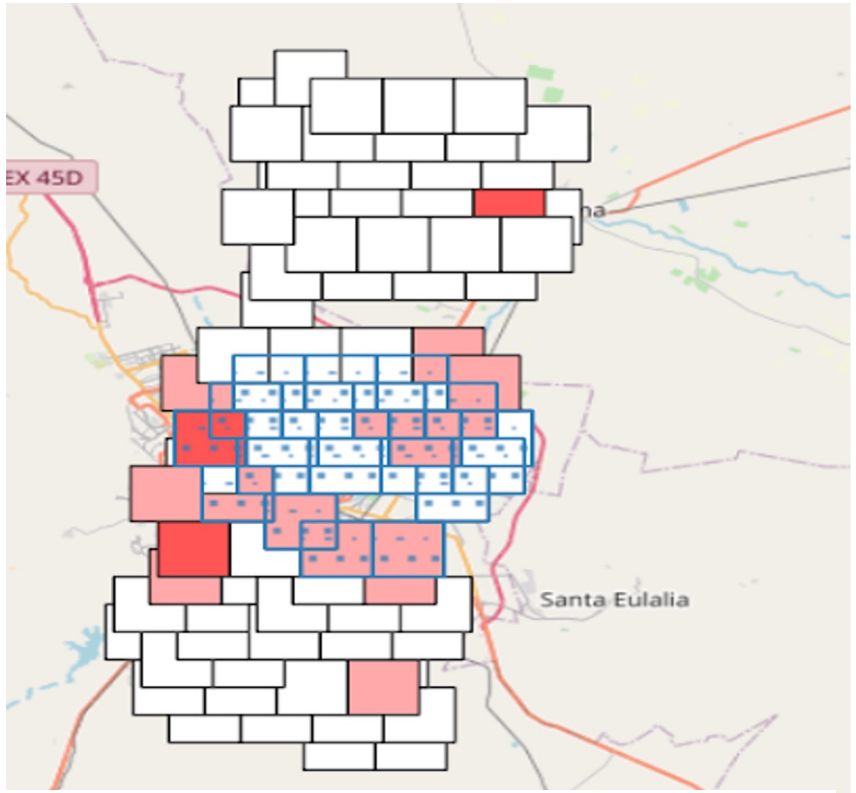
Gli embedding indicano che ~10 bande Tanager + Sentinel-2 bastano per la migliore classificazione

Fonte/i	Dimensione del riquadro [metri][1]	N. di bande Tanager	F1 positivo[2]	F1 ponderato per classe	F1 negativo
Tanager	3840	10	0.64	0.61	0.19
Tanager	**3840**	**Tutte**	**0.74**	**0.69**	0.19
Tanager	2560	10	0.43	0.40	0.17
Tanager	2560	Tutte	0.69	0.64	**0.21**
Tanager, S2	3840	10	**0.74**	**0.69**	0.15
Tanager, S2	3840	Tutte	0.69	0.64	0.12

Scarse prestazioni nel prevedere la classe senza pennacchio.
Peggio dei test basati su CNN

