



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

School of Telecommunications Engineering

Improved detection of methane point-source emissions by
including auxiliary information

End of Degree Project

Bachelor's Degree in Telecommunication Technologies and
Services Engineering

AUTHOR: Garrote Calabuig, Álex

Tutor: Guanter Palomar, Luis María

External cotutor: Gorroño Viñegla, Javier

ACADEMIC YEAR: 2023/2024

Resumen

Los gases de efecto invernadero son los causantes del cambio climático, y uno de los que más calentamiento global provoca, en cuanto a la relación cantidad-efecto, es el metano. Se sabe que ha estado aumentando cada vez más desde comienzos del siglo pasado hasta ahora, y que muchas de estas emisiones son relativamente fáciles de reducir (ya que tienen un origen humano) y, aunque no sean las más importantes, pueden suponer un cambio importante en la lucha contra el calentamiento global. Se trata de las emisiones producidas en las instalaciones de producción de petróleo y gas (O&G). Para su detección se utilizan imágenes de las bandas espectrales 11 (1560–1660 nm) y 12 (2090–2290 nm) extraídas desde varios satélites y, con un complejo proceso digital, se intenta identificar plumas de metano en todo el mundo, para su posterior cuantificación. Con esto, surge un grave problema: la identificación de falsos positivos. Así, se intentará probar un algoritmo en distintos puntos de emisión de metano conocidos para identificar outliers con información adicional obtenida de otras bandas espectrales de los mismos satélites para ver si es factible continuar la investigación en este sentido para la mejora de la detección de metano.

Resum

Els gasos d'efecte hivernacle són els causants del canvi climàtic, i un dels que més escalfament global provoca, quant a la relació quantitat-efecte, és el metà. Es coneix que ha estat augmentant cada vegada més des de començaments del segle passat fins ara, i que moltes d'aquestes emissions són relativament fàcils de reduir (ja que tenen un origen humà) i, tot i no ser les més importants, poden significar un important canvi en la lluita contra l'escalfament global. Es tracta de les emissions produïdes a les instal·lacions de producció de petroli i gas (O&G). Per a la seua detecció s'utilitzen imatges de les bandes espectrals 11 (1560–1660 nm) i 12 (2090–2290 nm) extretes des de diversos satèl·lits i, amb un

complex procés digital, es tracten d'identificar plomes de metà arreu del món, per a la seua posterior quantificació. Amb això, es presenta un greu problema: la identificació de falsos positius. Així, es provarà un algoritme en diferents punts d'emissió de metà coneguts per identificar outliers amb informació addicional obtinguda d'altres bandes espectrals dels mateixos satèl·lits per veure si és factible continuar la investigació en aquest sentit per a la millora de la detecció de metà.

Abstract

Greenhouse gases are the cause of climate change, and one of the gases that most contributes to global warming, in terms of the quantity-effect relationship, is methane. It is known that its levels have been increasing steadily since the beginning of the last century, and many of these emissions are relatively easy to reduce (as they are of human origin) and, although not the most significant, they could bring about an important change in the fight against global warming. These are the emissions produced at oil and gas (O&G) production facilities. To detect them, images from spectral bands 11 (1560–1660 nm) and 12 (2090–2290 nm) obtained from various satellites are used, and through a complex digital process, attempts are made to identify methane plumes around the world for subsequent quantification. However, a serious problem arises: the identification of false positives. Therefore, an algorithm will be tested at different known methane emission points to identify outliers using additional information obtained from other spectral bands from the same satellites, to determine whether it is feasible to continue research in this direction for improving methane detection.

RESUM EXECUTIU

La memòria del TFG del Grau en Enginyeria de Tecnologies i Servicis de Telecomunicació ha de desenrotllar en el text els següents conceptes, degudament justificats i discutits, centrats en l'àmbit de l'enginyeria de telecomunicació

CONCEPT (ABET)	Fet? (S/N)	On? (números de pàgina)
1. IDENTIFICAR:		
1.1. Declaració del problema i oportunitat	S	2-9
1.2. Restriccions (normes, codis, necessitats, requisits i especificacions)	S	8-11, 14-23
1.3. Establiment d'objectius	S	12-14
2. FORMULAR:		
2.1. Generació creativa de solucions (anàlisi)	S	34-35
2.2. Avaluació de múltiples solucions i presa de decisions (síntesi)	S	24-32, 35-44
3. RESOLDRE:		
3.1. Compliment dels objectius	S	48
3.2. Impacte general i significació (contribucions i recomanacions pràctiques)	S	46-47

A mon pare, a ma mare, al meu germà per recolzar-me i aguantar-me aquests mesos de TFG i anys de carrera.

En especial, al meu co-tutor Javier Gorroño, Xavi, per ajudar-me en cada pas d'aquest treball, per comprendre'm i introduir-me de la millor manera el món de la investigació.

I, en general, a tots aquells i aquelles; amics, mestres, companys... que han fet açò possible.

Gràcies per tot.



Table of contents

Contenido

Secció 1.	Introducció	1
1.1	Gasos d'efecte hivernacle i canvi climàtic	1
1.1.1	Gasos d'efecte hivernacle.....	2
1.1.2	Fonts i embornals de metà:.....	3
1.1.3	Mitigació de les emissions de metà.....	6
	Beneficis de la Mitigació.....	6
	Costos i Eficiència de la Mitigació.....	7
1.2	Seguiment del metà des de satèl·lits	7
1.2.1	Flux Mappers vs. Point Source Images	8
1.2.2	Point Source Missions: Una Mirada Detallada	8
1.3	Copernicus Sentinel 2 mission and methane retrieval.....	9
1.3.1	Descripció de la Missió Sentinel-2 per al Metà.....	9
1.3.2	Methane Enhancement Retrieval (o increment de concentració de metà) per al satèl·lit Sentinel-2	10
1.4	Motivació	12
1.5	Objectius	13
Secció 2.	Metodologia per a la generació de mapes d'increment de concentració de metà	14
2.1	Diagrama de fluxe per generar mapes d'increment de concentració de metà	14
2.2	UNEP IMEO plume viewer	14
2.3	EO browser.....	15
2.4	S2 methane GEE software.....	17
2.4.1	Selecció dels productes de Google Earth Engine (GEE).....	18
2.4.2	Algoritme de obtenció de metà: s2methanetemporal_gee.....	19
2.4.3	Paràmetres de configuració d'entrada	21
Secció 3.	Llocs d'estudi i resultats de <i>methane enhancement</i>	24
3.1	Algèria.....	25
3.2	Turkmenistan1.....	26
3.3	Turkmenistan2.....	27
3.4	Rússia	28
3.5	Bahrain	29
3.6	Egipte	30



3.7	USA.....	31
3.8	Mexico1.....	32
3.9	Mexico2.....	33
Secció 4.	L'ús d'informació auxiliar per a la detecció de falsos positius	34
4.1	Extracció d'informació auxiliar	34
4.2	Detecció de falsos positius	34
4.3	Resultats de falsos positius.....	36
4.3.1	Algèria.....	37
4.3.2	Turkmenistan1.....	38
4.3.3	Turkmenistan2.....	39
4.3.4	Russia	40
4.3.5	Bahrain	41
4.3.6	Egypt	42
4.3.7	USA.....	43
4.3.8	Mexico1.....	44
4.3.9	Mexico2.....	45
Secció 5.	Discussió sobre l'anàlisi de falsos positius per a la detecció de fuites de metà... 46	
Secció 6.	Conclusions	48
6.1	Bibliografia	48
FIGURA 2-1:	DIAGRAMA DE FLUXE COMPOSAT DE DIFERENTS SUBSECCIONS QUE EXPLIQUEN CADA PAS A AQUEST	14
FIGURA 3-1:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	25
FIGURA 3-2:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	26
FIGURA 3-3:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	27
FIGURA 3-4:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	28
FIGURA 3-5:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	29
FIGURA 3-6:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	30
FIGURA 3-7:	(A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	31



FIGURA 3-8: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	32
FIGURA 3-9: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT. AMBDUES IMATGES OBTINGUDES AMB TRANSFORMACIONS MITJANÇANT SOFTWARE A PARTIR DE LA INFORMACIÓ, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	33
FIGURA 4-1: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	37
FIGURA 4-2: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	38
FIGURA 4-3: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	39
FIGURA 4-4: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	40
FIGURA 4-5: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	41
FIGURA 4-6: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	42
FIGURA 4-7: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	43
FIGURA 4-8: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	44
FIGURA 4-9: (A) IMATGE DEL TERRENY AMB BANDES RGB, (B) PLOMA RESULTANT DEL SOFTWARE INICIAL, (C) MÀSCARA D'OUTLIERS DEL SOFTWARE AMB INFORMACIÓ AUXILIAR. LES 3 IMATGES OBTINGUDES, DEL MATEIX LLOC I INSTANT, AMB INFORMACIÓ PROPORCIONADA PEL SATÈL·LIT COPERNICUS SENTINEL-2.	45

TAULA 1 ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Secció 1. Introducció

1.1 Gasos d'efecte hivernacle i canvi climàtic

Els gasos d'efecte hivernacle (GEH) són components atmosfèrics que, tot i estar presents en xicotetes quantitats, tenen un paper crucial en l'escalfament global. Aquests gasos absorbeixen i emeten radiació infrarroja, creant un efecte d'hivernacle que reté la calor a l'atmosfera terrestre. Les concentracions d'aquests gasos produïxen una sèrie de complexos canvis que estan afectant actualment els sistemes meteorològics i climàtics del nostre planeta, els quals han rebut el terme de canvi climàtic. Aquest engloba no sols l'augment de les temperatures mitjanes, que coneixem com a escalfament global, sinó també els fenòmens meteorològics extrems, els canvis en les poblacions i hàbitats de la fauna i flora silvestres, la pujada del nivell de la mar i molts altres efectes [1].

El canvi climàtic està provocant transformacions profundes a nivell global, afectant la biodiversitat, els ecosistemes, els patrons climàtics i la salut humana. Els processos fonamentals per a la vida es veuen alterats, compromentent la supervivència de moltes espècies i afavorint la proliferació d'espècies invasores que desplacen les autòctones. Els ecosistemes marins, com els esculls de corall, i terrestres, com les glaceres, estan patint un deteriorament significatiu, concretament, el desglaç d'aquestes últimes està contribuint a l'augment del nivell del mar, la qual cosa posa en risc les zones costaneres i intensifica la desertificació en regions vulnerables. Mentre que els incendis forestals es tornen més freqüents i intensos a causa de la sequera i l'augment de les temperatures globals constants [2]. Aquest últim efecte s'il·lustra a la Figura 1-1 on es pot apreciar l'augment sostingut durant els últims 80 anys de la temperatura fins assolir increments superiors al grau de temperatura.

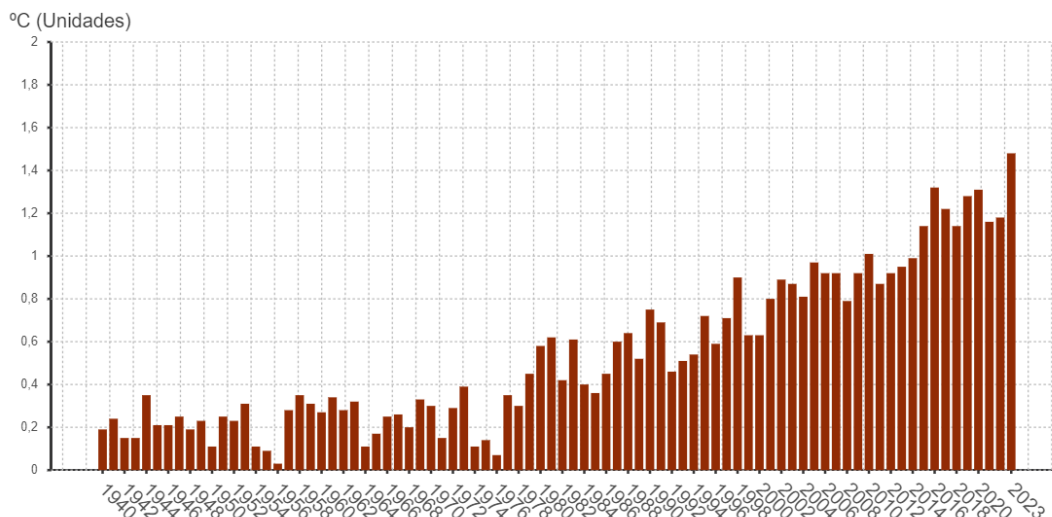


Figura 1-1: Augment de la temperatura mundial en superfície sobre els nivells del 1900. Extret de [1].

1.1.1 Gasos d'efecte hivernacle

Els clars problemes, cada vegada més greus, del canvi climàtic han fet la comunitat científica buscar les seues causes per tal de reduir-ne les conseqüències. Així, s'ha estudiat el paper dels gasos d'efecte hivernacle que més contribueixen a aquest fenomen per tal de valorar una reducció d'emissions d'aquests a fi de previndre unes majors conseqüències de l'escalfament global.

El diòxid de carboni (CO_2) és el gas d'efecte hivernacle més conegut i abundant a causa de les emissions massives derivades de l'activitat humana, principalment de la combustió de combustibles fòssils (com el carbó, el petroli i el gas natural) i la desforestació. Des de l'inici de la revolució industrial, la concentració de CO_2 en l'atmosfera ha augmentat significativament, passant de 280 parts per milió (ppm) al voltant de l'any 1750 a més de 410 ppm en l'actualitat. Aquesta pujada en la concentració de CO_2 s'ha correlacionat directament amb un increment de la temperatura global, com a conseqüència de l'increment en la radiació atrapada per l'atmosfera, la qual cosa contribueix a l'escalfament global i als canvis climàtics associats [2].

Per altra banda, l'òxid nítrós (N_2O), tot i ser menys mencionat, també és un potent gas d'efecte hivernacle, amb un potencial d'escalfament global unes 300 vegades superior al del CO_2 en un període de 100 anys. Aquest gas es genera principalment a partir de l'ús de fertilitzants nitrogenats en l'agricultura, així com per processos industrials i la crema de biomassa. El N_2O , a més de contribuir a l'escalfament global, també és un destructor de l'ozó estratosfèric, la qual cosa augmenta la seua rellevància en el context del canvi climàtic [2].

Finalment, el metà (CH_4) és un altre gas d'efecte hivernacle potent, amb una capacitat d'escalfament per molècula molt superior al CO_2 . Tot i que les seues concentracions són menors, el seu potencial d'escalfament global (GWP; de l'anglès *Global Warming Potential*) a 100 anys és aproximadament 28 vegades més gran que el del CO_2 . Això es tradueix en què el CH_4 contribueix al voltant del 23% de la força radiativa addicional acumulada en l'atmosfera des de l'època preindustrial [2].

La concentració de metà a l'atmosfera ha augmentat ràpidament en les últimes dècades, en part degut a activitats humanes com l'explotació de combustibles fòssils, l'agricultura i la gestió de residus. Com es pot observar a la Figura 1-2, les concentracions atmosfèriques creixen anualment i han arribat a les 1917 parts per bilió (ppb) el 2022, una xifra aproximadament 2,6 vegades superior a la del valor preindustrial de 1750. Aquesta trajectòria d'emissions actuals de CH_4 es troba en línia amb els escenaris més càlids projectats per l'IPCC (Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic), que prediuen increments de temperatura superiors als 3°C per a finals d'aquest segle si no es prenen mesures dràstiques de reducció. I, com s'ha vist abans, tot i representar una fracció menor de les emissions globals en termes de massa, és responsable de quasi un terç de l'escalfament actual, pel que qualsevol mena d'augment representa un important impacte al medi ambient. És per açò que es subratlla la importància de prendre mesures immediates per mitigar les seues emissions i estabilitzar el clima global [2].

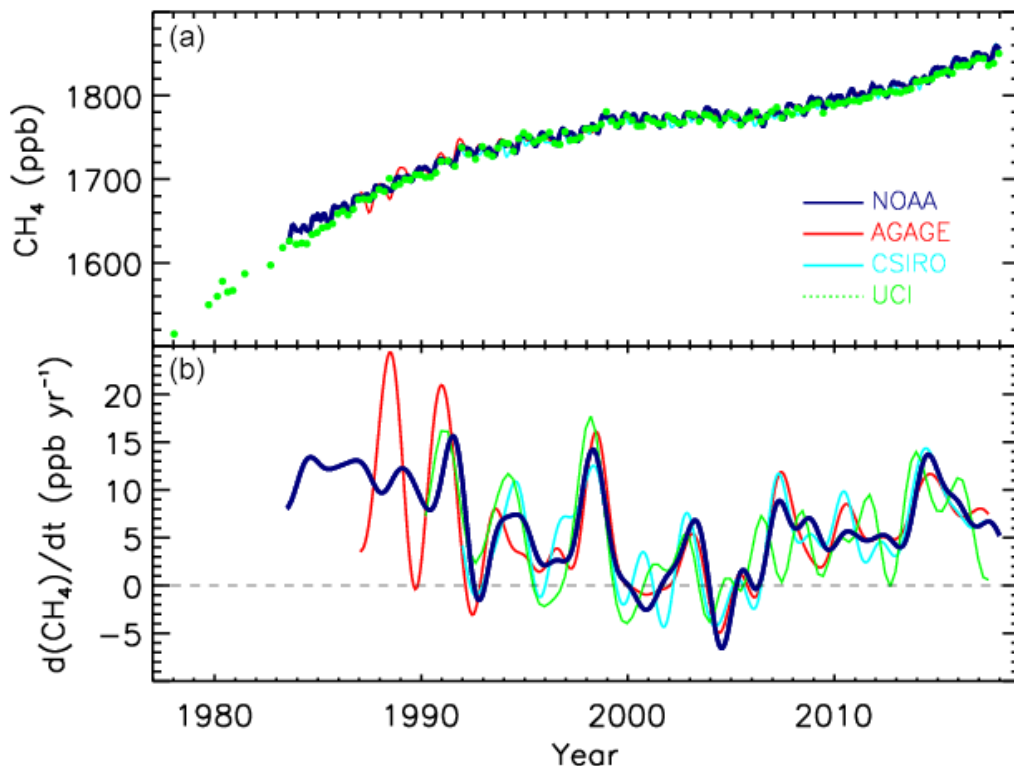


Figura 1-2: CH_4 atmosfèric mig mundial (ppb) (a) i la seua taxa de creixement anual GATM (ppb yr^{-1}) (b) a partir de quatre programes de mesurament, Administració Nacional Oceànica i Atmosfèrica (NOAA), Experiment Avançat de Gasos Atmosfèrics Mundials (AGAGE), Organització d'Investigació Científica i Industrial de la Commonwealth (CSIRO) i Universitat de Califòrnia, Irvine (UCI). Extret de [3]

1.1.2 Fonts i embornals de metà:

L'origen d'aquestes emissions de metà és molt variat i es poden subdividir en diferents grups com la crema de biomassa i biocombustibles, les zones humides, els sectors de l'agricultura i residus i els combustibles fòssils.

La Figura 1-3 mostra la distribució espacial de les emissions pels sectors abans esmentats i que tot seguit detallem individualment.

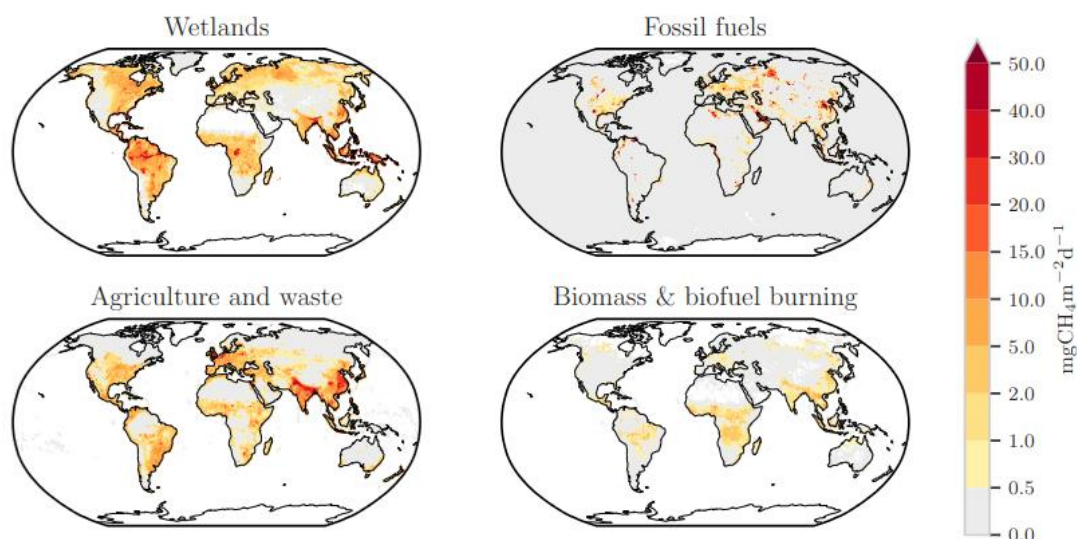


Figura 1-1: Distribució espacial de les emissions de metà procedents de l'agricultura i la manipulació de residus, combustibles fòssils, zones humides i crema de biomassa i biocombustible. Proporcionats per CEDS, EDGARv4.3.2 i GAINS durant el decenni 2008-2017. Extret de [3].

1.1.2.1 Crema de biomassa i biocombustibles

Aquesta categoria inclou les emissions de metà que resulten de la crema de biomassa en diversos ecosistemes com boscos, sabanes, pasturatges, torberes i residus agrícoles, així com de la crema de biocombustibles en llars, estufes i calderes. Aquestes activitats emeten metà quan la combustió és incompleta, és a dir, quan no hi ha prou oxigen per a una combustió total. Això es pot observar en processos com la fabricació de carbó vegetal i focs amb molta fumera. La quantitat de metà que es produeix durant la crema de biomassa depèn en gran mesura de la quantitat de biomassa cremada, les condicions específiques de la combustió i el tipus de material que es crema.

Globalment, durant el període 2008-2017, la crema de biomassa i biocombustibles va generar entre 26 i 40 Tg de CH₄ per any, amb una mitjana de 30 Tg CH₄ per any. D'aquest total, entre el 30% i el 50% prové de la crema de biocombustibles [3].¹

1.1.2.2 Zones humides

Les zones humides es defineixen generalment com a ecosistemes on els sòls estan saturats d'aigua o on la inundació és superficial (ja siga permanent o no) influeix en la biogeoquímica del sòl i determina la composició d'espècies de l'ecosistema. Considerant, en general, com a tals a aquells ecosistemes amb sòls o torberes inundades o saturades on les condicions anaeròbiques generen producció de metà. Aquesta definició inclou torberes, zones humides de sòls minerals (com aiguamolls i maresmes) i planes inundables estacionals o permanents. Els tres factors més importants que influeixen en la producció de metà a aquestes zones són l'extensió espacial i temporal de l'anòxia (lligada a la saturació d'aigua), la temperatura i la disponibilitat de substrat.

El flux global d'emissions de metà procedent de les zones humides naturals es va estimar en un rang de 101 a 179 Tg CH₄ per any per al període 2000–2017, amb una mitjana de 148 Tg CH₄ per any i una desviació estàndard d'un sigma de 25 Tg CH₄ per any. Durant l'última dècada, de 2008

¹ Tg CH₄: Teragrams (una unitat de mesura equivalent a un bilió de grams) del metà (CH₄).

² Tg CH₄ any⁻¹: Teragrammes de metà per any.

a 2017, les emissions mitjanes es van situar en 149 Tg CH₄ per any, amb un rang de 102 a 182 Tg CH₄ per any. Les emissions de les zones humides representen al voltant del 20% de les fonts totals (naturals i antropogèniques) de metà estimades mitjançant aproximacions de tipus bottom-up. La gran variabilitat en les estimacions de les emissions de CH₄ a aquestes zones s'atribueix a les dificultats en la definició de les àrees productores de metà i en la parametrització de les condicions anaeròbiques terrestres que impulsen les fonts [3].

1.1.2.3 *Sectors de l'agricultura i residus*

Les emissions de metà a nivell mundial estan principalment relacionades amb la producció ramadera, el cultiu d'arròs, els abocadors i la manipulació d'aigües residuals. La ramaderia és, amb diferència, la major font de metà (CH₄), especialment a causa de la fermentació entèrica dels remugants, on es produeix metà durant la digestió anaeròbica, i la gestió del fem en condicions anaeròbiques. En el cultiu d'arròs, especialment en camps inundats, la falta d'oxigen al sòl afavoreix la producció de metà per part de microorganismes metanogènics. D'altra banda, al sector dels residus, el metà s'origina principalment durant la descomposició de la matèria orgànica en abocadors i el tractament d'aigües residuals en condicions anaeròbiques. Els residus sòlids, com aliments, fulles i fusta, quan es descomponen sense presència d'oxigen, generen metà, i les aigües residuals amb alt contingut orgànic tractades de manera anaeròbica contribueixen de manera significativa a aquestes emissions.

S'estima que les emissions globals procedents de l'agricultura i els residus en el període 2008-2017 ascendixen a 206 Tg CH₄ any⁻¹, la qual cosa representa el 56% de les emissions antropogèniques totals [3].

1.1.2.4 *Combustibles fòssils*

La major part de les emissions de metà d'origen antropogènic relacionades amb els combustibles fòssils prové de l'explotació, transport i ús del carbó, petroli i gas natural. També s'inclouen emissions menors d'indústries com la producció de químics i metalls, incendis en combustibles fòssils i el transport. Les emissions del refinament de petroli i la producció de carbó vegetal són estimades en pocs teragrammes de metà anuals i es comptabilitzen dins del sector de la indústria de transformació en els inventaris. Les emissions globals mitjanes d'activitats relacionades amb els combustibles fòssils, altres indústries i el transport es calculen en 128 Tg CH₄ per any, representant aproximadament el 35% del total d'emissions antropogèniques globals, amb una variació entre els inventaris de dades [3].

Mineria de carbó

La mineria del carbó emet metà pels pous de ventilació i les operacions de desguàs. Als països de l'OCDE, el metà s'utilitza com a combustible, però en uns altres es continua emetent a l'atmosfera. Els principals països productors de carbó són la Xina, els Estats Units i l'Índia, que contribueixen a les emissions mundials, però aquestes varien a causa de factors com el tipus i la qualitat de l'extracció de carbó.

Aquesta activitat va representar el 33% de les emissions de metà procedents de combustibles fòssils entre 2008 i 2017. Això va suposar un total de 42 Tg de metà a l'any. Una altra xicoteta font van ser els incendis de combustibles fòssils, com els incendis subterranis de carbó, que van emetre aproximadament 0,15 Tg a l'any en 2012 [3].

Sistemes de petroli i gas natural

Aquest tipus d'emissions inclouen aquelles que resulten derivades de l'extracció de petroli i gas convencional. El metà, un dels principals components del gas natural, s'emet en diverses etapes, com la perforació, l'extracció, el transport, l'emmagatzematge, la distribució i la combustió. Tot i que els factors d'emissió continuen sent objecte de debat, alguns estudis recents suggereixen que les taxes d'emissió són similars a les del gas convencional. Les emissions de metà dels sistemes de petroli i gas natural varien notablement entre els diferents inventaris mundials, que utilitzen les mateixes fonts de dades d'activitat, però divergeixen en metodologies i paràmetres com els factors d'emissió. Aquests factors són específics de cada país o emplaçament i sovint són desconeguts en els principals països productors de petroli i gas. A més, les taxes de recuperació de gas natural durant l'extracció de petroli també varien segons el país i el tipus de petroli, cosa que afecta significativament les emissions de metà. Diversos estudis indiquen que les emissions de metà de la indústria del petroli i el gas estan subestimades en els inventaris i per les agències responsables, siguent un factor clau en les instal·lacions amb altes emissions. De totes maneres, a mesura que augmenta la producció de petroli i gas natural, s'espera que les emissions de metà també augmenten, i es preveu que aquests sectors representen una part significativa del total d'emissions de metà fòssil.

D'altra banda, tot i que no representen la major font d'emissió de metà total, a la dècada 2008-2017, es calcula que les emissions procedents dels sectors del petroli i el gas natural ascendents i descendents representen aproximadament el 63% de les emissions de metà fòssil ($80 \text{ Tg CH}_4 \text{ any}^{-1}$) [3].

1.1.3 Mitigació de les emissions de metà

Les accions específiques orientades a la reducció del metà són imprescindibles per limitar l'escalfament global en aquest segle. A més, aquestes accions tenen el potencial de generar beneficis significatius i immediats per a la salut i l'economia global.

Així, mitigar les emissions de metà és una de les estratègies més efectives i assequibles per aconseguir una reducció ràpida en la taxa d'escalfament global, alhora que contribueix a la salut pública i a la seguretat alimentària mundial. D'aquesta manera, les oportunitats més substancials per reduir les emissions de metà es divideixen en tres sectors principals:

- **Sector de combustibles fòssils:** Les emissions es poden reduir significativament implementant mesures disponibles actualment per millorar l'eficiència en la captura i distribució del metà.
- **Sector dels residus:** Les emissions de metà dels abocadors i les aigües residuals representen aproximadament el 20% de les emissions antropogèniques globals, i es poden mitigar amb tecnologies de gestió de residus més eficients.
- **Sector de l'agricultura:** La gestió millorada del fem i la fermentació entèrica dels remugants ofereixen oportunitats per reduir les emissions de metà [4].

Beneficis de la Mitigació

Mitigar les emissions de metà no només ajuda a limitar l'escalfament global, sinó que també ofereix beneficis immediats per a la salut pública i l'agricultura:

- **Salut pública:** Reduir el metà pot evitar unes 255,000 morts prematures anuals i disminuir el nombre de visites hospitalàries relacionades amb l'asma.

- **Agricultura:** La reducció de les concentracions d'ozó a nivell de terra, associada amb una menor emissió de metà per la seua curta vida atmosfèrica, podria augmentar el rendiment dels cultius en 26 milions de tones per any a nivell mundial [4].

Costos i Eficiència de la Mitigació

Moltes de les mesures per reduir el metà es poden implementar a un cost baix o fins i tot amb cost negatiu, especialment en el sector dels combustibles fòssils on el metà capturat pot generar ingressos addicionals en lloc de ser alliberat a l'atmosfera. Per a aconseguir els objectius que permeten mantindre l'augment de la temperatura global en 1,5°C, fa falta una combinació de mesures dirigides específicament a reduir el metà i altres accions.

A aquest projecte ens centrarem en la reducció de les emissions de metà procedents de combustibles fòssils: Aquest sector oferix el major potencial per a la reducció dirigida de metà abans del 2030. Fins al 80% de les accions en els sectors del petroli i el gas podrien executar-se amb costos baixos o, inclús, generar beneficis. Açò es justifica perquè, tot i no tractar-se de les fonts d'emissions de metà més destacables a nivell global, són molt més senzilles de reduir que qualsevol altra font d'emissió ja que no comprometen l'alimentació mundial, ni la fauna i flora existents (com sí ho fan l'agricultura i els aiguamolls), i per tampoc suposar la reducció de crema de biocombustible, que resulta una alternativa millor, en termes d'emissió total de gasos d'efecte hivernacle (incloent CO₂ i N₂O) a la crema de combustibles fòssils) [4].

1.2 Seguiment del metà des de satèl·lits

Els satèl·lits són una eina clau en la monitorització de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, com el metà, gràcies a la seua capacitat per oferir observacions globals i sistemàtiques. A nivell tècnic, els satèl·lits equipats amb sensors hiperespectrals i multispectrals capturen dades a través de diferents bandes de l'espectre electromagnètic, la qual cosa permet la detecció de concentracions específiques de metà a l'atmosfera.

Aquest tipus de sensors funcionen captant la radiació solar reflectida i la radiació tèrmica emesa per la superfície terrestre i l'atmosfera. La informació obtinguda es descompon en diferents longituds d'ona que, combinades amb models atmosfèrics, permeten inferir la presència i concentració de metà. Els instruments hiperespectrals, en particular, són capaços de capturar un gran nombre de bandes espectrals estretes, oferint una alta resolució espectral que és essencial per a distingir el metà d'altres gasos presents a l'atmosfera i del senyal de la superfície. A més, els satèl·lits operen en òrbites polars o geostacionàries, cadascuna amb avantatges específiques. Les òrbites polars permeten una cobertura global completa, ja que el satèl·lit passa sobre cada punt de la Terra en intervals regulars. Aquestes òrbites són ideals per emissions a gran escala, mentre que les òrbites geostacionàries permeten un monitoratge continu d'una mateixa regió, sent útils per a l'estudi de fonts d'emissió més localitzades, i per a la detecció de variacions temporals en les emissions [5].

Així, hi ha diferents mètodes per a monitoritzar aquestes emissions des de l'espai, entre els quals es troben els "Flux Mappers" i els "Point Source Imagers", cadascun dissenyat per a objectius específics [5].

1.2.1 *Flux Mappers vs. Point Source Images*

Els "Flux Mappers" són instruments dissenyats per a quantificar les emissions totals de metà en escales regionals o globals. Aquests instruments capturen dades en una resolució espacial que varia entre 0.1 i 10 km per píxel, pel que el seu ús principal és per a elaborar mapes detallats de les emissions a gran escala, fet que resulta clau per a informes nacionals i per a la supervisió de zones de producció de petroli i gas [5].

D'altra banda, els "Point Source Imagers" estan dissenyats per a quantificar les emissions procedents de fonts puntuals individuals, com instal·lacions industrials o fuites en infraestructures de gas. Aquests instruments utilitzen píxels molt més petits, generalment menys de 60 metres, per a capturar imatges de les columnes de metà que s'eleva des de les fonts puntuals. A diferència dels "Flux Mappers", els "Point Source Imagers" tenen una resolució espacial molt més alta, però una menor precisió general, i estan orientats a la detecció i quantificació de fonts d'emissió molt localitzades [5].

1.2.2 *Point Source Missions: Una Mirada Detallada*

Les "Point Source Missions" són crucials per a la identificació i quantificació d'emissions procedents de fonts puntuals, incloent-hi les conegudes com a "super-emissors", que són fonts amb emissions excepcionalment altes. La detecció i el seguiment d'aquestes fonts és fonamental, ja que permeten accions correctives ràpides i poden revelar emissions que anteriorment no eren conegudes.

Un dels desafiaments principals en la detecció de fonts puntuals des de satèl·lits és la necessitat d'una alta resolució espacial per a poder captar les columnes de gas, que a vegades tenen menys d'1 km d'amplària. Els sensors hiperspectrals, com el PRISMA i altres de similar disseny, han demostrat ser capaços de quantificar aquestes emissions amb una precisió acceptable, arribant a detectar fonts d'emissions amb fluxes per davall de 500 kg/h [5].

A més, l'ús de tècniques de balanç de massa i d'altres mètodes avançats permeten inferir la quantitat d'emissions d'una font a partir de l'observació de la columna de metà que genera, resultant molt interessant per la seua quantificació. Aquests mètodes, com el "Cross-Sectional Flux" (CSF) i el "Integrated Mass Enhancement" (IME), utilitzen dades sobre la velocitat del vent i la concentració de metà per a calcular la taxa d'emissió de la font observada. La precisió en aquests càlculs pot variar (especialment en funció de la velocitat del vent), però a mesura que es desenvolupen noves missions satel·litals, com GHGSat i Carbon Mapper, la capacitat per a monitoritzar aquestes fonts puntuals millora considerablement. Aquestes missions permeten un seguiment més freqüent i detallat, augmentant la comprensió de les emissions de metà, especialment en zones amb fonts d'emissió intermitents, com els camps de producció de petroli i gas [5].



Figura 1-2: Instruments de satèl·lit per a l'observació del metà en l'infraroig d'ona curta (SWIR). Els flux mappers d'àrea estan dissenyats per a quantificar les emissions totals de metà a escala regional i mundial. Els generadors d'imatges de fonts puntuals estan dissenyats per a quantificar les emissions de fonts puntuals individuals generant imatges dels plomalls atmosfèrics. Extret de [5].

1.3 Copernicus Sentinel 2 mission and methane retrieval

1.3.1 Descripció de la Missió Sentinel-2 per al Metà

La missió Sentinel-2, com a part del programa europeu Copernicus, està dissenyada per proporcionar observacions òptiques multispectrals d'alta resolució espacial sobre superfícies terrestres globals. Els dos satèl·lits de Sentinel-2 (Sentinel-2A i Sentinel-2B) treballen conjuntament per oferir una cobertura global i contínua amb una resolució espacial de fins 20 metres i un temps de revisita de dos a cinc dies, depenent de la latitud, com es mostra a la Figura 1-5. Aquesta capacitat fa de Sentinel-2 una eina essencial per al monitoratge ambiental, així com per a la gestió del risc i la cartografia terrestre [6].

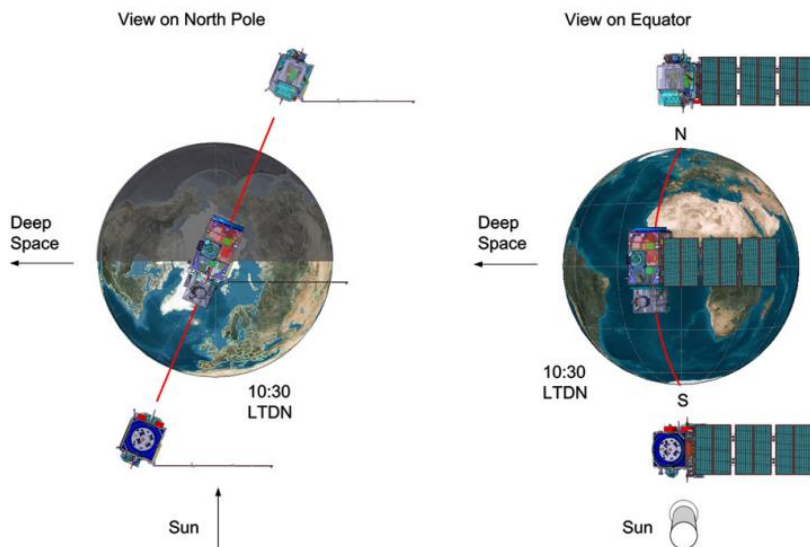


Figura 1-3: Configuració orbital del satèl·lit Sentinel-2 (Astrium-GmbH). Extret de [6].

No obstant açò, tot i que la missió no es va dissenyar específicament per a la detecció de metà, recentment s'ha demostrat la seua capacitat per detectar i quantificar fonts puntuals de metà anòmales, aprofitant diverses bandes espectrals que es capaç de detectar l'instrument principal de la missió, el **MultiSpectral Instrument (MSI)**. Aquest cobreix 13 bandes que van des del visible i el infraroig proper (VNIR) fins a l'infraroig de longitud d'ona curta (SWIR). Aquestes últimes, concretament les bandes 11 (1560–1660 nm) i 12 (2090–2290 nm) cobreixen rangs espectrals on el metà té característiques d'absorció significatives, com pot vore's a la Figura 1-7. Tot i açò, la resolució espectral de l'MSI és massa baixa per a una recuperació tradicional de concentracions de columna de metà, així que s'han desenvolupat tècniques específiques per derivar aquestes concentracions a partir de les diferències de reflectància entre les dues bandes i entre diverses passades del satèl·lit [7].

1.3.2 Methane Enhancement Retrieval (o increment de concentració de metà) per al satèl·lit Sentinel-2

El **Methane Enhancement Retrieval** utilitza les dades de les bandes 11 i 12 del Sentinel-2 per estimar les concentracions de metà en l'atmosfera. Aquests mètodes es basen en la comparació de reflectàncies entre les dues bandes en un mateix moment (multi-band–single-pass, MBSP) o entre diverses passades (single-band–multi-pass, SBMP). El mètode més eficaç és el **multi-band–multi-pass (MBMP)**, que combina ambdues tècniques per minimitzar errors sistemàtics i millorar la precisió del *methane enhancement retrieval*. Així mateix, s'han hagut de desenvolupar mètodes per simular dades de plomes de metà similars a les que s'obtidrien amb el Sentinel-2, utilitzant models com el Weather and Research Forecasting Model en mode de simulació de remolins grans (WRF-LES), per generar distribucions tridimensionals de massa de metà a l'atmosfera, que després es resamplegen per adaptar-se a la resolució espacial de 20 metres de Sentinel-2. Tot açò per fer possible la validació dels algorismes de *methane retrieval* que posteriorment s'utilitzen per detectar plomes reals. Així, el Sentinel-2 disposa d'una capacitat única per obtenir una resolució espacial de fins a 20 metres per píxel en les bandes SWIR, el que és suficient per identificar fonts puntuals d'emissió de metà, com ara fuites en infraestructures de gas i petroli, amb una precisió que oscil·la entre el 30% i el 90% en superfícies favorables [6].