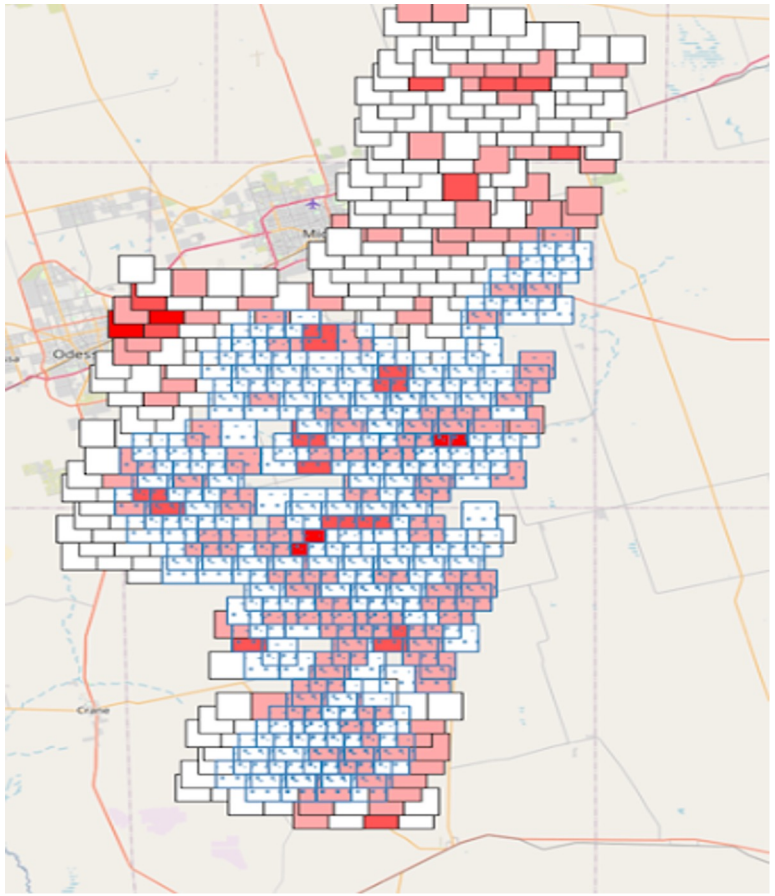
L’esame visivo dei risultati non mostra schemi chiari negli errori di previsione

Esempio di output del modello Clay in Oklahoma



Punti blu: posizioni note dei pennacchi
Quadrati bianchi: classe negativa
Quadrati rossi: classe positiva

Esempio di output del modello Clay in Texas

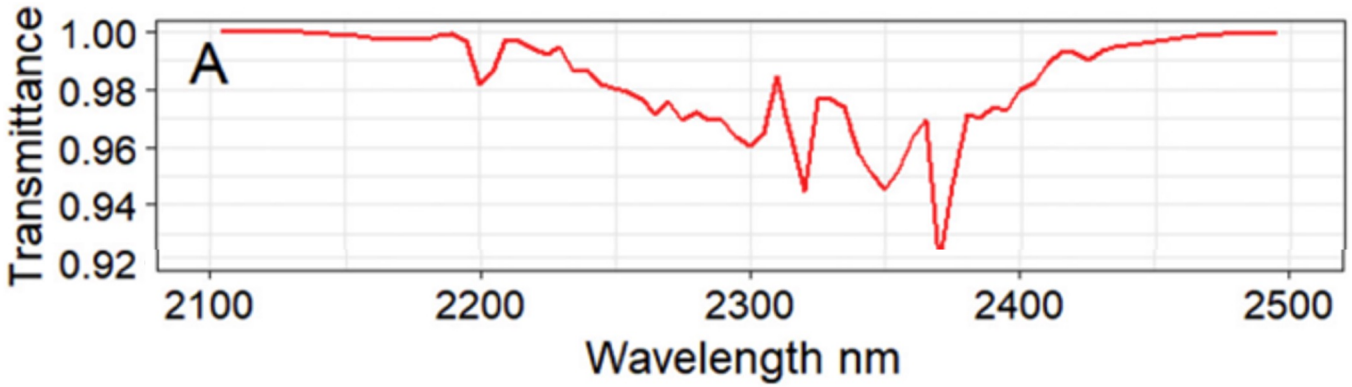


Ipotesi:

L’assorbimento del metano è una caratteristica minore della retrodiffusione solare osservata

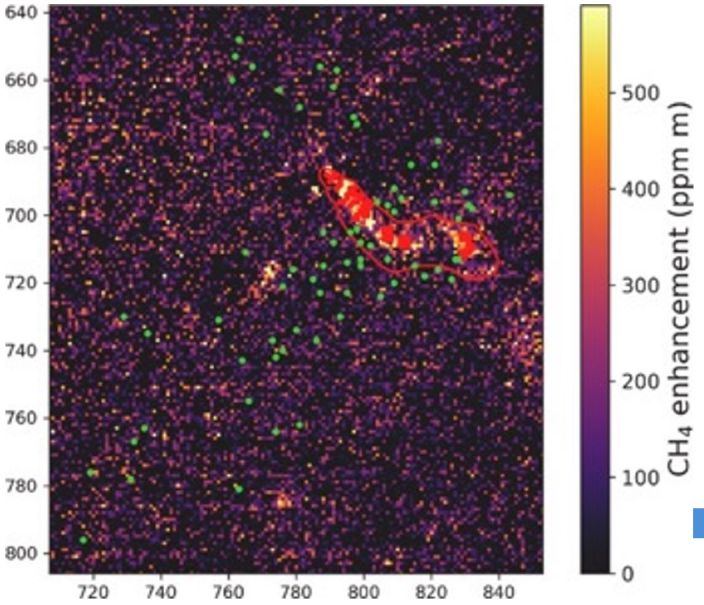
I modelli fondazionali generici della Terra possono perdere questa firma sottile durante la creazione degli embedding