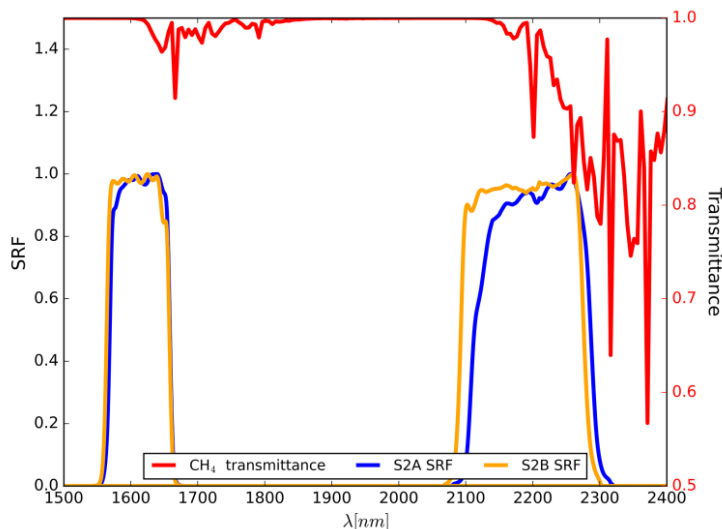


Figura 1-4: Funcions de resposta espectral (SRF) S2A i S2B de les bandes B11 i B12 combinades amb la transmissió del metà per a una concentració superficial de 1904 ppm i un factor de massa d'aire de 2. Extret de [7].

No obstant, cal destacar que el tipus de terreny té un paper fonamental en la detecció de plomes de metà, cosa que explica que el límit mínim de detecció a superfícies homogènies i invariables en el temps és d'uns 1000 kg/h, mentre que en àrees amb una gran heterogeneïtat de la superfície i variacions temporals, el límit augmenta considerablement, superant els 5000 kg/h. Altra font d'incertesa que cal mencionar a part del tipus de terreny és la velocitat efectiva del vent, però aquesta està més relacionada amb la quantificació de fluxos de metà que en la detecció, pel que cal millorar primer els relacionats amb el terreny [7].

La Figura 1-8 ens mostra un exemple del mapa de *methane enhancement retrieval* de metà a Algèria, a les coordenades latitud i longitud (31.7706, 6.0033), on, a banda de una emissió de metà al centre de la imatge, també trobem increments al voltant de carreteres o edificacions.

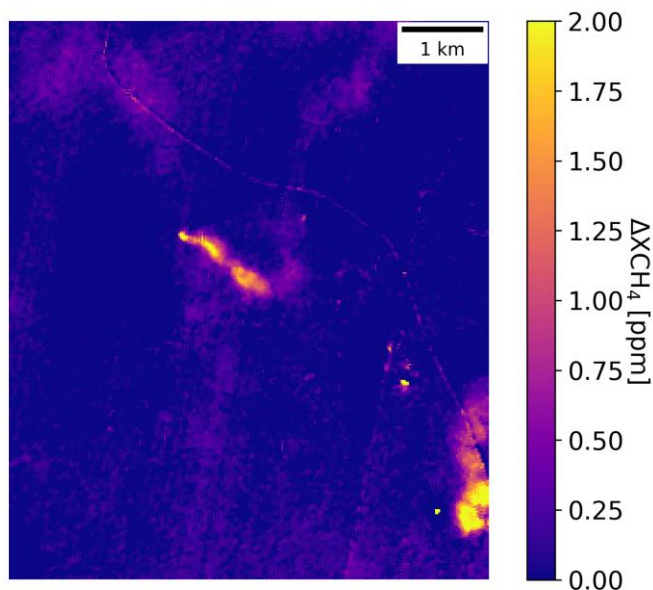


Figura 1-5: Mapa de increment de concentració de metà on es mostra una ploma de metà coneguda i real, amb coordenades (31.7706, 6.0033) i data 28-01-2024.

1.4 Motivació



Figura 1-6: Imatge real del terreny on es detecta de fuga de metà anterior (té la seua eixida al centre). Dades extretes de Google Earth ©.

Si comparem les dos figures anteriors, podem ser capaços d'identificar fàcilment la fuga de metà al centre de la Figura 1-8, ja que es marca el punt de l'eixida de metà, a la Figura 1-9 (que representa una imatge RGB de la zona anàloga al mapa mostrat), i a la zona corresponent no s'aprecia cap tipus d'anomalia terrenal. També és cert, però, que la detecció de metà no és exacta ja que, com es pot apreciar a la figura 1-8, apareix soroll que no és relacionable amb la forma que tindria una ploma de metà, així com es pot distingir la forma d'una carretera que hi passa prop i una zona edificada a la part de baix a la dreta, coincidint de manera posicional aquestes dos últimes deteccions completament amb la Figura 1-9, que mostra la imatge del terreny en la banda espectral de la visió humana. Açò són outliers que podem identificar amb zones concretes del terreny i que interessaria no obtindre a la imatge d'eixida, ja que només volem trobar les plomes de metà.

El que es pretén a aquest projecte es poder identificar de manera automàtica aquests *outliers* i, consegüentment, ajudar en la millora de la detecció d'aquestes fuites de metà en infraestructures de producció de petroli i gas (O&G). Com s'ha vist al punt 1.1.3, aquestes són les emissions de metà que menys costos presenten per ser reduïdes i qualsevol millora en la detecció de fuites tindria un impacte directe en la mitigació de les emissions de metà i, per extensió, els efectes del canvi climàtic.



1.5 Objectius

L'objectiu principal és desenvolupar un algoritme que detecte els *outliers* que volem evitar una vegada s'obtinga un mapa d'increment de concentració de metà. Això facilita una millor identificació de les plomes de metà.

Primerament es pretén desenvolupar un conjunt reduït de dades verificades per l'UNEP IMEO i l'EO Browser, procedent de la missió Sentinel-2, a distintes zones del planeta. Així es podran comparar les distintes zones a estudiar, tenint en compte les característiques del terreny.

A continuació, i fent servir la missió Sentinel-2, va a fer-se ús tant del mapa d'increment de concentració de metà que s'obtidria amb l'algoritme actual, com d'informació auxiliar que no s'utilitza directament per la detecció de plomes de metà. Esta informació consisteix en altres bandes espectrals que representen altres aspectes del terreny, com Digital Elevation Model (DEM), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Aerosol Optical Thickness (AOT), Enhanced Vegetation Index (EVI), Water Vapour (WV) i Scene Classification Layer (SCL). Així, es pretén desenvolupar un algoritme que obtinga una màscara que ens indique les zones potencials de falsos positius al mapa original d'increment de concentració de metà. Cal recalcar que es busca millorar la detecció de falsos positius, pel que es tractarà d'evitar la detecció de la ploma en la mesura que es puga.

Secció 2. Metodologia per a la generació de mapes d'increment de concentració de metà

2.1 Diagrama de fluxe per generar mapes d'increment de concentració de metà

La Figura 2-1 inclou un seguit de tasques que s'han executat per a generar cadascun dels mapes d'increment de concentració de metà, que s'expondran més avant.

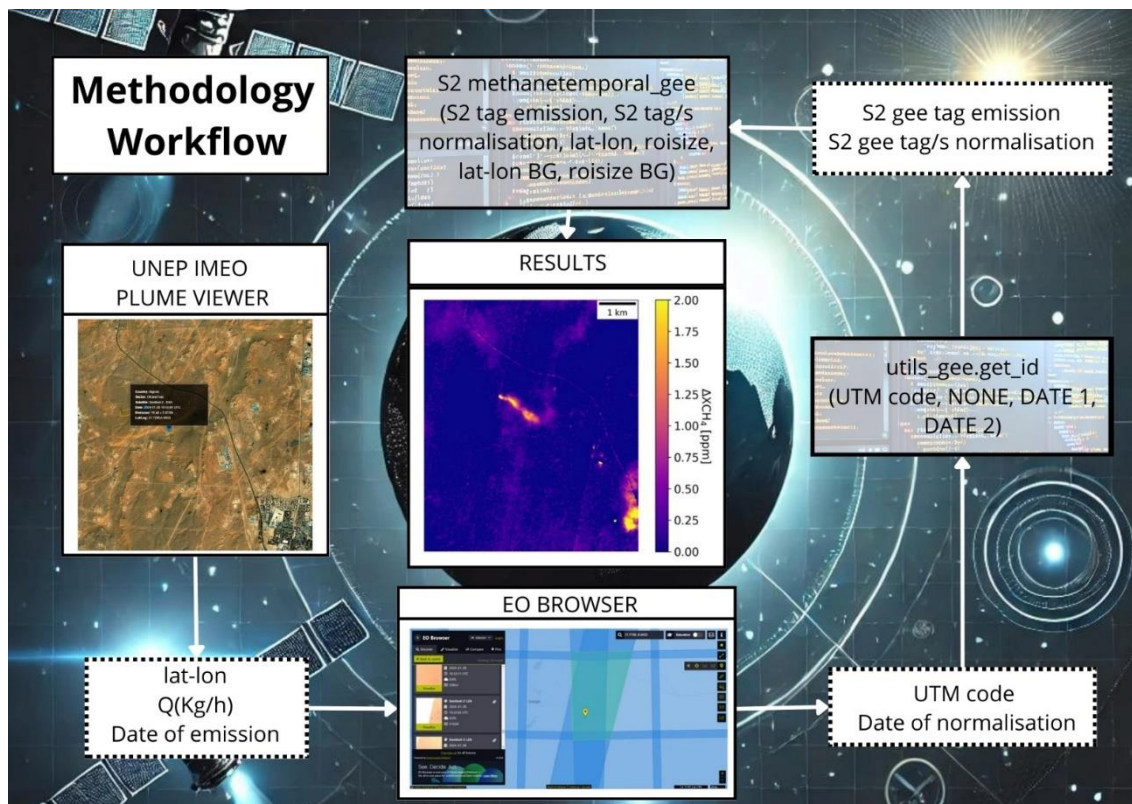


Figura 2-1: Diagrama de fluxe compost de diferents subseccions que expliquen cada pas a aquest.

2.2 UNEP IMEO plume viewer

El Programa de Medi Ambient de les Nacions Unides fa servir l'Observatori Internacional d'Emissions de Metà per proporcionar metadades a tots els usuaris que les requereixen. Ha d'esmentar-se el caràcter processable d'aquestes i la fiabilitat de les mateixes, ja que està finançada per 80 dels 193 estats membres de l'ONU [8].

D'aquesta manera, es disposa d'una ferramenta que basa les seues dades en les deteccions satel·litals de metà arreu del globus terraquí. A més, hi ha la possibilitat de conèixer el sector amb el que es relaciona la fuga de metà, la quantitat que hi va haver sortit en tones per hora (Q [t/h]), la posició exacta en latitud i longitud, el satèl·lit que la va haver detectada i el rang de dates en què es va haver produït [8]. Per tant, la ferrament UNEP IMEO plume viewer serà usada per seleccionar plomes de metà al voltant del món amb les característiques que desitgem per al nostre estudi, que són:

- Detectades pel satèl·lit Sentinel-2, de l'ESA
- Originades per infraestructures de producció de petroli i gas
- Més grans de 5 t/h de metà

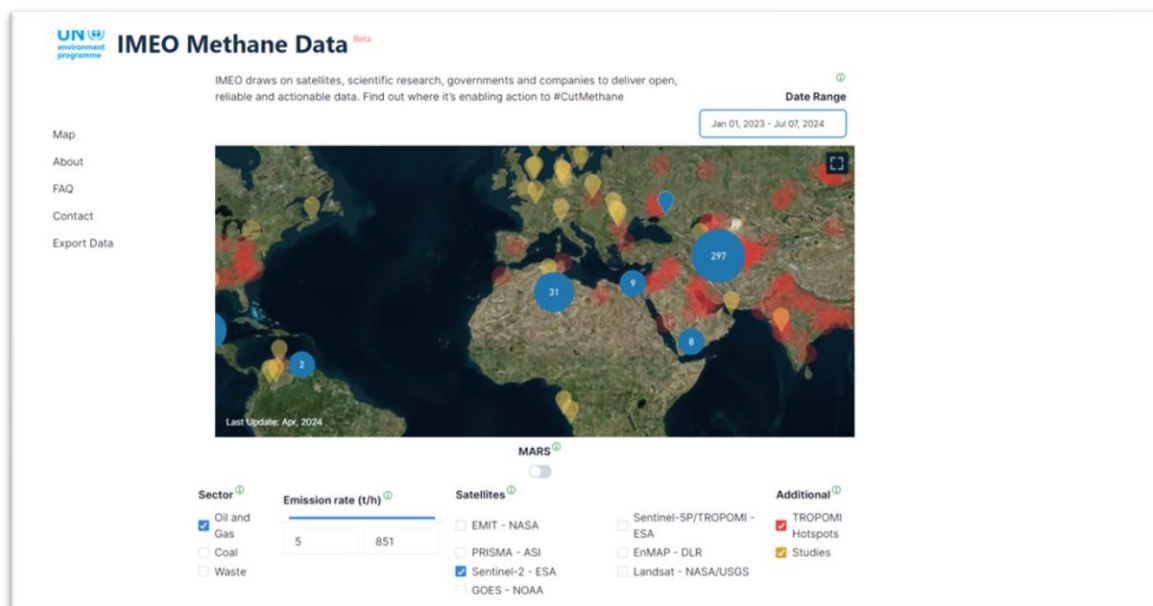


Figura 2-2: UNEP IMEO Methane Data amb les característiques esmentades. Extret de [8].

Així podem obtenir la latitud i longitud verificades per un organisme internacional de fuites de metà real i la data en que es van produir.

Per exemple, la Figura 2-3 inclou les dades que s'obtenen per a una fuita de metà en particular :



Figura 2-3: Dades obtingudes amb l'UNEP IMEO Methane Data

2.3 EO browser

EO Browser és una eina en línia desenvolupada per la companyia Sinergise que permet l'accés gratuït a una àmplia varietat de dades satel·litals, incloent imatges de les missions Sentinel (com Sentinel-2), Landsat i altres fonts de dades d'observació de la Terra. Aquesta eina permet als usuaris visualitzar, analitzar i descarregar imatges satel·litals de manera fàcil i ràpida. A més, ofereix una interfície intuïtiva on es poden aplicar diferents índexs espectrals, usant diferents bandes espectrals, entre elles la de "True Color" (que permet veure una imatge satel·lital baix el punt de vista d'un ull humà) i altres eines de processament d'imatges per obtenir informació detallada sobre regions específiques de la Terra [9].

Amb la latitud i longitud obtingudes anteriorment al UNEP IMEO Methane Data conjuntament amb la data precisa en què s'ha produït la emissió, s'ha de localitzar el producte, punt i dia exacte.

A continuació, s'ha de seleccionar el codi UTM (Universal Transverse Mercator) més encertat per poder visualitzar la zona en qüestió el millor possible. Aquest codi és un sistema de projecció cartogràfic basat en quadrícules amb el qual es poden referenciar punts sobre la superfície terrestre, als quals pertany el punt concret on hi ha un fuita de metà.

La Figura 2-4 mostra un exemple on s'ha seleccionat un punt i data per a obtenir el UTM concret. En aquest cas, per a la data d'emissió del 28 de gener de 2024 a la latitud i longitud (31.7706, 6.0033), el codi UTM seria 31SGR.

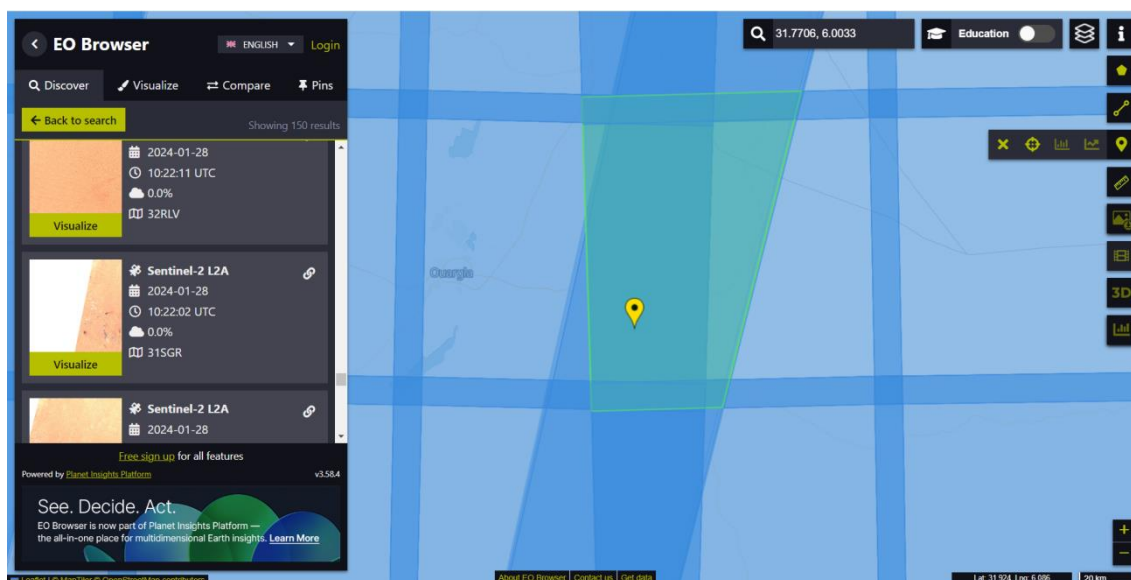


Figura 2-4: Selecció de l'UTM: 31SGR, en la data de la detecció de la fuita de metà trobada amb l'UNEP IMEO Methane Data, amb coordenades (31.7706, 6.0033) i data 2024-01-28

Es seleccionaran no sols el mateix dia de la emissió, sino diverses observacions posteriors i/o anteriors de Sentinel-2 al mateix lloc amb el mateix UTM. er a tots els resultats s'ha de comprovar que no hi haja massa nuvositat tant amb les metadades com amb una inspeccio visual. Finalment es seleccionen entre 2 i 4 observacions, a part del moment exacte de la fuita, per a un procés de normalització que descriurem en les pròximes subseccions.

A l'exemple que mostrem a la figura 2-4, corresponent amb la imatge de la Figura 2-5, on es pot veure la zona seleccionada a Algèria que es farà servir per a l'anàlisi de fuites de metà a causa de les seves característiques, es seleccionaran els següents rangs de temps:

2024-01-28 T10:13:01, 2024-01-28 T10:19:57

2024-01-26 T10:22:19, 2024-01-26 T10:28:31

2024-02-02 T10:11:39, 2024-02-02 T10:19:29

Tots pertanyents a l'UTM 31SGR i utilitzant-se el primer rang com a moment per detectar la fuga de metà i els dos següents per normalitzar el valor del fons.

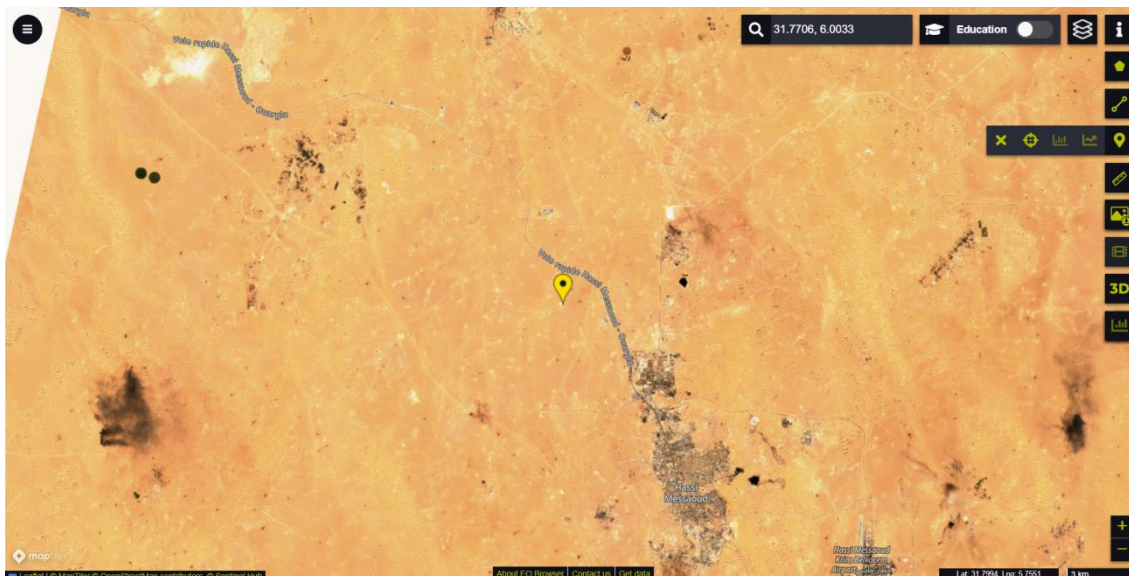


Figura 2-5: Punt del planeta real, on es va detectar la fuga de metà, que es capta desde el Sentinel-2 L2A en la data en qüestió i l'UTM seleccionat, es pot vore que hi ha un 0% de nuvositat.

2.4 S2 methane GEE software

Google Earth Engine (GEE) és una plataforma basada en el núvol dissenyada per a l'anàlisi geoespacial a escala planetària. Aprofita els recursos computacionals de Google per processar i analitzar grans conjunts de dades geoespacionals, fent-los accessibles no només als experts, sinó també a aquells sense experiència en computació d'alt rendiment. L'objectiu principal de GEE és abordar problemes globals crítics, com ara el monitoratge del clima, la desforestació i la gestió de desastres, simplificant l'accés a dades geoespacionals i a eines d'anàlisi. Aquest alberga un catàleg de dades multipetabyte que inclou conjunts de dades públicament disponibles, com ara imatges satel·litals (p. ex., Landsat, Sentinel), variables ambientals, previsions climàtiques i dades socioeconòmiques. Aquest catàleg s'actualitza contínuament i es pot accedir a ell juntament amb dades privades de l'usuari.

Aquesta ferramenta s'utilitza com a font principal de dades satel·litals i meteorològiques per a la detecció i quantificació de fugites de metà. El codi, que es presenta a continuació, fa ús de les col·leccions de dades de GEE per obtenir imatges de Sentinel-2, així com dades meteorològiques com la velocitat del vent (U10) de fonts com ERA5 o GEOS-FP, però aquest tindrà un valor per defecte tractant de simplificar la complexitat de l'algoritme a les posteriors proves [10].

Respecte al procés complet per estimar les emissions de metà a partir de dades obtingudes de la plataforma GEE i el software, aquests són els passos que es segueixen de forma resumida:

- 1. Preparació de l'entorn:**
 - Es necessita Python 3.x i es requereix autenticació a Google Earth Engine i la configuració inicial de l'entorn.
- 2. Obtenció dels Productes GEE:**
 - Abans d'executar el codi, és necessari seleccionar els productes de GEE (imatges de Sentinel-2) utilitzant la funció `get_eeids`.
 - Utilització d'EO Browser per visualitzar prèviament les passades dels satèl·lits i seleccionar les dates i regions adequades (prèviament seleccionades amb UNEP IMEO Methane Data).
- 3. Configuració dels Paràmetres:**

- Els paràmetres configurables es troben en el fitxer `config_param.py`. Aquests permeten ajustar el comportament de l'algoritme, sols s'ha variat el `plot_stretch` de (0,1) a (0,3) segons el requeriment del terreny, però (0,2) és el més adequat.
4. **Execució del Codi:**
- Es defineixen les coordenades i les mides de les regions d'interès (ROI) i de fons (background).
 - S'executa la classe `S2MethaneTemporalGee` per processar les dades i generar mapes d'increment de concentració de metà, fluxos de metà i la incertesa associada.
5. **Resultats:**
- Els resultats es guarden automàticament en format PNG i NetCDF a la carpeta `./results`.
 - Inclouen mapes d'increment de concentració de metà (com el mostrat a la Figura 1-8), màscares de plomes, i dades associades com el flux de metà i les condicions meteorològiques.

2.4.1 Selecció dels productes de Google Earth Engine (GEE)

La funció `get_geeids()` retorna una llista de productes de l'arxiu de GEE per a una determinada regió i interval de temps, que poden ser imatges de satèl·lits Landsat o Sentinel-2 (a aquest cas, Sentinel-2). És la primera part de tot el software que s'executa ja que es crida abans de cridar al codi principal (`s2methanetemporalgee()`)

S'obté una llista d'identificadors de productes GEE (imatges de satèl·lits) que corresponen a les condicions especificades, es per açò que és el primer que s'executa, perquè de la llista de productes que s'obtenen s'ha de seleccionar els que representen les dates que s'han seleccionat prèviament a l'EO browser.

Aquest identificadors seran emprats per l'algoritme per a obtenir imatges de satèl·lits Landsat o Sentinel-2 (a aquest cas, Sentinel-2) de Google Earth Engine segons un producte específic, una àrea d'interès (AOI), i un punt. També retorna informació addicional com els angles del sol i de visió, les probabilitats de núvols, i altres metadades.

Per a l'exemple que mostrem a la subsecció 3.2 (això és una emissió el 28 de gener de 2024 a la latitud i longitud (31.7706, 6.0033)), els resultats son:

2024-01-28 T10:13:01, 2024-01-28 T10:19:57

2024-01-26 T10:22:19, 2024-01-26 T10:28:31

2024-02-02 T10:11:39, 2024-02-02 T10:19:29

Després d'executar el següent codi en la finestra de comandos:

```
import utils_gee
utils_gee.get_geeids('31SGR',None, '2024-01-10','2024-02-20')
```

S'obtindria aquesta llista:

```
['COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240111T102401_20240111T102734_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240113T101309_20240113T102057_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240116T102259_20240116T103016_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240118T101331_20240118T101403_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240121T102331_20240121T102705_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240123T101229_20240123T102022_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240126T102219_20240126T102831_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240128T101301_20240128T101957_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240131T102251_20240131T102625_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240202T101139_20240202T101929_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240205T102129_20240205T102125_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240207T101201_20240207T101904_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240210T102151_20240210T102529_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240212T101039_20240212T101833_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240215T102029_20240215T102728_T31SGR',  
'COPERNICUS/S2_HARMONIZED/20240217T101101_20240217T101803_T31SGR']
```

I es seleccionarien els següents objectes, corresponents a les dates obtingudes de l'EO Browser:

```
'20240128T101301_20240128T101957_T31SGR'
```

```
'20240126T102219_20240126T102831_T31SGR'
```

```
'20240202T101139_20240202T101929_T31SGR'
```

2.4.2 Algoritme de obtenció de metà: *s2methanetemporal_gee*

La classe *S2MethaneTemporalGee* és el component central del software i s'encarrega de detectar plomes de metà basant-se en dades obtingudes amb el mòdul *utils_gee*. Així, el mètode principal, *s2methanetemporal_gee()*, executa el procés de detecció de la ploma seguint els següents passos clau :

```
111     aoi = ee.Geometry.Polygon(  
112         [[latlon[1] - roisize[1], latlon[0] + roisize[0]],  
113          [latlon[1] - roisize[1], latlon[0] - roisize[0]],  
114          [latlon[1] + roisize[1], latlon[0] - roisize[0]],  
115          [latlon[1] + roisize[1], latlon[0] + roisize[0]])  
116     aoi_center = ee.Geometry.Point([latlon[1], latlon[0]])  
117     aoibg = ee.Geometry.Polygon(  
118         [[latlon_bg[1] - roisize_bg[1], latlon_bg[0] + roisize_bg[0]],  
119          [latlon_bg[1] - roisize_bg[1], latlon_bg[0] - roisize_bg[0]],  
120          [latlon_bg[1] + roisize_bg[1], latlon_bg[0] - roisize_bg[0]],  
121          [latlon_bg[1] + roisize_bg[1], latlon_bg[0] + roisize_bg[0]])
```

1. **Definició de la Regió d'Interès (ROI) i la Regió de Fons (Background):** Es defineixen la regió d'interès (ROI) i la regió de fons per calcular les anomalies, permetent una comparació entre les zones amb potencial presència de metà i les zones de referència.

```
123     b11ch4, b12ch4, ccloudch4, self.sza, self.vza, satunit, timestamp, product_idch4, self.ch4_rad_mean = utils_gee.getgee(  
124     prod_ch4, aoi, aoi_center)  
125     b11ch4bg, b12ch4bg, → → → → → self.ch4_rad_meanbg = utils_gee.getgee(prod_ch4, aoi, aoi_center)
```

2. **Descàrrega i Processament de Dades Satel·litàries:** Les imatges dels satèl·lits es descarreguen i processen utilitzant la funció `getgee` de l'arxiu `utils_gee.py`. S'obtenen les bandes d'interès (B11 i B12), la informació sobre núvols, i les metadades necessàries per a la detecció de metà.

```
204     delta_txall = (b12ch4 / b11ch4) / (b12noch4 / b11noch4) * np.nanmean(b12noch4bg / b11noch4bg) / np.nanmean(  
205     b12ch4bg / b11ch4bg)  
206     delta_txallbg = (b12ch4bg / b11ch4bg) / (b12noch4bg / b11noch4bg) * np.nanmean(  
207     b12noch4bg / b11noch4bg) / np.nanmean(b12ch4bg / b11ch4bg)
```

3. **Càlcul del Mapa d'Enriquiment de Metà:** Es calcula el "delta" de metà comparant les bandes d'imatge i normalitzant amb les regions de fons. Aquest càlcul és fonamental per detectar possibles plomes de metà.

```
194     # STEP 3. Get Enhancement Map #####  
195     trat_mr, mr_trat = self.get_mixingratio(prod_ch4, satunit)  
196     if prod_noch4 is None: # if prod_noch4 is set to None, only prod_ch4 is used (typical case in offshore)  
197         b12ch4[b12ch4 < 0.0001] = 0.0001 # over offshore sites it might be possible some values are capped to 0  
198         b11ch4[b11ch4 < 0.0001] = 0.0001  
199         b12ch4bg[b12ch4bg < 0.0001] = 0.0001 # over offshore sites it might be possible some values are capped to 0  
200         b11ch4bg[b11ch4bg < 0.0001] = 0.0001  
201         delta_txall = (b12ch4 / b11ch4) * np.nanmean(b11ch4bg / b12ch4bg)  
202         delta_txallbg = (b12ch4bg / b11ch4bg) * np.nanmean(b11ch4bg / b12ch4bg)  
203     else:  
204         delta_txall = (b12ch4 / b11ch4) / (b12noch4 / b11noch4) * np.nanmean(b12noch4bg / b11noch4bg) / np.nanmean(  
205         b12ch4bg / b11ch4bg)  
206         delta_txallbg = (b12ch4bg / b11ch4bg) / (b12noch4bg / b11noch4bg) * np.nanmean(  
207         b12noch4bg / b11noch4bg) / np.nanmean(b12ch4bg / b11ch4bg)  
208  
209     tx_all = mr_trat(1800) * delta_txall.flatten()  
210     mrch4 = []  
211     for tx in tx_all:  
212         mrch4.append(trat_mr(tx)) # this would account for B12/B11  
213     self.delta_mrch4 = np.array(mrch4).reshape(b12ch4.shape[0], b12ch4.shape[1]) - 1800  
214     tx_allbg = mr_trat(1800) * delta_txallbg.flatten()  
215     mrch4bg = []  
216     for txbg in tx_allbg:  
217         mrch4bg.append(trat_mr(txbg)) # this would account for B12/B11  
218     delta_mrch4bg = np.array(mrch4bg).reshape(b12ch4bg.shape[0], b12ch4bg.shape[1]) - 1800  
219  
220     self.bgmean = np.nanmean(delta_mrch4bg)  
221     self.bgstd = np.nanstd(delta_mrch4bg)
```

4. **Obtenció de Relacions de Mescla de Metà:** El codi inicialitza el procés d'obtenció de relacions de mescla mitjançant interpolacions (`trat_mr` i `mr_trat`). Aquestes funcions converteixen relacions entre bandes (B12/B11) en concentracions de metà, essent essencials per mesurar l'augment de metà en l'àrea d'estudi.
5. **Comprovació de Productes de Normalització:** Si no es proporciona un producte de normalització (`prod_noch4`), només es treballa amb el producte `prod_ch4`. Aquesta situació és típica en entorns offshore, on no es disposa d'imatges addicionals per a la comparació. Es preparen les dades ajustant els valors per evitar distorsions en els càlculs.
6. **Càlcul de la Relació de Mescla de Metà:** Es calculen les relacions entre les bandes B12 i B11 per a l'àrea d'interès i per a l'àrea de fons. Això permet determinar si hi ha un augment de metà a la regió d'estudi en comparació amb els fons.
7. **Aplicació de Funcions d'Interpolació:** Les relacions de mescla calculades es converteixen en concentracions de metà mitjançant funcions d'interpolació (`mr_trat` i `trat_mr`). Aquesta conversió és necessària per quantificar el metà present en cada píxel de la imatge.
8. **Càlcul de la Concentració de Metà:** A partir de les relacions de mescla, es calcula la concentració de metà per a cada píxel de la imatge, tant per a l'àrea d'estudi com per a l'àrea de fons. Les concentracions resultants s'emmagatzemen en matrius per a identificar increments anòmals de metà.
9. **Càlcul del Valor Mitjà i Desviació Estàndard:** Es calcula el valor mitjà i la desviació estàndard de la concentració de metà en l'àrea de fons. Aquestes estadístiques s'utilitzen per identificar anomalies significatives.

```
223 # STEP 4. Mask the plume area #####
224 delta_mrch4mask = ndimage.median_filter(self.delta_mrch4,
225                                       size=(config_param.medianwindow, config_param.medianwindow))
226
227 if config_param.manual_std:
228     delta_2sigma = 2 * config_param.manual_std
229 else:
230     delta_2sigma = 2 * np.nanstd(delta_mrch4bg)
231 if config_param.mask_manual:
232     plume_ind = manual_mask.select_plume(self.delta_mrch4, config_param.plot_stretch, pix_res)
233 else:
234     # The mask is obtained with pixels above 2std of median filter
235     ind1 = delta_mrch4mask > delta_2sigma
236     ind2 = delta_mrch4mask < config_param.upper_th # A number that if too high, its is physically impossible.
237     if config_param.cloudmask:
238         if satunit == 'Landsat9' or satunit == 'Landsat8' or satunit == 'Landsat5' or satunit == 'Landsat7':
239             cloudthres = 100
240         elif satunit == 'Sentinel-2A' or satunit == 'Sentinel-2B':
241             cloudthres = config_param.s2cloudthres
242         if not cloudnoch4:
243             indcloud = cloudch4 < cloudthres
244         else: # condition for the mask is that the methane overpass or any normalisation overpass is cloud
245             indcloud = (cloudch4 < cloudthres) & (np.max(np.array(cloudnoch4), axis=0) < cloudthres)
246     plume_ind = ind1 & ind2 & indcloud
247 else:
248     plume_ind = ind1 & ind2
```

10. **Aplicació del Filtre de Mediana:** La matriu de concentració de metà (*self.delta_mrch4*) es filtra amb un filtre de mediana. Aquest procés ajuda a suavitzar la imatge i eliminar el soroll, facilitant la detecció de plomes de metà.
11. **Determinació del Llindar de 2-Sigma:** Es calcula un llindar de 2 vegades la desviació estàndard (*delta_2sigma*) per determinar quines concentracions de metà són significativament diferents de la mitjana. Si es proporciona un valor manual, s'utilitza aquest; en cas contrari, el càlcul es basa en la desviació estàndard.
12. **Detecció i Filtratge de Clústers de Ploma:** Es detecten clústers de píxels que compleixen els criteris per considerar-se plomes de metà. Aquests clústers es filtren per assegurar que compleixen un mínim de píxels requerit (*clustersize_th*), descartant aquells que són massa petits per ser significatius.
13. **Creació de la Màscara Final de la Ploma:** Després de filtrar els clústers, es crea una màscara final (*plume_ind*) que identifica amb precisió els píxels que formen part de la ploma de metà. Aquesta màscara és essencial per a l'anàlisi posterior i la quantificació de l'emissió de metà.

2.4.3 Paràmetres de configuració d'entrada

El fitxer *config_param.py* conté diversos paràmetres que configuren el comportament de l'algoritme de detecció de metà. Aquests paràmetres són generalment fixes, però l'usuari pot modificar-los segons sigui necessari. A continuació es descriuen els paràmetres més importants i com es poden ajustar per adaptar-se millor a les condicions específiques de la detecció de les nostres emissions.

medianwindow:

El paràmetre *medianwindow* estableix la mida de la finestra per al filtre de mediana que s'aplica a les dades durant l'anàlisi. Aquest filtre és crucial per a l'eliminació de soroll i per suavitzar les imatges, especialment en entorns on hi ha molta variabilitat. La configuració predeterminada és de 5, però si l'anàlisi es realitza en escenes més sorolloses, com les de zones marines, podria ser beneficiós incrementar aquest valor a 7 per obtenir imatges més netes i millorar la qualitat de les deteccions. Com pot vore's a la Figura 2-6, si es compara a la seua anàloga sense filtrar (Figura 3-2 (b)), el filtre de mediana emborriona un poc la imatge, descartant el soroll com a possible outlier però afectant un poc la ploma.

imecal:

El paràmetre *imecal* s'utilitza per definir els coeficients de calibratge per a l'Infrared Methane Enhancement (IME), un element fonamental per calcular la velocitat efectiva del vent, *Ueff*. Els valors predeterminats, 0.33 i 0.45, es basen en la recerca publicada de [6]. Es recomana mantenir aquests valors excepte en casos on es tinga accés a una nova calibració més precisa

que justifique un canvi. Canviar aquests paràmetres sense una justificació tècnica clara podria comprometre l'efectivitat de l'anàlisi.

upper_th:

El paràmetre `upper_th` serveix per establir un límit superior de 50,000 ppb, el qual és utilitzat per identificar quan un píxel ha de ser considerat un outlier. Aquesta configuració és vital per a la detecció d'anomalies en les concentracions de metà. En general, aquest valor està optimitzat per evitar la generació de falsos positius, així que només s'hauria de modificar si hi ha una justificació tècnica clara que indique la necessitat d'ajustar-lo.

clustersize_th:

Per a determinar la mida mínima d'una ploma de metà que es considera rellevant, es fa servir el paràmetre `clustersize_th`. Establert per defecte en 20 píxels, aquest valor és crucial en contextos on les plomes de metà són petites o l'entorn presenta una elevada variabilitat. Reduir aquest llindar podria ser beneficiós en aquests casos, garantint així que no es passen per alt les plomes menors durant l'anàlisi, però amb el perill de detectar soroll com a metà.

manual_std:

Quan el paràmetre `manual_std` no té un valor assignat, el codi utilitza automàticament les regions de fons per calcular la màscara de la ploma basant-se en la desviació estàndard. Si, en canvi, es proporciona un valor explícit, aquest es pren com a referència per definir el llindar de 2-sigma. Aquesta funcionalitat és especialment útil per ajustar manualment la precisió de la màscara després d'una primera execució de l'algoritme, segons els resultats obtinguts.

u10:

El paràmetre `u10` indica la velocitat del vent a una alçada de 10 metres i es pot configurar de dues maneres: manualment, amb un valor fix, o automàticament, utilitzant dades meteorològiques de fonts com ERA5 o GEOS-FP. El valor predeterminat és de 3 m/s, però aquest pot ser ajustat per obtenir dades més acurades, especialment si es busca una major precisió en les condicions de vent a l'àrea d'estudi.

plot_stretch:

Amb `plot_stretch`, s'ajusten els valors mínim i màxim per a l'estirament del contrast en les imatges generades durant l'anàlisi. El rang predeterminat és de (0, 2), però pot ser modificat per millorar la visibilitat de les plomes de metà. Aquesta configuració pot resultar útil en aquells casos en què les imatges no reflecteixen de manera clara les concentracions de metà desitjades, permetent un ajust segons les necessitats específiques de cada una, però a l'estudi no ha resultat d'utilitat, com pot vore's a la Figura 2-7, amb uns valors exageradament alts i un resultat igualment saturat.

cloudmask:

Quan el paràmetre `cloudmask` està activat (True), l'algoritme aplica una màscara per eliminar la interferència dels núvols en la detecció de plomes de metà. Això és particularment útil en dies en què els núvols són abundants, ja que evita que interfereixen amb les mesures de metà. Per defecte, aquest paràmetre està desactivat (False), i ha de ser activat manualment si es considera necessari per les condicions meteorològiques.

s2cloudthres:

El paràmetre `s2cloudthres` especifica el percentatge mínim per considerar un píxel com a núvol en les imatges de Sentinel-2. Amb un valor predeterminat del 70%, aquest paràmetre proporciona un bon equilibri entre la detecció de núvols i la minimització de falsos positius. No obstant això, aquest valor pot ser ajustat segons el nivell de precisió requerit per la identificació de núvols en cada estudi.

mask_manual:

Quan `mask_manual` està establert a `True`, permet a l'usuari definir manualment les àrees que es consideren com a ploma de metà. No obstant, a aquest estudi no va a fer-se ús de la funció.