Tornare agli spettri, alla fisica e alle CNN: valutazione a posteriori

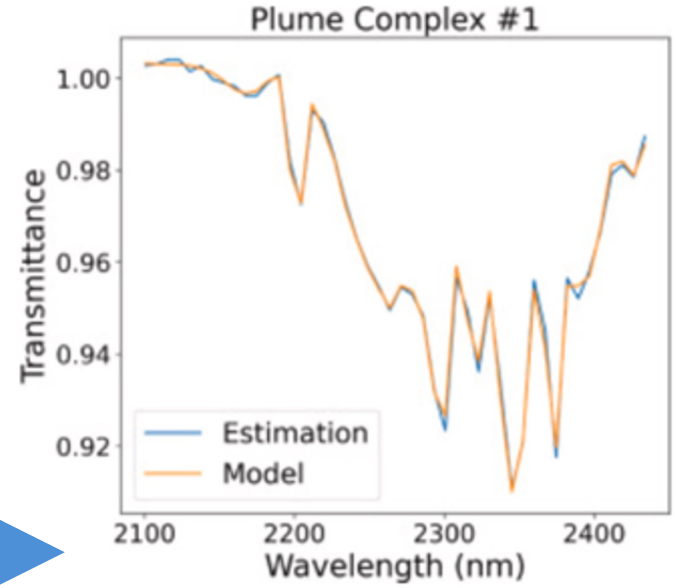


Ecco come appare spettralmente l'assorbimento del metano con una spaziatura di banda di 5 nm (cioè un satellite come Tanager)

Quindi, se ho un pennacchio reale e prendo spettri dentro il pennacchio e fuori dal pennacchio…



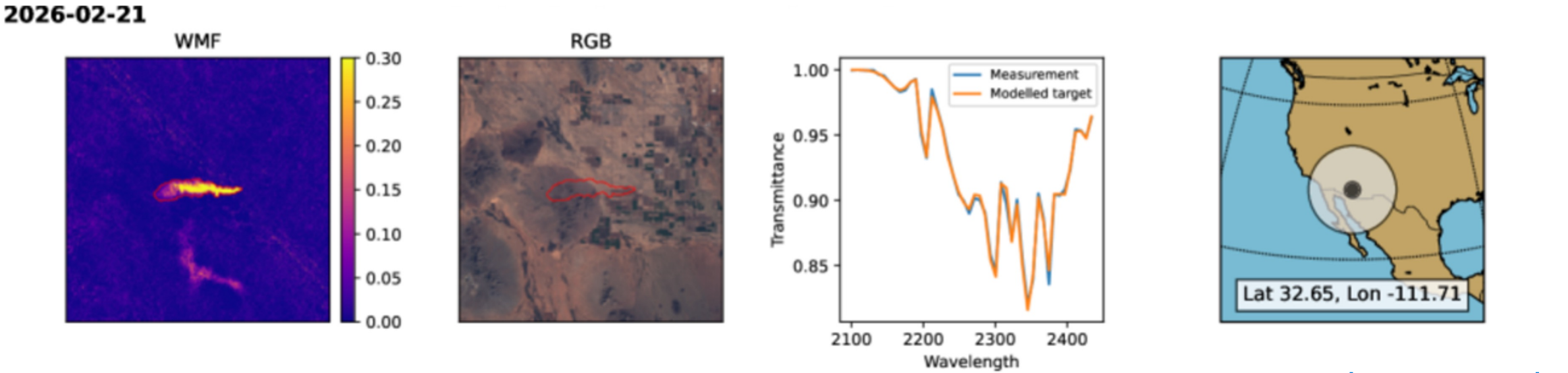
Dovrei ottenere qualcosa che assomiglia a un assorbimento