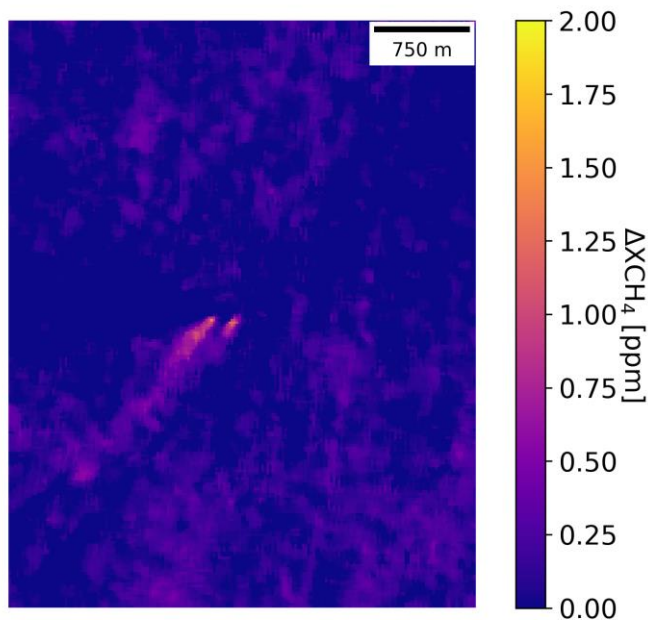


Figura 2-6: Ploma resultant a l'exemple de Turkmenistan1, després d'aplicar un filtre de mediana

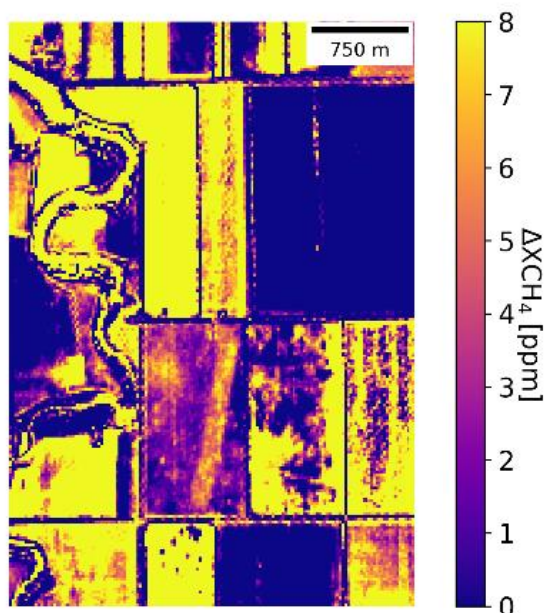


Figura 2-7: Ploma resultant a l'exemple de Rússia, amb un `plot_stretch` exageradament alt de (0, 8)

Després de passar per tot aquest procés, a l'exemple, aquest arxiu tindria com l'eixida més important, i on s'ha de veure la ploma de metà, la Figura 1-8.

Secció 3. Llocs d'estudi i resultats de *methane enhancement*.

La següent taula especifica els principals paràmetres dels llocs d'estudi seleccionat:

Nom assignat	Data d'emissió	Latitud	Longitud	Q[kg/h]
Algèria	2024-01-28T 10:13:01	31.7706	6.0033	10.44 t/h
Turkmenistan1	2023-01-14 T 07:12:39	38.6486	54.2829	19.10 t/h
Turkmenistan2	2023-11-25 T07:12:21	39.5070	53.5897	22.63 t/h
Russia	2024-04-09 T08:16:09	46.7365	39.7393	16.04 t/h
Bahrain	2023-03-30 T07:06:21	26.0438	50.5686	29.64 t/h
Egypt	2023-09-20 T08:26:31	29.6334	32.3004	20.00 t/h
USA	2024-01-17 T17:26:41	32.4345	-101.8313	18.38 t/h
Mexico1	2023-05-12 T16:28:39	19.5658	-92.2372	94.39 t/h
Mexico2	2023-05-17 T16:28:39	19.5653	-92.2387	31.61 t/h

Taula 1. Llocs d'estudi d'emissions de metà i paràmetres associats.

Seguint la metodologia anterior, s'han obtés imatges de distints punts al voltant del món en què s'han reportat fuites de metà procedents d'infraestructures d'extracció de petroli i gas. Els resultats per a cada emissió de la Taula 1 es detallen als següents subapartats.

3.1 Algèria

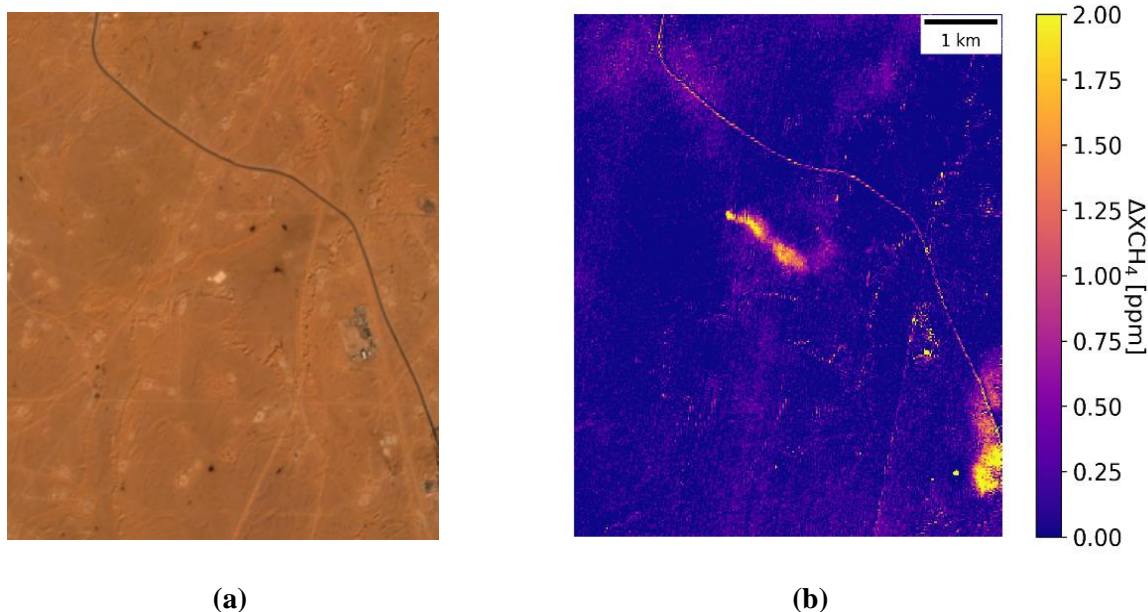


Figura 3-1: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

Al primer lloc, tractant d'observar falsos positius a la Figura 3-1, s'ha utilitzat un àrea de $0.3^\circ \times 0.3^\circ$, el que ha tingut com a resultat imatges de poc més 35 quilòmetres quadrats. Si ens fixem en Figura 3-1 (a), es mostra un terreny relativament homogeni (amb unes poques irregularitats) a la zona nord-est d'Algèria (Àfrica), aquesta zona, concretament és part del desert del Sàhara, cosa que explica les tonalitats de marró clar. També poden apreciar-se unes edificacions al sud-est del punt en qüestió, així com una carretera que està situada prou prop i arriba fins altres edificacions situades encara més al sud-est, quasi fora de la imatge.

D'altra banda, Figura 3-1 (b) presenta una ploma de metà que pot distingir-se de manera clara al centre de la il·lustració, si coneixem amb antelació el punt d'eixida d'aquest, ja que a la zona inferior dreta també pot parèixer que hi ha una altra ploma en direcció perpendicular a la primera. No obstant, aquesta última es tracta d'un important outlier que és degut a la presència d'edificis, que alteren la naturalesa homogènia del terreny, com pot vore's al comparar-se amb Figura 3-1 (a). També cal esmentar que s'hi identifiquen altres outliers puntuals, hi ha soroll al llarg i ample de la ploma resultant a Figura 3-1 (b) i és fàcil la identificació de la carretera, ja que presenta uns valors de concentració de metà més alts que la mitja del terra, tot i que aquets últims no donen peu a confusió amb la ploma.

3.2 Turkmenistan1

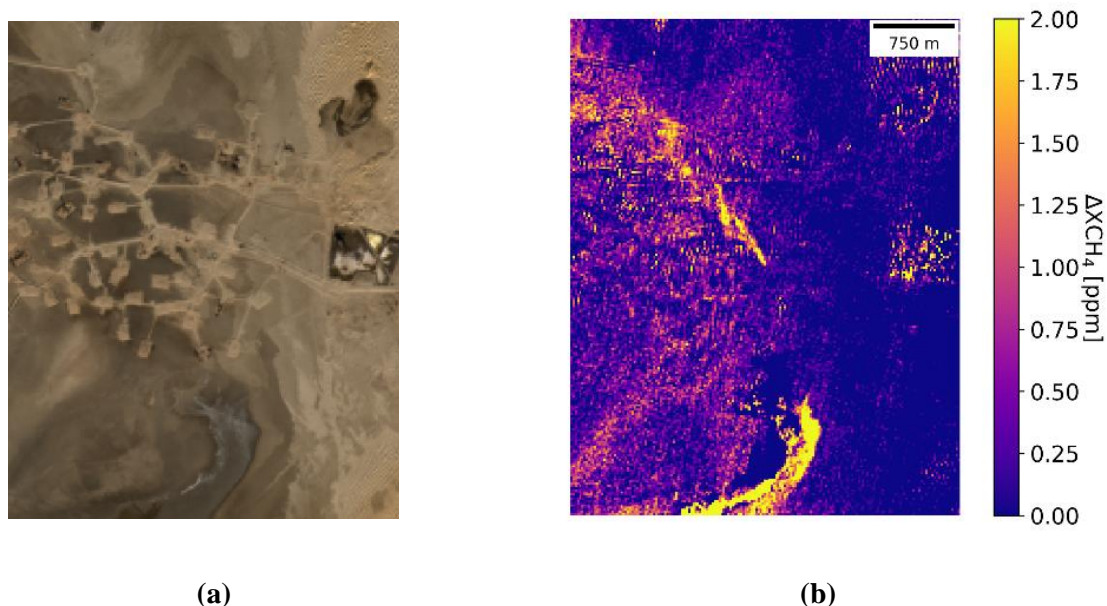


Figura 3-2: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

A continuació i fins que s'indique el contrari, com a la majoria de llocs estudiats, va a seleccionar-se un àrea de $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$, cosa que implica imatges que representen aproximadament un 30 quilòmetres quadrats. La il·lustració vista a la Figura 3-2 (a) mostra una regió àrida i desèrtica de Turkmenistan, amb tonalitats predominantment marrons i beix que indiquen superfícies arenoses o de sòl nu. El paisatge presenta una textura rugosa i ondulada, amb formes geomètriques llargues i estretes orientades en diverses direccions, probablement causades per l'erosió del vent. No es detecta presència significativa de vegetació, cosa que suggereix un entorn extremadament àrid, possiblement part del desert de Karakum, caracteritzat per les seves altes temperatures diürnes i baixa humitat. Tampoc hi ha evidències clares d'activitat humana o assentaments, la qual cosa reforça la idea d'una àrea remota amb poca presència humana.

Tenint en compte les característiques esmentades, fixant-nos en la Figura 3-2 (b), podem distingir prou fàcilment una o dos plomes de metà al centre, seguint les úniques interferències amb clares característiques de que es tracten de soroll coincident amb les formes geomètriques i allargades que s'han descrit en Figura 3-2 (a) i, per tant, descartables respecte del metà. Cal esmentar que el recorregut de la ploma (amb direcció sud-oest) està prou delimitat per una baix valor de concentració de metà a la Figura 3-2 (b) i que aquesta coincideix amb unes tonalitats negres prou constants amb la mateixa direcció, sentit, forma i situació espacial en Figura 3-2 (a).

3.3 Turkmenistan2

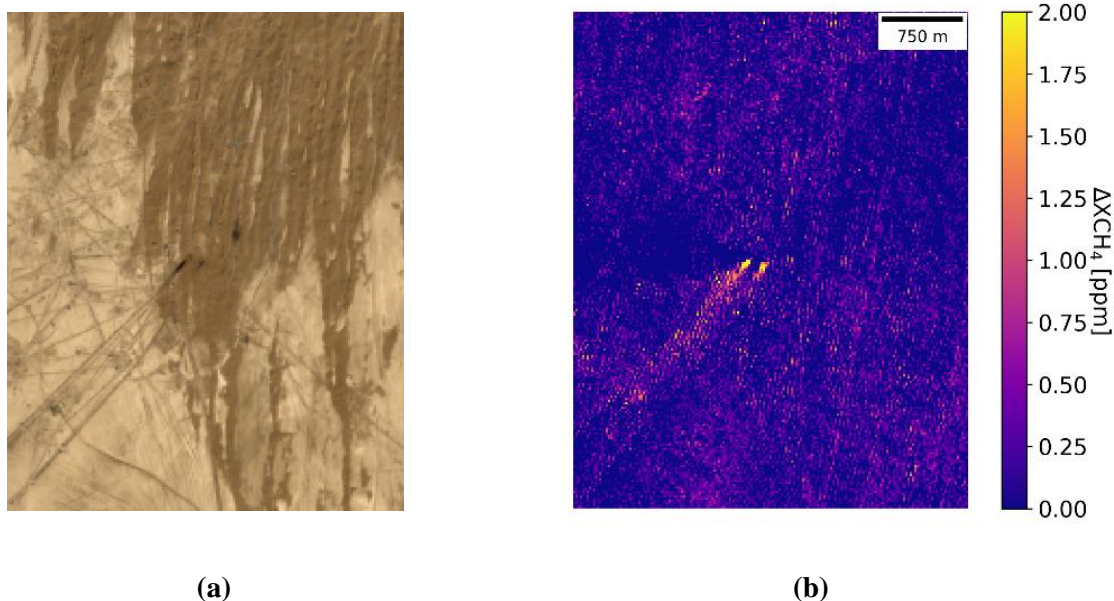


Figura 3-3: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

Altra vegada, a Turkmenistan, a Figura 3-3 (a) es presenta un paisatge desèrtic similar al de la Figura 3-2 (a), però amb evidents signes d'activitat humana. La zona presenta una àmplia xarxa de camins i estructures disperses que semblen estar associades a activitats industrials, probablement relacionades amb l'extracció de petroli o gas, donada la ubicació i les característiques del terreny. A la part dreta (este), hi ha un àrea amb dipòsits de materials de colors clars (la qual cosa suggereix un procés d'extracció o emmagatzematge de recursos natural), que s'identifica com a un possible outlier a Figura 3-3 (b), ja que no té cap forma de ploma. D'altra banda, a la part inferior de Figura 3-3 (a), es poden veure altres estructures més xicotetes i possibles vies d'accés que connecten diferents àrees del terreny. També s'aprecia un fort canvi de tonalitat a aquesta zona a uns colors més blanquinosos que poden estar relacionats amb vertits producte de les activitats que s'han esmentat abans, així es provoca l'aparició d'un outlier enorme i molt destacat que fa l'algoritme identificar-lo com a metà més que la ploma que hi ha clarament al centre de Figura 3-3 (b), ja que l'outlier presenta una clara forma corba que no pot relacionar-se per a res amb el sentit que té la ploma del centre, dirigida cap al nord-oest. A més, al voltant de la ploma coneguda hi ha molt de soroll, cosa que complica més la situ

3.4 Russia

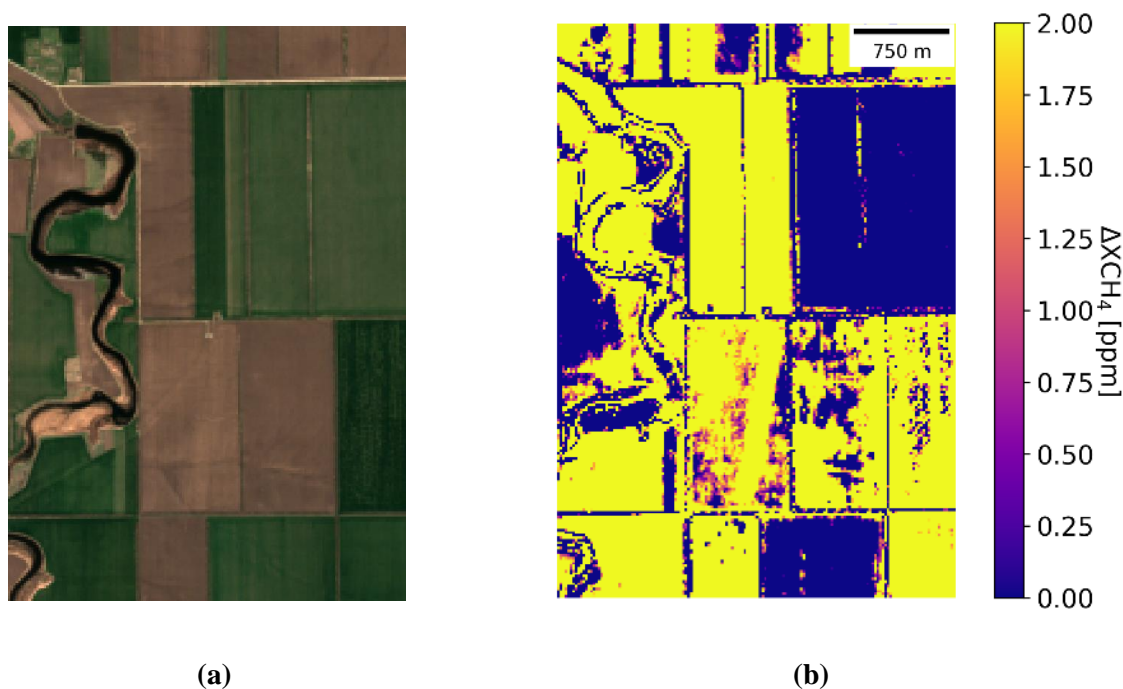


Figura 3-4: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

La zona presentada en Figura 3-4 (a) és clarament d'activitat agrícola, el que contrasta fortment amb el que hem estat veient fins ara. Es poden observar camps de cultiu distribuïts de manera ordenada, formant quadrants de diferents tonalitats que indiquen diversos estats de creixement o diferents tipus de cultius. A l'esquerra de la imatge, hi ha un riu que serpenteja per la zona, que es pot distingir clarament a Figura 3-4 (b), mentre que al centre es pot distingir una discreta edificació, la qual resultaria ser el punt d'emissió. Tot i açò, els nivells de luminància de Figura 3-4 (b) és massa alt i no pot distingir-se cap ploma, però sí que es veuen unes variacions al rectangle en què es situa aquesta i al de la dreta, que no poden relacionar-se amb cap variació visual a Figura 3-4 (a). Aquest tipus de regió és típic d'una zona rural amb una infraestructura dissenyada per maximitzar la productivitat dels cultius, però no presenta cap tipus d'instal·lació, a primera vista, per l'extracció de combustibles fòssils, cosa que contrasta amb la informació extreta amb l'UNEP IMEO Plume Viewer.

Tot i açò, (b) presenta uns nivells de metà tals que s'ha provat a usar valors al *plot_stretch* exageradament alts (fins de 0, 8) per tractar de distingir el terreny, però no ha fet efecte i els canvis són minúsculs, com pot vore's al comparar la Figura 3-4 (b) amb la Figura 2-7, pel que es presenta la ploma resultant amb un *plot_stretch*=(0,2), com a la resta de llocs estudiats. S'ha de destacar que unes quadrícules tenen uns nivells de luminància molt alts, mentre que d'altres els tenen nuls; així, pareix ser que la font de metà a aquesta zona són les terres de cultiu. Amb aquest supòsit es justificaria la no presència de metà a les terres de guaret, ja que no presenten nivells d'humetat tan alts com les de cultiu.

3.5 Bahrain

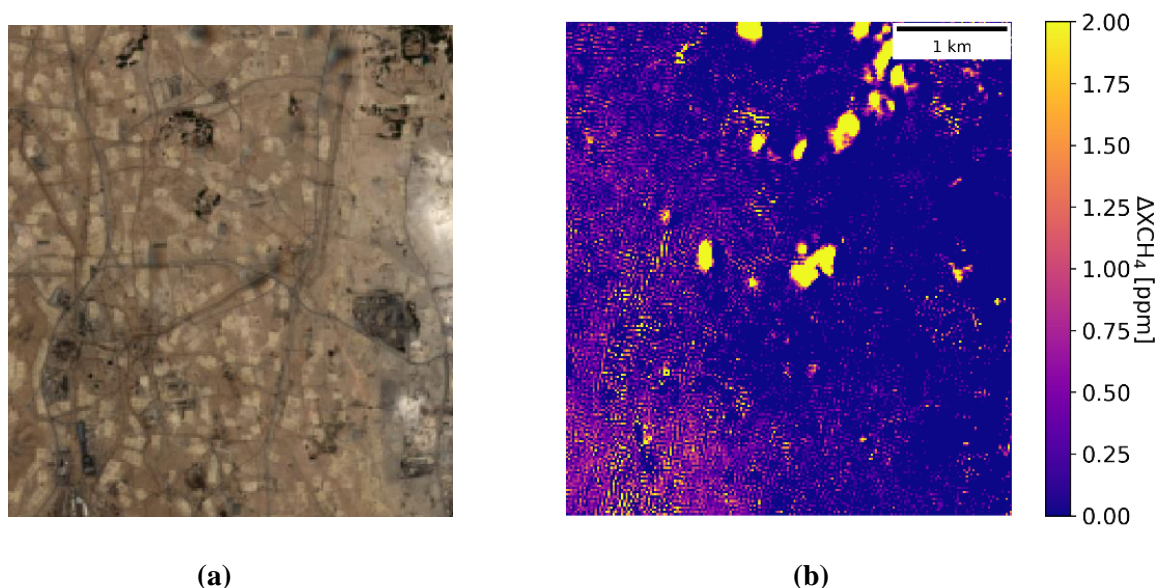


Figura 3-5: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

La imatge de Figura 3-5 (a) presenta un paisatge desèrtic pla amb tonalitats terroses clares, típic de Bahrain. S'observa una àmplia distribució d'infraestructures, especialment al nord, principalment associades a activitats industrials, com instal·lacions de compressió de gas i plantes industrials, causant outliers identificats com conjunts d'alta luminància a Figura 3-5 (b), conformant importants outliers. Com a la figura anterior (Figura 3-4), s'ha provat a usar valors al *plot_stretch* exageradament alts, però han tingut el mateix efecte, pel que es presenta la ploma resultant amb un *plot_stretch*=(0,2), com a la resta de llocs estudiats.

Aquesta xarxa d'instal·lacions està interconnectada per camins i carreteres que travessen el terreny, no obstant açò les carreteres no es detecten a Figura 3-5 (b). A l'oest i sud-oest, la concentració d'edificis disminueix, tot i que hi ha instal·lacions disperses probablement vinculades a explotacions industrials, cosa que genera prou de soroll a la detecció del metà, però aquest es fàcilment descartable com a font de metà. D'altra banda, a l'est i sud-est, es pot veure com hi ha distintes zones, unes desèrtiques i d'altres edificades, seguint la densitat d'aquestes últimes prou alta on les hi ha, amb infraestructures i complexes industrials de gran escala, suggerint activitats econòmiques intenses, però a Figura 3-5 (b) només es detecta un clar fals positiu i a penes hi ha soroll, que és fàcilment identificable amb les zones esmentades en Figura 3-5 (a). En conjunt, el terreny combina àrees desèrtiques amb zones industrialitzades, on hi ha un grup d'outliers (sobretot al nord) i no s'acaba de distingir bé la ploma del centre, cosa que presenta un gran problema a aquest lloc ja que al centre no es presenta la típica forma de una ploma i els outliers importants són molt similars (la resta serien fàcils de descartar amb un filtre de mediana).

3.6 Egypt

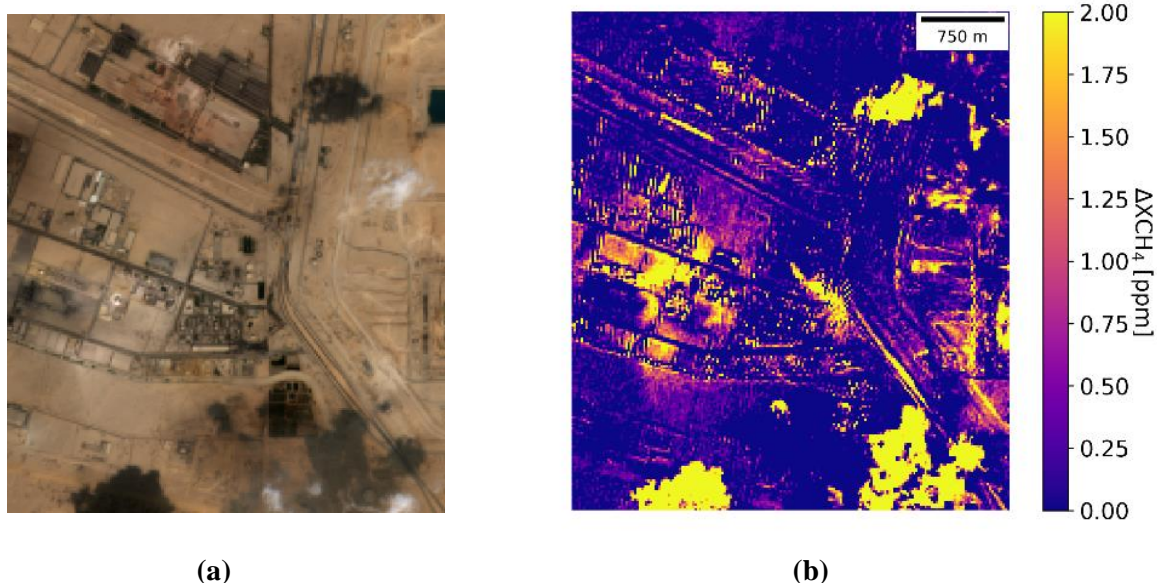


Figura 3-6: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

El terreny representat en Figura 3-6 (a) mostra una àrea industrial extensa amb diverses instal·lacions de gran escala dedicades a la fabricació i processament de materials. El predomini del color marró engroguit reflecteix les condicions desèrtiques característiques d'Egipte, una regió amb un clima àrid i escasses precipitacions. Al centre de la imatge es destaca el SIDC Industrial Park, que alberga diferents fàbriques dedicades a la producció d'acer i estructures metàl·liques, així com altres activitats de manufactura industrial. Una carretera principal travessa la zona, facilitant l'accés a les instal·lacions; a prop d'aquesta via es troba una altra planta dedicada a la producció de fertilitzants. Com a les dues figures, s'ha provat a usar valors al *plot_stretch* més alts per la saturació de colors a Figura 3-6 (b), però no ha fet efecte, pel que es presenta la ploma resultant amb un *plot_stretch*=(0,2) i una imatge saturada, com a la resta de llocs.

En general, Figura 3-6 (b) presenta dificultats per a identificar clarament la ploma de metà situada al centre del mapa. A més, tot i que en aquesta imatge no es distingeix la carretera, es nota la presència de nombrosos outliers que dificulten una identificació precisa. Aquesta situació és atribuïble, en gran part, a les fàbriques mencionades anteriorment i a la gran quantitat de fums que emeten, tal com es pot observar de manera generalitzada en Figura 3-6 (a). A més, la identificació de la ploma al centre és realment difícil, per la forma que s'aprecia a la imatge de Figura 3-6 (b), i són els fums més foscos de la zona els que resulten en generar les luminàncies més altes com a resultat de l'aplicació de l'algoritme actual.

3.7 USA

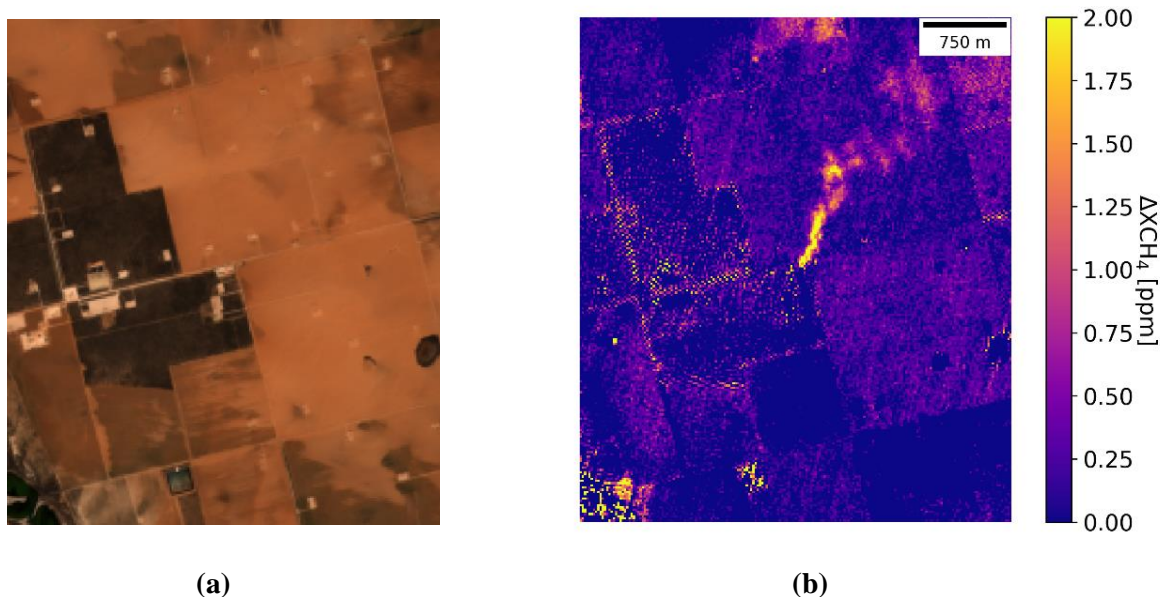


Figura 3-7: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

La Figura 3-7 (a) presenta un paisatge rural dividit en una sèrie de parcel·les regularment distribuïdes que, a primera vista, semblen ser camps de cultiu, de manera similar a la Figura 3-4. La distribució quadrangular dels camps suggereix que es tracta d'una zona agrícola ben organitzada. Les tonalitats variades de la terra, que oscil·len entre zones més fosques i altres més clares, podrien indicar diferents tipus de cultius o etapes de creixement, o fins i tot la presència de diferents qualitats de sòl. A diferència de la Figura 3-4, en Figura 3-7 (b) s'aprecia amb claredat una ploma de metà al centre de la imatge. Tot i les diferències de tonalitats observades en les parcel·les de Figura 3-7 (a), aquestes no suposen un obstacle per a la identificació de falsos positius, a diferència del que ocorre en el cas de la ploma observada en Rússia.

Repartides pel terreny, es poden veure estructures que podrien ser instal·lacions per a la producció de combustibles fòssils, com petits pous de petroli o gas, la qual cosa suggereix una coexistència d'activitats agrícoles amb alguna forma d'explotació energètica. Aquesta combinació és típicament observada en zones rurals dels Estats Units, i és des d'aquesta instal·lació central d'on emergeix clarament la ploma de metà. A més, a la part inferior esquerra de la imatge, es troba una àrea que sembla contenir aigua, una característica inusual en aquesta regió predominantment àrida. Aquesta massa d'aigua podria correspondre a un embassament o dipòsit artificial, i encara que podria ser considerat un outlier, està prou aïllat de la ploma de metà com per evitar qualsevol confusió, i no presenta la seua forma en absolut.

3.8 Mexico1

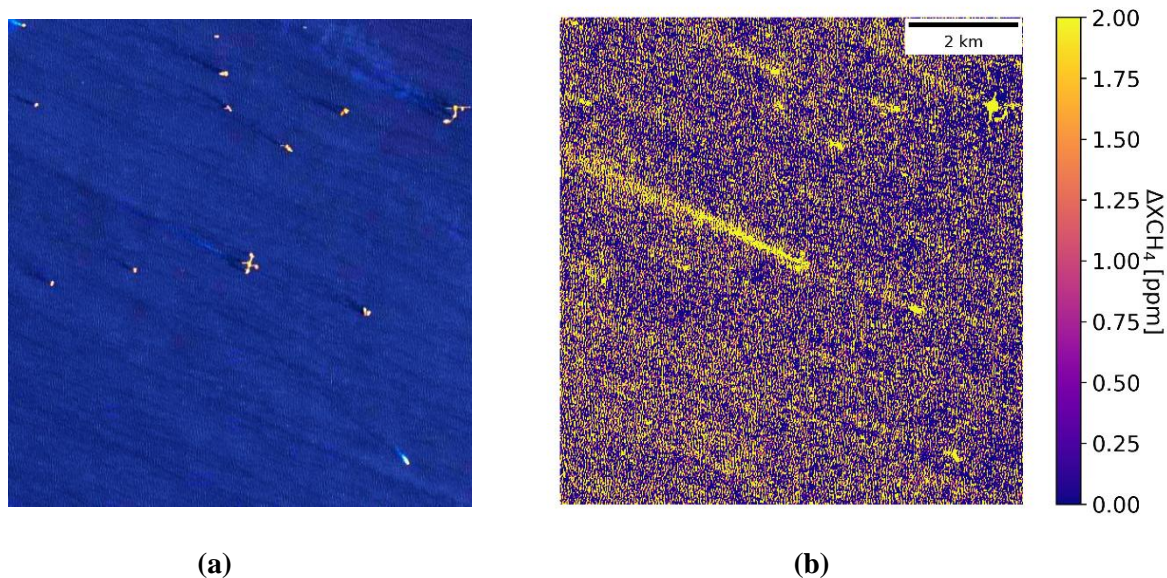


Figura 3-8: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

Les imatges utilitzades per a la detecció d'aquesta fuga de metà són de doble tamany en comparació amb les anteriors. Açò es deu al fet que, tractant-se d'una àrea marítima, hi ha menys elements que podrien ser considerats outliers, la qual cosa justifica l'estudi d'una àrea més extensa. Per tant, s'ha utilitzat un valor de $roisize = roisize_bg = 0.4$, tot i que el $roisize_bg$ no s'utilitzarà perquè la homogeneïtat d'aquest tipus de terreny no requereix cap tipus de normalització, així s'obtenen uns resultats d'uns 80 quilòmetres quadrats. També, per les característiques que presentava la imatge original, s'ha modificat la brillantor, l'exposició, el contrast i la saturació, per facilitar la observació, així que la imatge de Figura 3-8 (a) és la modificada. En observar la imatge de Figura 3-8 (a), es pot identificar el que sembla ser la direcció del vent o de l'aigua (nord-oest) i una varietat d'instal·lacions offshore disperses per tota la zona. Aquestes instal·lacions probablement són plataformes petrolieres, ja que es troben al Golf de Mèxic, una àrea coneguda per la presència d'aquestes estructures.

En comparar amb la Figura 3-8 (b), es pot veure una gran ploma de metà que segueix la direcció nord-oest, així com una varietat de punts que es poden identificar fàcilment com les diferents instal·lacions offshore, segons la seva mida. Aquests punts podrien ser outliers o fins i tot fugites de metà més petites, tenint en compte la naturalesa de les instal·lacions, però són clarament diferenciables de la ploma de metà principal. Cal destacar la quantitat de soroll present a tota la Figura 3-8 (b), però podria llevar-se augmentant de 5 a 7 el *medianwindow* a la configuració dels paràmetres o aplicant un filtre de mediana, pel que no suposa un problema.

3.9 Mexico2

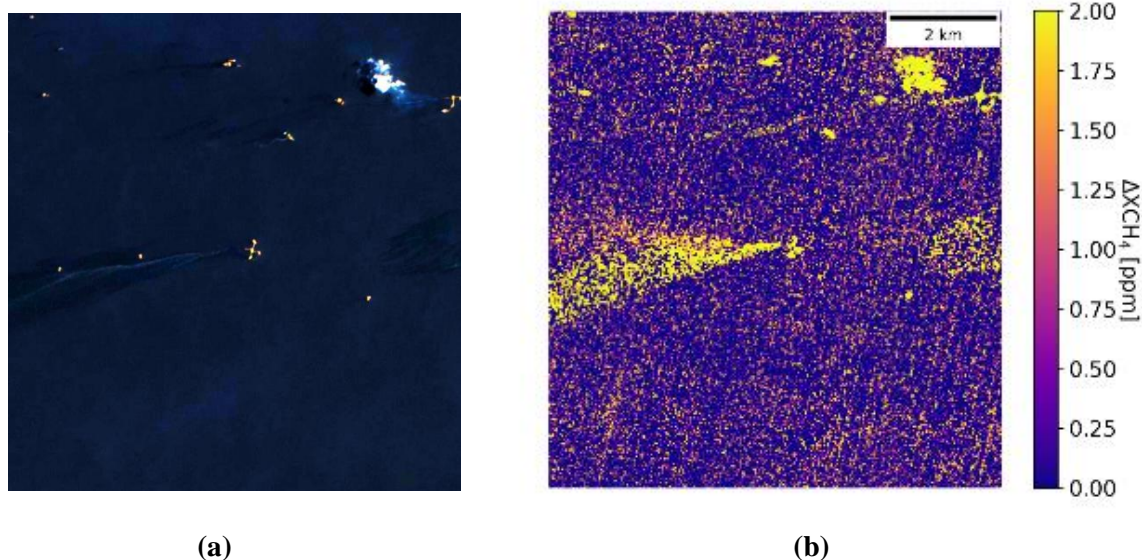


Figura 3-9: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant. Ambdues imatges obtingudes amb transformacions mitjançant software a partir de la informació, del mateix lloc i instant, proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

Aquesta figura es realment pareguda a l'anterior, i açò es degut a que es tracta del mateix lloc (quasi les mateixes coordenades), 5 dies després. Aquesta presenta les mateixes característiques que l'anterior: rosize i modificació de la imatge original (tot i semblar més fosca que l'altra). Com pot vore's a Figura 3-9 (a), les instal·lacions offshore romanen al mateix lloc, mentre que hi ha altre tipus d'elements que no estan i d'altres que apareixen; es tracten d'embarcacions. Es segueix tenint el mateix problema amb el soroll que a la Figura 3-8, però, com s'ha esmentat abans, no suposaria un problema gràcies al filtre de mediana. També s'ha de destacar la diferent direcció generalitzada que es pot vore tant a Figura 3-9 (a) com a (b), ara oest – sud-oest, aquesta ve indicada per una espècie de vertits que es troben en l'aigua i que s'identifiquen com a ploma a (b), tot i que el vertit que hi ha a la part dreta de Figura 3-9 (b) pot descartar-se amb facilitat. Per altra part, el vertit que s'origina desde el centres prou més allargat i dens que l'anterior, pel que sí presenta un problema important, però també s'ha de vore que part del que s'identifica com a tal en Figura 3-9 (b) no es correspon amb el vertit exacte mostrat a Figura 3-9 (a) i, a més, té una alta densitat, pel que podria tractar-se de la ploma a identificar. Llevant els clars outliers que s'identifiquen amb instal·lacions offshore i embarcacions, la última cosa a tindre en compte és un punt de sortida de fum a la zona alta de la dreta, que té com a conseqüència l'anomalia al mateix lloc respectiu a Figura 3-9 (b), però no es confundible amb una ploma de metà.

Secció 4. L'ús d'informació auxiliar per a la detecció de falsos positius

4.1 Extracció d'informació auxiliar

El codi complementari *extraer_aux_info.py* s'encarrega d'extraure i processar informació auxiliar, com ara índexs de vegetació (NDVI, EVI), aerosols (AOT), vapor d'aigua (WV), classificacions del sòl (SCL), i dades d'elevació (DEM). Comença inicialitzant Google Earth Engine (GEE) per assegurar l'accés a les dades.

Utilitzant coordenades centrals (latlon) i una mida de regió d'interès (roisize), es defineix una àrea poligonal sobre la qual es farà el càlcul. A partir d'aquí, el codi reprojecta i extreu bandes específiques de Sentinel-2 i altres fonts. Aquestes bandes s'usen per calcular índexs com el NDVI i l'EVI, que s'inverteixen en l'eix Y per alinear correctament les dades.