Xiang et al. (2025)

Unire AA e intuizione fisica per segnalare i pennacchi con bassa latenza

Esempio di allerta pennacchio completamente automatizzata in operatività



Rilevamento del pennacchio con CNN → Superato un controllo fisico automatizzato (senza AA) → Carbon Mapper ha allertato l'autorità locale

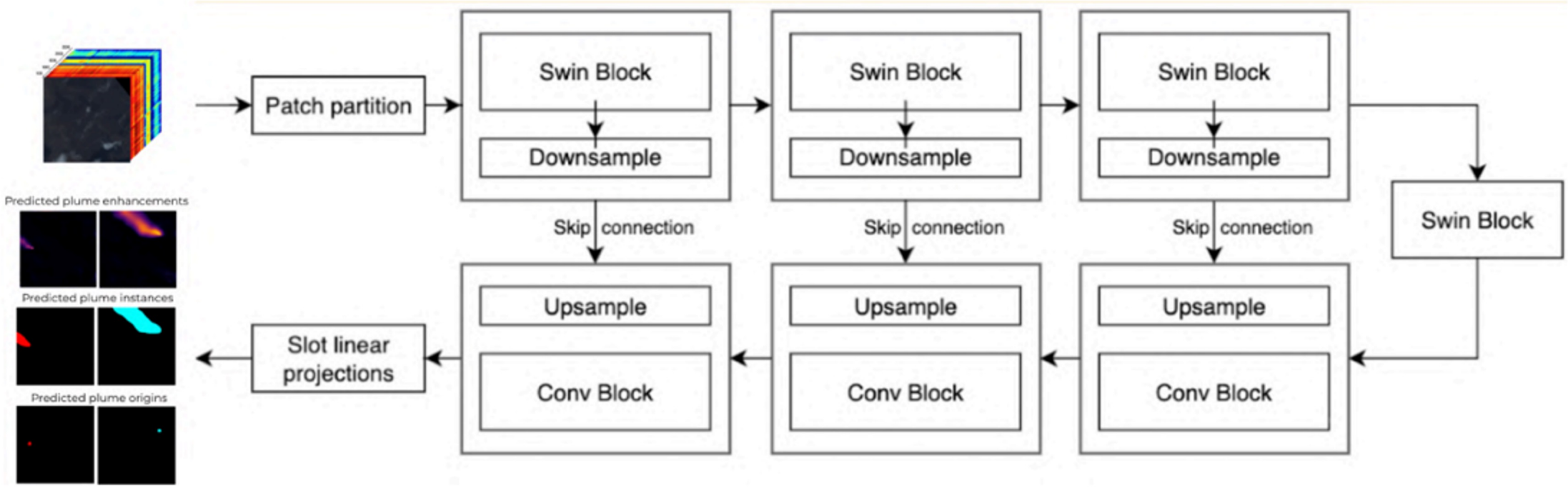
Qui un modello di AA con molti falsi positivi è accettabile se combinato con una solida intuizione fisica per produrre un rilevamento

Domanda: i sistemi di IA o AA devono essere davvero end-to-end?

Růžička et al. (2026)