Les dades extretes es desen en un arxiu NetCDF, un format científic que permet la manipulació i l'emmagatzematge eficient de dades multidimensionals. L'arxiu conté les següents variables:

- **XCH4**: Concentració de metà a l'atmosfera.
- **NDVI** i **EVI**: Índexs de vegetació que indiquen la salut i la densitat de la vegetació. Són útils per discernir anomalies causades per la vegetació.
- **DEM**: Model Digital d'El·levarió, que proporciona informació sobre la topografia del terreny.
- **AOT**: Grossor Òptic d'Aerosols, que indica la presència de partícules atmosfèriques que poden afectar la precisió de les mesures de metà.
- **WV**: Vapor d'Aigua, que pot influir en les lectures de metà.
- **SCL**: Classificació de la Superfície, que identifica diferents tipus de superfícies com aigua, vegetació, o sòl.

4.2 Detecció de falsos positius

La informació auxiliar que hem descrit a la subsecció 4.1, se llig al programa principal *aux_info_plot.py* que està dissenyat per detectar plomes de metà (XCH4) i falsos positius en dades de satèl·lit mitjançant l'ús de múltiples fonts d'informació auxiliar. El programa integra diverses tècniques d'anàlisi de dades i algorismes d'aprenentatge automàtic per millorar la precisió de la detecció d'emissions de metà, especialment en entorns complexos.

Aquestes dades es combinen en una matriu tridimensional, on cada píxel conté els valors de les set bandes que hem descrit a la subsecció 4.1. Aquesta combinació és crucial perquè permet a l'algorisme treballar amb totes les variables simultàniament, ajudant a diferenciar les plomes de metà reals de les anomalies.

L'ús d'aquesta informació auxiliar permet al programa millorar significativament la precisió de la detecció d'emissions de metà, ja que facilita l'identificació de patrons inusuals que podrien confondre's amb emissions reals.

Una de les parts més crítiques del software és la detecció de falsos positius utilitzant l'algorisme **Isolation Forest**. Aquest algorisme és ideal per a la detecció d'anomalies en conjunts de dades grans i multidimensionals.

Explicació de l'Algoritme Isolation Forest:

Isolation Forest és un mètode d'aprenentatge automàtic no supervisat que aïlla les anomalies en les dades mitjançant la construcció d'un bosc de múltiples arbres de decisió. El principi bàsic de l'algoritme és que les anomalies són més fàcils d'aïllar perquè difereixen significativament de les dades normals.

- **Construcció d'Arbres de Decisió:** L'algoritme selecciona aleatòriament una característica i un valor de divisió per construir múltiples arbres de decisió (estimadors). A mesura que es construeixen els arbres, cada punt de dades es divideix fins que queda aïllat.
- **Càlcul de l'Aïllament:** Les dades que són anomalies requereixen menys divisions per ser aïllades. Per tant, els punts que es poden aïllar amb menys passos es consideren outliers.

Implementació en el Software:

1. **Normalització de Dades:** Primer, les dades combinades es normalitzen utilitzant *StandardScaler* per assegurar que totes les variables tinguin la mateixa escala. Això és essencial per al rendiment de l'algoritme, ja que evita que certes variables dominin les altres.
2. **Entrenament de l'Isolation Forest:** El model es configura amb paràmetres clau, com el nombre d'estimadors ($n_estimators=200$) i el nivell de contaminació ($contamination=0.1$). Aquests paràmetres s'ajusten per optimitzar la detecció d'anomalies en diferents entorns, com els marins, on es requereix un ajustament diferent per a la identificació precisa d'outliers.

```
21 # Función para detectar outliers usando Isolation Forest
22 def detect_outliers_iforest(data, contamination=0.05, n_estimators=100):
23     scaler = StandardScaler()
24     data_normalized = scaler.fit_transform(data)
25
26     # Detección de outliers
27     iforest = IsolationForest(contamination=contamination, n_estimators=n_estimators, random_state=42)
28     iforest.fit(data_normalized)
29     outliers = iforest.predict(data_normalized) == -1
30     return outliers
```

3. **Filtrat i Processament d'Outliers:** Els outliers detectats es processen per identificar agrupaments utilitzant tècniques de clustering. Amb *measure.label* i *measure.regionprops_table*, el programa detecta clusters d'outliers i elimina els que no compleixen amb un mínim de píxels (*clustersize_th*), que són considerats soroll.

```
56 # Detección de outliers
57 outliers_combined = detect_outliers_iforest(combined_data, contamination=0.1, n_estimators=200)
58 outliers_combined = outliers_combined.reshape(xch4.shape)
59
60 # filtrar outliers con menos píxeles que un cierto umbral
61 clustersize_th = 20 # Thresholds used to detect and discard pixels
62 labels = measure.label(outliers_combined, connectivity=2) # detect clusters and store their properties
63 labels_prop = measure.regionprops_table(labels, properties=(
64     'label', 'filled_area', 'eccentricity', 'major_axis_length', 'centroid', 'area'))
65 # filter data based on pixel area size
66 labels_invalid = labels_prop['label'][[(labels_prop['filled_area'] < clustersize_th)]
67 for invalid in labels_invalid:
68     labels[labels == invalid] = 0
69 outliers_combined = np.array(labels, dtype=bool)
```

Aquest procés és essencial per refinar els resultats i assegurar que només es detecten les plomes de metà reals i no altres anomalies causades per característiques ambientals o errors de mesura.



Finalment, el software crea visualitzacions per mostrar les dades de metà netejades, destacant les concentracions reals de metà en l'àrea d'interès. Aquesta visualització és important per identificar les plomes de metà reals sense interferències d'anomalies. Finalment, el software guarda els resultats dels outliers i les dades netejades en arxius NetCDF, assegurant que els resultats estiguin disponibles per a una anàlisi posterior o per integrar-se amb altres mètodes.

4.3 Resultats de falsos positius

Hem aplicat l'anàlisi anteriorment detallat a la subsecció 4.2 i 4.3 per a cadascun dels llocs d'estudi definits a la Taula 1. Els resultats es detallen a les següents subseccions.

4.3.1 Algèria

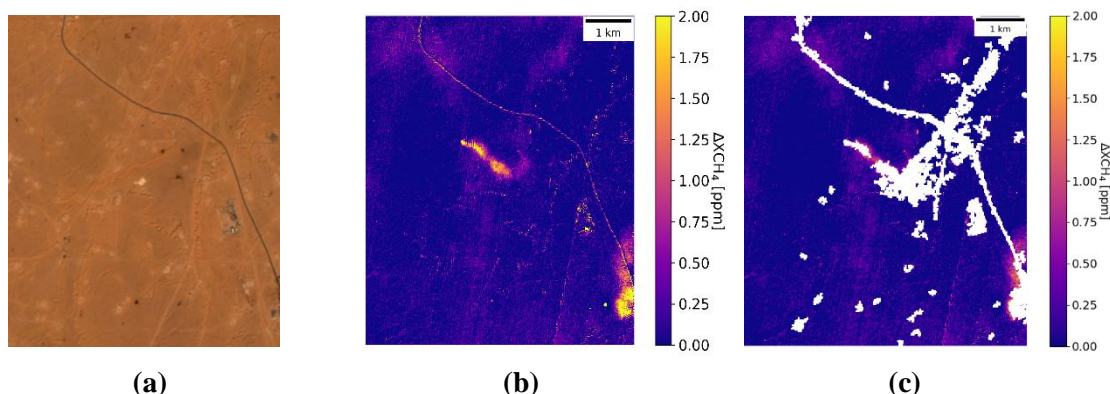


Figura 4-1: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

Comparant les imatges Figura 4-1 (a) i Figura 4-1 (b) amb la imatge Figura 4-1 (c), podem veure clarament que Figura 4-1 (c) mostra un patró complex d'anomalies. Per començar, a Figura 4-1 (c) destaca una enorme línia corba que travessa la imatge de nord a sud-est, que es detecta com a outlier, cosa que és prou interessant ja que, veient la imatge Figura 4-1 (a), sabem que es tracta d'una carretera. En canvi, a la regió central de Figura 4-1 (c), on la imatge Figura 4-1 (b) mostra una ploma de metà clara (i coneguda), ara es veu una àrea destacada en blanc que ha estat identificada incorrectament com un outlier. Aquesta àrea abasta la major part de la ploma detectada, indicant que l'algoritme ha classificat, erròniament, una emissió real de metà com una anomalia. Això és particularment problemàtic, ja que la ploma és una de les emissions conegudes que es volia identificar de manera precisa i, en aquest exemple, ha quedat classificada com a fals positiu, essent un vertader positiu.

A més, es poden identificar altres outliers a la part superior dreta de la imatge Figura 4-1 (c), els quals no corresponen amb cap emissió de metà esperada. Però, com podem veure a Figura 4-1 (b), tampoc s'havien classificat com a tal, pel que no haurien d'aparèixer com outliers ja que ni tan sols s'han detectat com a positius: es tracta d'un fals negatiu, cosa que no es busca de cap manera amb aquest algoritme. Si ens fixem en Figura 4-1 (a), aquesta zona coincideix amb un terreny més fosc, però de totes maneres no hauria de classificar-se com a outlier, ja que ni tan sols té una mínima luminància a Figura 4-1 (b). Aquests punts blancs s'estenen cap al sud, seguint una trajectòria que arriba fins a la carretera i continua fins a arribar a la ploma identificada erròniament com a outlier, com ja s'ha mencionat abans.

A la part inferior de la imatge Figura 4-1 (c), també es poden veure diverses concentracions disperses, suggerint més outliers. Aquestes concentracions apareixen en regions on la presència d'edificis és evident a la imatge Figura 4-1 (a), pel que el nou algoritme fa bé en detectar aquests punts com outliers, ja que no són clarament fonts de metà, però a Figura 4-1 (b) presenten una luminància prou elevada. I per finalitzar, cal destacar la correcta detecció d'outliers a la part inferior dreta de Figura 4-1 (c), que, com podem veure a Figura 4-1 (b), presenta un important conjunt de punts amb una alta luminància, però que en comparar amb Figura 4-1 (a) és fàcil veure que es tracta d'un conjunt d'edificis.

4.3.2 Turkmenistan1

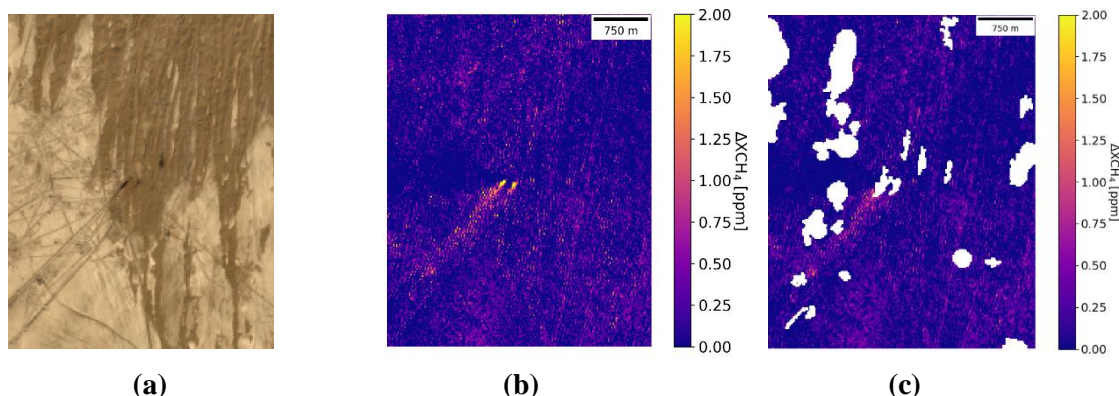


Figura 4-2: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

En primer lloc, a la Figura 4-2 (c), s'observa un patró dispers de punts blancs que estan distribuïts de manera irregular per tota la imatge, la qual cosa suggereix la presència d'outliers. Aquests punts blancs es concentren sobretot a la part superior de la imatge, formant un conjunt ampli i irregular que destaca contra el fons fosc. Aquest grup d'outliers a la part superior de la Figura 4-2 (c) no sembla estar relacionat amb cap emissió de metà identificada a la Figura 4-2 (b). En canvi, aquests outliers podrien estar associats amb les variacions en la textura del terreny que es poden veure a la Figura 4-2 (a), on apareixen formes geomètriques i allargades a causa de l'erosió eòlica. Per tant, la identificació d'aquests punts com a outliers pot ser adequada, ja que no representen emissions reals de metà. Tot i això, cal destacar que la majoria d'aquests outliers podrien eliminar-se a la Figura 4-2 (b) amb l'aplicació d'un filtre de mediana, encara que estan correctament classificats com a falsos positius en aquest context.

D'altra banda, a la regió central de la Figura 4-2 (c), es veu una concentració més gran de punts blancs que coincideix parcialment amb la ploma de metà que es visualitza a la Figura 4-2 (b). Aquesta acumulació d'outliers al centre de la Figura 4-2 (c) resulta problemàtica, ja que inclou parts de la ploma de metà coneguda, que està clarament marcada a la Figura 4-2 (b) com una emissió autèntica. Aquesta classificació errònia d'una part de la ploma com un outlier indica una limitació de l'algorisme, ja que hauria de poder distingir millor entre una emissió de metà real i altres tipus de soroll o anomalies en el terreny. No obstant això, és important remarcar que una gran part de la ploma no s'ha classificat com un outlier en la Figura 4-2 (c), el que representa una millora en comparació amb l'exemple anterior, on tota la ploma havia estat erròniament detectada com a outlier.

A més, a la part inferior de la Figura 4-2 (c), es poden observar diverses concentracions disperses de punts blancs. Aquestes es troben en zones on no hi ha emissions de metà visibles a la Figura 4-2 (b), el que podria suggerir que l'algorisme està identificant variacions en el terreny o anomalies visuals com a outliers. Aquests punts blancs es localitzen en àrees on la textura rugosa i ondulada de la superfície és clarament visible a la Figura 4-2 (a), i podrien ser el resultat de reflexions o altres artefactes visuals. Encara que la detecció d'aquests punts com a outliers és comprensible, tenint en compte la seva mida i baixa luminància a la Figura 4-2 (b), podrien eliminar-se amb l'ús d'un filtre de mediana, millorant així l'eficàcia del procés de detecció.

4.3.3 Turkmenistan2

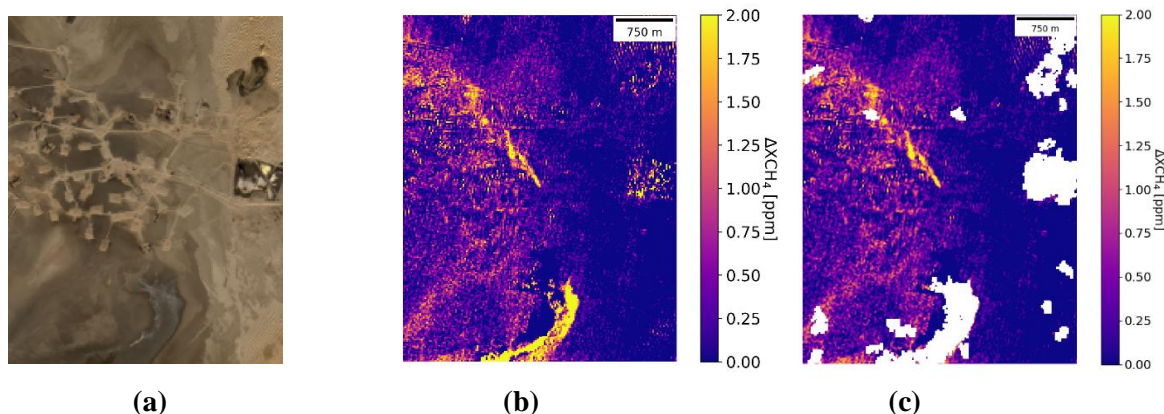


Figura 4-3: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

A Turkmenistan, una vegada més, la Figura 4-3 (a) mostra un paisatge desèrtic, però amb signes clars d'activitat humana. A la part dreta de la imatge, es veu una àrea amb dipòsits de materials de colors clars, indicant possiblement un procés d'extracció o emmagatzematge, i aquesta regió és detectada correctament com un gran outlier a la Figura 4-3 (c). Es tracta d'un dels outliers més grans i consistents que s'han detectat, ja que no presenta una forma de ploma clara, diferenciant-se de les emissions de metà que es busquen.

D'altra banda, a la part inferior de la Figura 4-3 (a), hi ha diverses estructures més petites i vies d'accés que semblen connectar diferents àrees del terreny, mostrant un canvi de tonalitat cap a colors més blanquinosos, que poden ser indicatius de vessaments o dipòsits associats a les activitats industrials esmentades. Aquest canvi de color provoca l'aparició d'un outlier molt destacat a la Figura 4-3 (c), que és detectat amb una forma corba gran. Aquesta forma de fals positiu no té cap relació amb la direcció de la ploma de metà coneguda, que a la Figura 4-3 (b) es dirigeix clarament cap al nord-oest.

En relació amb la ploma de metà, l'algoritme a la Figura 4-3 (c) funciona de manera notablement eficient, identificant gairebé tota la ploma de metà al centre sense classificar-la com un fals positiu. Només una petita part de la ploma es veu afectada, el que representa una millora significativa en comparació amb els exemples anteriors. A més, encara que al voltant de la ploma coneguda hi ha una quantitat considerable de soroll, aquest soroll no es detecta com a outlier per l'algoritme. Això és adequat, ja que la major part del soroll podria ser eliminada fàcilment aplicant un filtre de mediana, sense afectar la identificació correcta de la ploma de metà. En aquest cas, l'algoritme demostra una alta efectivitat en la detecció de les emissions de metà i la discriminació d'outliers no relacionats amb emissions reals.

4.3.4 *Russia*

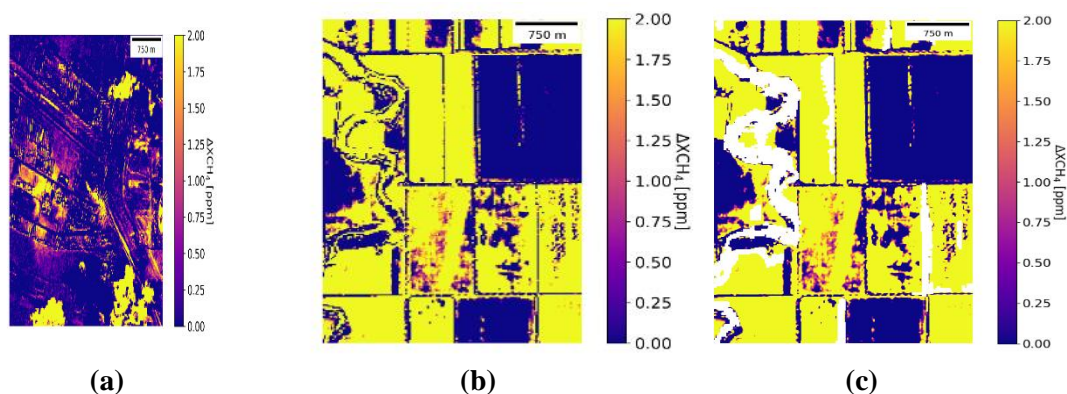


Figura 4-4: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

En aquest cas, l'anàlisi de la Figura 4-4 (c) revela una identificació més precisa en algunes àrees, però una confusió significativa en altres. El riu que serpenteja per l'esquerra de la Figura 4-4 (a) és identificat correctament en la Figura 4-4 (c) com una zona sense emissions de metà, demostrant una bona capacitat de detecció per part de l'algoritme en aquest aspecte. Aquest és un dels pocs punts positius de la Figura 4-4 (c), ja que el riu no es confon amb cap font d'emissió.

D'altra banda, a la Figura 4-4 (b), s'observa que gran part del terreny està saturat amb un alt nivell de luminància, fet que impedeix una detecció clara de plomes de metà. Aquesta saturació generalitzada comporta que moltes àrees del mapa es classifiquin incorrectament com a zones d'emissió de metà. En particular, els quadrants de cultiu mostren nivells elevats de metà en la Figura 4-4 (b), sense cap correspondència visual evident a la Figura 4-4 (a), cosa que indica una interpretació errònia dels senyals per part de l'algoritme. Les àrees centrals i algunes a la dreta mostren un patró similar, sense cap senyal clar en la Figura 4-4 (a) que pugui justificar aquestes deteccions.