Verso i transformer e i dataset massicciamente aumentati

MAPL-EMIT: architettura U-Net con encoder Swin Transformer



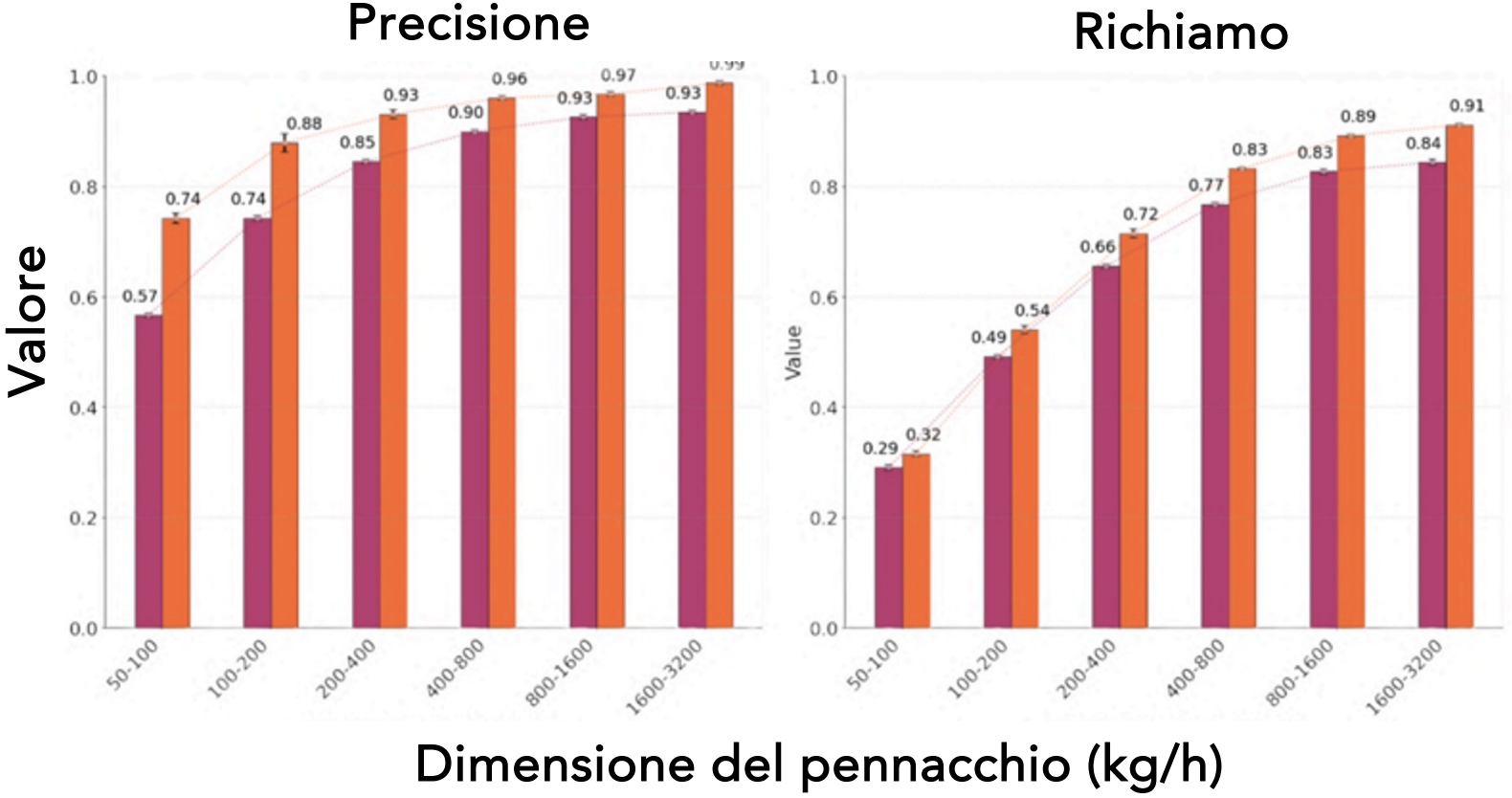
Aumento con pennacchi sintetici: 3,6 milioni di pennacchi sintetici

Addestramento su tutti i canali di radianza e tutti i pixel di un riquadro

Batchu et al. (2026)

Verso i transformer e i dataset massicciamente aumentati

MAPL-EMIT: architettura U-Net con encoder Swin Transformer



Incoraggiante, ma resta un problema di «verità a terra»:

«…solo il 54% dei pennacchi di MAPL-EMIT era presente nella collezione di pennacchi EMIT L2B, il che indica che MAPL-EMIT ha individuato il doppio dei pennacchi rispetto agli analisti umani.»

Come valutare la precisione con fiducia se le etichette umane possono contenere errori di questa entità?