A més, les variacions de luminància en alguns quadrants a la Figura 4-4 (b) no es corresponen amb cap canvi significatiu observat a la Figura 4-4 (a), la qual cosa complica la determinació de la font real d'aquestes anomalies. L'algoritme no aconsegueix diferenciar adequadament les terres de cultiu de les terres de guaret, ja que sembla tractar la majoria de les terres de cultiu com a fonts d'emissió. Això posa en evidència una falta de precisió en la detecció, que podria requerir un ajustament dels paràmetres o una estratègia de filtratge millorada per a zones agrícoles, amb l'objectiu d'obtenir una Figura 4-4 (b) raonable.

4.3.5 Bahrain

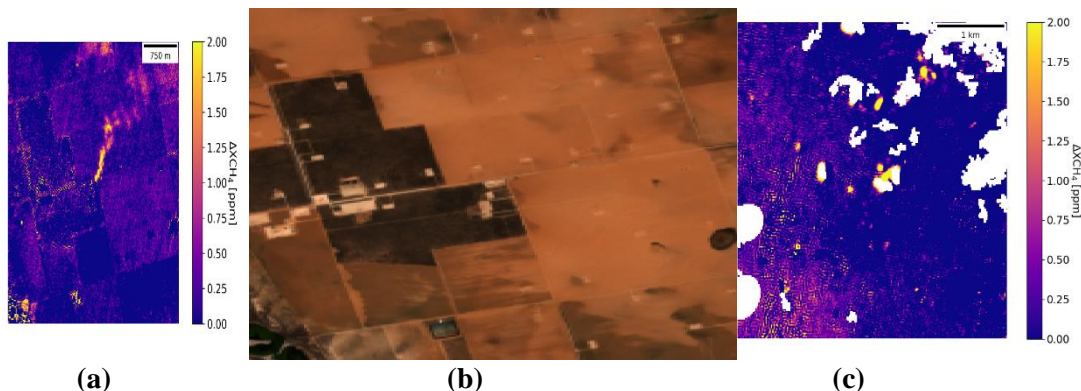


Figura 4-5: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

En aquest cas, la imatge (c) mostra un nombre significatiu d'outliers que s'han identificat a partir de les estructures presents al paisatge de (a). Al nord de la imatge (c), es poden veure diversos conjunts d'alta luminància que han estat classificats com outliers. Aquests conjunts coincideixen amb zones on a la imatge (a) hi ha una concentració elevada d'infraestructures industrials, com instal·lacions de compressió de gas i altres plantes industrials. Això indica que l'algoritme ha detectat correctament aquestes estructures com a fonts potencials de metà, tot i que algunes d'elles podrien no ser-ho en realitat.

Tanmateix, el problema es fa evident en la detecció al centre de la imatge (b), on la ploma de metà no es distingeix clarament. Això es deu a la saturació moderada de la imatge, que fa que sigui difícil diferenciar la ploma dels altres punts d'alta luminància presents a la imatge. A més, al centre de (c), els outliers que apareixen són similars en forma i intensitat a la resta de deteccions del mapa, complicant la identificació precisa de la ploma de metà.

A la part oest i sud-oest de la imatge, tot i que es detecten diverses instal·lacions disperses, aquestes no causen una gran quantitat de soroll en la detecció de metà a (b). Això facilita que aquestes zones es descartin fàcilment com a fonts d'emissió. En canvi, a l'est i sud-est de la imatge (c), només es veu un outlier clar, i gairebé no hi ha soroll, fet que permet relacionar fàcilment aquestes deteccions amb les zones industrials esmentades a (a).

En conjunt, el terreny presenta una combinació de zones industrialitzades i àrees desèrtiques, però la saturació moderada i l'acumulació d'outliers en la detecció de metà dificulten una identificació clara de la ploma central. Aquesta situació requeriria un ajust més fi de l'algoritme per millorar la precisió en distingir les plomes de metà reals de les estructures industrials que poden causar falsos positius, especialment en una zona tan industrialment activa com aquesta. En qualsevol cas, l'algoritme de detecció d'outliers amb informació auxiliar pot considerar-se que funciona molt bé i el que falla és l'algoritme per obtenir la imatge (b) (o alguns paràmetres).

4.3.6 Egypt

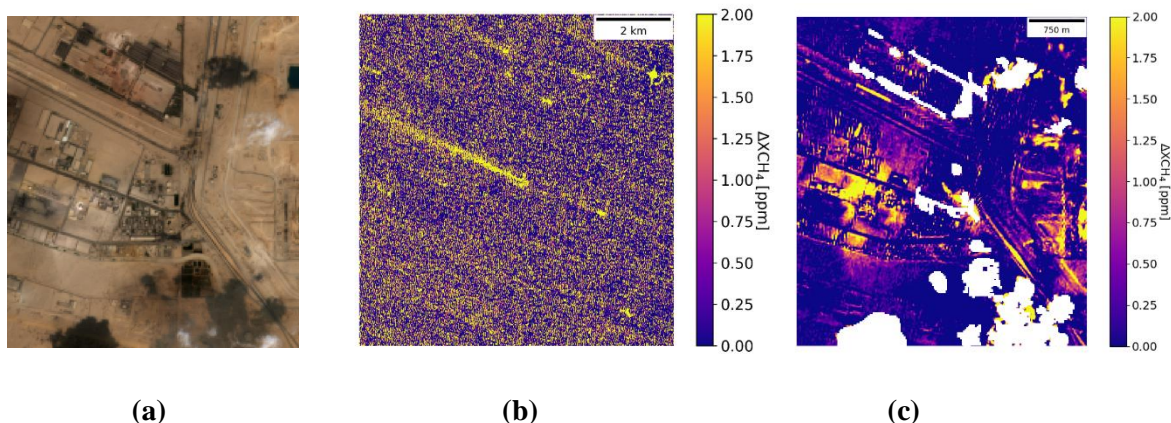


Figura 4-6: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

A aquesta zona, la Figura 4-6 (c) reflecteix una situació similar a l'anterior, on la saturació a la Figura 4-6 (b) afecta la capacitat d'identificar amb precisió les emissions de metà. Tot i que es poden detectar nombrosos outliers, aquesta saturació complica l'anàlisi, especialment al centre de la imatge, on es troba la ploma de metà.

A la Figura 4-6 (a), l'àrea industrial extensa, caracteritzada per diverses fàbriques i instal·lacions de gran escala, contribueix significativament als nivells de soroll observats a la Figura 4-6 (b). Les fàbriques que emeten fums oscil·len entre tonalitats més fosques i més clares, fet que genera variacions en les deteccions a la Figura 4-6 (b). Aquestes variacions es tradueixen en nivells de luminància alts, que dificulten la identificació clara de les emissions de metà reals, ja que la ploma del centre queda pràcticament indistingible entre aquestes interferències visuals.

La Figura 4-6 (c) utilitza informació auxiliar per intentar diferenciar millor les emissions de metà dels outliers causats per altres fonts, com ara les estructures industrials i els fums. Mentre que algunes zones industrials amb emissions menys evidents són classificades correctament com outliers, altres àrees de més activitat, especialment a prop de la carretera principal i les plantes industrials, presenten més problemes. La presència d'aquest soroll fa que l'algoritme identifiqui erròniament diverses àrees com a possibles fonts de metà, afectant la precisió global de la detecció.

A més, la presència d'instal·lacions com el SIDC Industrial Park i les fàbriques de producció de fertilitzants contribueixen a aquest soroll. A la Figura 4-6 (c), moltes d'aquestes àrees es mostren com a zones de luminància alta, coincidint amb els llocs on hi ha emissions de fums més foscos a la Figura 4-6 (a). Aquestes deteccions es barregen amb la ploma de metà, fet que sigui difícil determinar on acaba la ploma i comencen els outliers.

4.3.7 USA

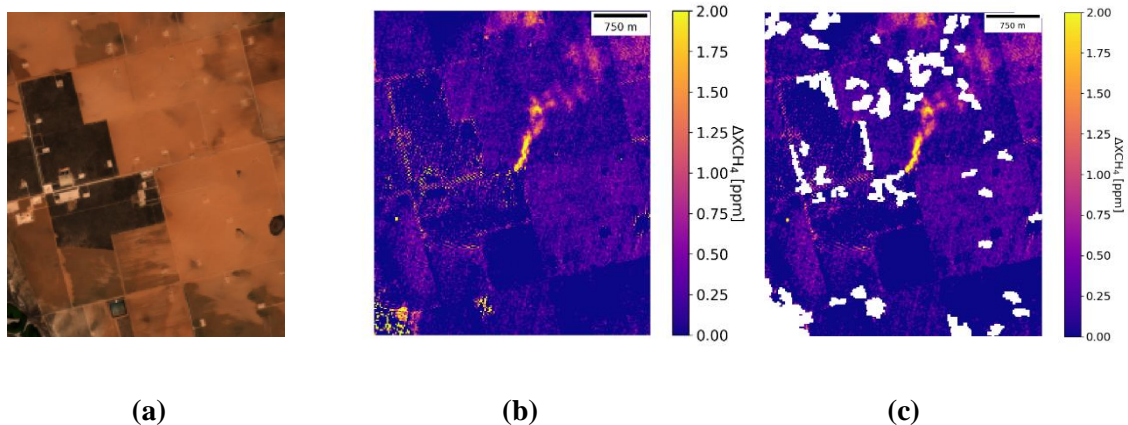


Figura 4-7: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

La Figura 4-7 (a) presenta un paisatge rural dividit en una sèrie de parcel·les regularment distribuïdes que, a primera vista, semblen ser camps de cultiu, de manera similar a la Figura 3-4. La distribució quadrangular dels camps suggereix que es tracta d'una zona agrícola ben organitzada. Les tonalitats variades de la terra, que oscil·len entre zones més fosques i altres més clares, podrien indicar diferents tipus de cultius o etapes de creixement, o fins i tot la presència de diferents qualitats de sòl. A diferència de la Figura 3-4, en la Figura 4-7 (b) s'aprecia amb claredat una ploma de metà al centre de la imatge. Tot i les diferències de tonalitats observades en les parcel·les de la Figura 4-7 (a), aquestes no suposen un obstacle per a la identificació de falsos positius, a diferència del que ocorre en el cas de la ploma observada en Rússia.

Repartides pel terreny, es poden veure estructures que podrien ser instal·lacions per a la producció de combustibles fòssils, com petits pous de petroli o gas, la qual cosa suggereix una coexistència d'activitats agrícoles amb alguna forma d'explotació energètica. Aquesta combinació és típicament observada en zones rurals dels Estats Units, i és des d'aquesta instal·lació central d'on emergeix clarament la ploma de metà. A més, a la part inferior esquerra de la imatge de la Figura 4-7 (a), es troba una àrea que sembla contenir aigua, una característica inusual en aquesta regió predominantment àrida. Aquesta massa d'aigua podria correspondre a un embassament o dipòsit artificial, i encara que podria ser considerat un outlier, està prou aïllat de la ploma de metà com per evitar qualsevol confusió, i no presenta la seua forma en absolut.

4.3.8 Mexico1

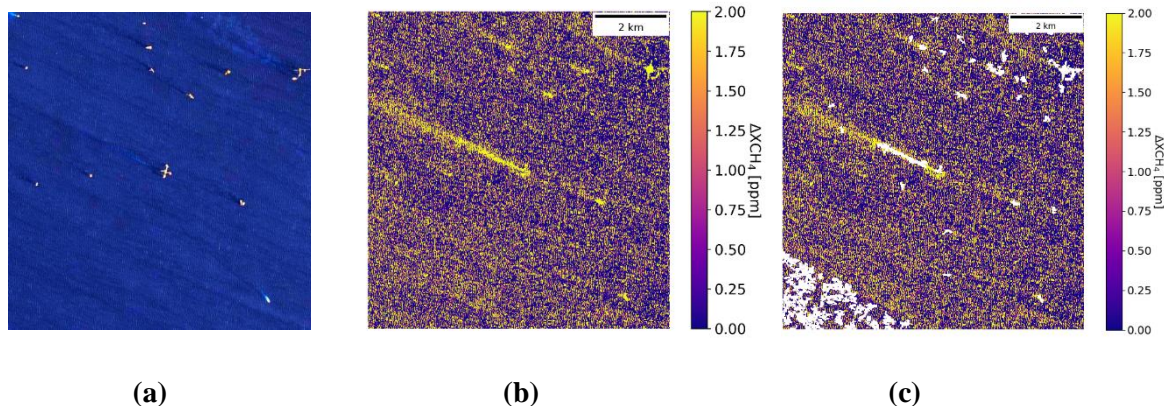


Figura 4-8: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

En aquesta zona, la detecció de metà a l'àrea marítima, com es mostra a la Figura 4-8 (c), presenta resultats interessants però amb algunes dificultats. A la Figura 4-8 (c), es detecten nombrosos outliers que segueixen una direcció predominant nord-oest, una orientació que coincideix amb la ploma principal de metà identificada a la Figura 4-8 (b) i amb els lleugers canvis de tonalitat de l'aigua observats a la Figura 4-8 (a). Aquests outliers també coincideixen amb la ubicació de diverses instal·lacions offshore que es poden veure disperses en les tres imatges. La seva presència contribueix a la confusió entre els senyals de metà i altres interferències, complicant la identificació precisa de les emissions reals.

Una part significativa de la ploma de metà visible a la Figura 4-8 (b) és incorrectament classificada com un outlier a la Figura 4-8 (c). Aquesta errada sembla estar relacionada amb la instal·lació offshore d'on sembla originar-se la ploma, tal com es pot deduir observant les imatges de la Figura 4-8 (a) i (b). Les variacions en la luminància detectades per l'algoritme podrien estar causades per les reflexions i dispersions de llum associades a aquestes instal·lacions. Això indica que l'algoritme té dificultats per diferenciar adequadament entre emissions reals de metà i altres anomalies visuals produïdes per les infraestructures marines. A més, la part inferior esquerra de la Figura 4-8 (c) també presenta soroll detectat com a outlier, fet que és un problema, ja que aquest soroll podria ser eliminat fàcilment amb un filtre de mediana, com a la resta de la imatge, en general. Així, es reduiria la quantitat de falsos positius que podrien complicar l'anàlisi de la imatge.

Tot i aquests desafiaments, els resultats són interessants perquè demostren la capacitat de l'algoritme per identificar la direcció general de la ploma i pràcticament tots els outliers, encara que una part de la mateixa ploma s'haja classificat erròniament com a tal. Això suggereix que amb ajustos addicionals es podria millorar significativament la precisió de la detecció en àrees marines.

4.3.9 Mexico2

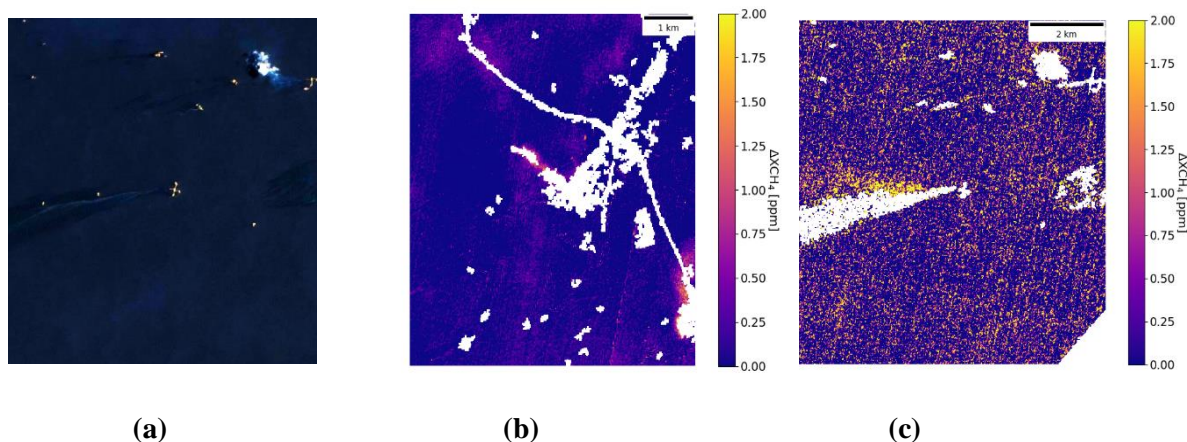


Figura 4-9: (a) Imatge del terreny amb bandes RGB, (b) Ploma resultant del software inicial, (c) Màscara d'outliers del software amb informació auxiliar. Les 3 imatges obtingudes, del mateix lloc i instant, amb informació proporcionada pel satèl·lit Copernicus Sentinel-2.

En la Figura 4-9, que representa la mateixa àrea observada 5 dies després de la imatge anterior, s'aprecia una continuïtat en els resultats interessants obtinguts prèviament. Es mantenen les mateixes configuracions de rosize i modificacions aplicades a la imatge original, tot i que aquesta sembla una mica més fosca. Com es veu en la Figura 4-9 (a), les instal·lacions offshore continuen en les mateixes posicions, però hi ha canvis notables, com la presència i absència d'embarcacions, que podrien afectar la detecció.

A la Figura 4-9 (c), l'algoritme aconsegueix identificar molts outliers que segueixen una direcció semblant a la ploma de metà, orientada ara cap a l'oest – sud-oest. Aquests outliers semblen correspondre amb els vessaments visibles a la Figura 4-9 (a) i que apareixen com emissions a la Figura 4-9 (b). La capacitat de la Figura 4-9 (c) per detectar aquests vessaments com a outliers mostra que l'algoritme pot diferenciar entre possibles fonts de metà i altres anomalies visuals, com els vessaments d'aigua o petroli. Tanmateix, la part dreta de la Figura 4-9 (c) presenta una zona amb soroll que també és identificada com a outlier, una qüestió que podria resoldre's fàcilment amb l'ús d'un filtre de mediana.

Si ens fixem en el vessament principal, que s'origina des del centre de la imatge, es pot veure que l'algoritme mostra una capacitat notable per distingir entre la ploma de metà i un vessament a l'aigua, tot i que aquests dos elements estan pràcticament solapats. Mentre que a la Figura 4-9 (b) tot es reconeix com una ploma de metà, en la Figura 4-9 (c) una part es detecta com a outlier, la de punts de luminància més densos, separant-la de la resta i permetent que es pugui classificar com a ploma. Aquesta diferenciació és especialment interessant perquè, en observar la Figura 4-9 (a), es pot veure clarament que la part més densa correspon al vessament a l'aigua, i no a una emissió de metà real. Aquesta capacitat de l'algoritme per identificar correctament el vessament com un outlier i mantenir la resta com a ploma és un resultat prometedori, demostrant una precisió elevada en la detecció, fins i tot quan les anomalies estan molt pròximes o pràcticament sobreposades.

També es detecta un punt de sortida de fum a la part superior dreta de la Figura 4-9 (a), que coincideix amb una anomalia en la mateixa regió de la Figura 4-9 (c). Aquesta detecció, tot i ser un outlier, no es confon amb una ploma de metà, indicant que l'algoritme té una bona capacitat per discriminar entre diferents tipus d'emissions i fonts de soroll.

Secció 5. Discussió sobre l'anàlisi de falsos positius per a la detecció de fuites de metà

L'anàlisi realitzat en diverses localitzacions ha demostrat l'eficàcia de l'algoritme desenvolupat per a la detecció d'outliers utilitzant informació addicional de bandes espectrals. Aquest enfocament ha permès una millor identificació de les plomes de metà, diferenciant-les d'altres anomalies visuals, la qual cosa és fonamental per millorar la precisió en la detecció de fuites de metà en infraestructures de producció de petroli i gas (O&G). En particular, els resultats obtinguts en zones com els Estats Units, la segona localització a Turkmenistan i la segona zona de Mèxic han estat especialment interessants i prometedors.

Resultats Prometedors en EUA, Turkmenistan2 i Mèxic2:

En el cas de Turkmenistan2, l'algoritme ha aconseguit uns resultats notables, identificant gairebé tots els outliers i deixant gran part de la ploma de metà sense classificar-la incorrectament com una anomalia. Aquests resultats evidencien la capacitat de l'algoritme per utilitzar informació auxiliar, com el NDVI i l'EVI, per a millorar la precisió en la detecció. En aquest sentit, crec que l'ús combinat d'aquestes dades és especialment efectiu en entorns amb vegetació escassa, com els deserts de Turkmenistan, ja que permet una millor eliminació d'anomalies associades a canvis en la vegetació i minimitza la confusió amb plomes reals de metà. A més, l'ús del Model Digital d'El·levació (DEM) ha demostrat ser crucial per distingir entre les variacions d'altitud i les autèntiques emissions de metà, cosa que considero fonamental en zones on, tot i ser relativament planes, els petits canvis d'altitud poden influir en la dispersió del metà.

A Mèxic2, l'anàlisi d'