Batchu et al. (2026)

Discussione

Tornando alle domande precedenti, ora con la lente dell'IA:

Come potremmo/dovremmo ancorare i risultati top-down [o dell'IA] a verità a terra, standard e validazione?

Sondaggio dal vivo: la vostra opinione sull'affidabilità della contabilità top-down, basata sull'IA o bottom-up è cambiata?

- Votate: di che cosa vi fidate di più? Top-down (manuale); top-down (IA); bottom-up?

Quali esperimenti suggerireste/condurreste per rafforzare la fiducia nelle stime top-down/da telerilevamento?

Aspetti chiave della contabilità del carbonio basata sull'IA

Temi comuni a tutti gli esempi di questa lezione

Verità a terra e qualità delle etichette

Spesso manca una verità a terra affidabile (recupero, rilevamento, quantificazione). La qualità delle etichette varia tra le aree geografiche. Progettate la valutazione tenendone conto.

Generalizzazione geografica e di dominio

I modelli addestrati su una regione o un sensore spesso falliscono su altri. Valutate esplicitamente le prestazioni fuori distribuzione prima della messa in opera.

I costi di falsi positivi e falsi negativi sono asimmetrici

Un falso positivo può far scattare un'azione normativa o un onere per l'operatore; un falso negativo lascia emissioni non contabilizzate. Il giusto punto di lavoro sulla curva precisione-richiamo dipende dalla decisione a valle, non solo dal punteggio F1.

Fisica/spiegabilità come salvaguardia

Sapete spiegare gli output di un modello di IA? La fisica ci tiene con i piedi per terra, soprattutto nelle applicazioni in cui la fiducia è cruciale.

Percorso di messa in opera e adesione dei portatori di interesse

Chi accetta i risultati: autorità di regolamentazione, operatori, revisori? Le sole prestazioni tecniche non bastano senza fiducia istituzionale.

La disponibilità dei dati determina l'ambito

Dati più ricchi: Nord America (ad es. GHGRP), UE (ad es. ETS). Dati scarsi: gran parte del Sud globale. La copertura dichiarata dal vostro modello potrebbe non reggere proprio dove conta di più per la contabilità globale.

IA etica e responsabile nella contabilità del carbonio

Implicazioni in termini di sorveglianza

- Il rilevamento satellitare delle emissioni degli impianti da parte di terzi crea un livello di monitoraggio indipendente. Ma solleva anche delle domande:
  - Chi dovrebbe poter segnalare? La procedura di approvazione dell'EPA per i segnalatori di super-emettitori è un possibile modello di governance dell'accesso.
  - Chi controlla i dati?

Prestazioni disomogenee tra aree geografiche

- I modelli addestrati in regioni ricche di dati (USA, UE) spesso peggiorano in regioni con poche etichette (Asia meridionale, Africa, America Latina), dove una contabilità accurata può contare di più per i progressi globali.
- Le prestazioni di riferimento su dati nazionali tenuti da parte non bastano a dimostrare che il modello è pronto per un impiego globale.

Chi sopporta le conseguenze degli errori?

- Falsi positivi: un operatore viene segnalato per un'azione normativa che non ha causato. Se il modello sbaglia, chi ne risponde?
- Falsi negativi: le emissioni sfuggono al rilevamento, minando l'integrità dei mercati del carbonio o consentendo scarichi illegali.
- In entrambi i casi, chi subisce le conseguenze raramente è chi ha sviluppato il modello.

Trasparenza e contestabilità

- Una stima delle emissioni derivata da satellite che fa scattare un onere normativo deve essere spiegabile. I modelli a scatola nera creano difficoltà per il giusto processo.
- Quale ricorso ha un operatore per contestare un rilevamento? Gli enti di normazione (ISO, OMM, Verra) iniziano ad affrontare il tema per i mercati del carbonio.
- Modelli open source e dataset di riferimento pubblici (METER-ML, EMIT L2B) favoriscono il controllo. I sistemi proprietari non trasparenti minano la fiducia.

Come iniziare: dataset, strumenti e problemi aperti

Dataset aperti e benchmark

METER-ML

Benchmark multisensore per il rilevamento delle infrastrutture di metano (CAFO, discariche, pozzi, impianti di trattamento).
https://stanfordmlgroup.github.io/projects/meter-ml/

Climate TRACE

Inventario aperto delle emissioni per impianto per oltre 352 milioni di asset in tutti i principali settori. API gratuita + download CSV.
Climatetrace.org

TROPOMI / Sentinel-5P

Prodotti giornalieri e globali dell'ESA sulle colonne di metano e CO. Gratuiti tramite il Copernicus Open Access Hub.
https://scihub.copernicus.eu/

Portale dati di Carbon Mapper

Recuperi di metano e anidride carbonica da Tanager, EMIT e vari strumenti aerei:
data.carbonmapper.org

Problemi di ricerca aperti

- Migliore quantificazione dell'incertezza nelle catene complete di quantificazione dei pennacchi
- Benchmark di generalizzazione tra sensori/aree geografiche
- Raccolta scalabile di verità a terra per i settori difficili da etichettare (agricoltura, cemento)
- Integrare i rilevamenti dell'IA nei quadri normativi di rendicontazione
- Applicare ai dati spettrali di telerilevamento modelli fondazionali con pre-addestramento informato dalla fisica
- Colmare su larga scala il divario tra inversione atmosferica e attribuzione per impianto

Conclusioni: che cosa abbiamo visto e che cosa resta aperto

✅ Che cosa abbiamo visto

- Perché e come funziona la contabilità del carbonio
- Stima bottom-up e top-down
- Monitoraggio satellitare di CH_4/CO_2
- Metodi di inversione atmosferica
- IA per i dati di attività
- IA per il rilevamento dei pennacchi
- Usare l'IA per snellire il processo decisionale
- Quantificazione dell'incertezza

🔭 Questioni aperte e oltre questa lezione

- Contabilità aziendale e di filiera (accennata brevemente)
- Valutazione del ciclo di vita con l'IA
- IA per rafforzare i processi di audit
- Fusione di sensori (satellite + suolo + aereo)
- Governance dei modelli, standard e certificazione

Spazio per altre domande e discussione

Quiz

D1 *Scelta multipla*

Quale delle seguenti opzioni descrive meglio il limite principale della contabilità del carbonio bottom-up?

A. Richiede osservazioni satellitari, che sono costose

B. Si basa su dati di attività autodichiarati e fattori di emissione che possono non riflettere le emissioni locali reali

C. Può essere usata solo per la CO_2, non per il metano

D. È applicabile solo ai paesi sviluppati con quadri normativi solidi

D2 *Scelta multipla*

Nella catena di elaborazione dei pennacchi di metano ad alta risoluzione, quale fase dispone attualmente della MINORE verità a terra per addestrare o valutare modelli di IA?

A. Calibrazione delle osservazioni satellitari grezze

B. Recupero delle concentrazioni con filtro adattato

C. Rilevamento dei pennacchi

D. Quantificazione delle emissioni

D3 *Vero/Falso*

Vero o falso: i modelli fondazionali della Terra (ad es. Clay) hanno superato gli approcci basati su CNN nel rilevamento dei pennacchi di metano negli esperimenti con Tanager descritti in questa lezione.

D4 *Scelta multipla*

Un'azienda vuole impiegare un rilevatore di pennacchi di metano basato sull'IA a supporto di un'iniziativa di segnalazione del Super Emitter Program. Quale considerazione dovrebbe influenzare di più la scelta della soglia decisionale (compromesso precisione/richiamo)?

A. Massimizzare il punteggio F1 complessivo sul set di test tenuto da parte

B. Il costo relativo di falsi positivi e falsi negativi, date le conseguenze normative e finanziarie a valle

C. Usare la stessa soglia del miglior articolo pubblicato sul rilevamento dei pennacchi

D. Minimizzare il tempo di inferenza per consentire allerte in tempo reale

Letture preliminari

Joyce et al. (2023) — METER-ML: A Multi-Sensor Earth Observation Benchmark for Automated Methane Source Mapping

Jacob et al. (2022) — Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations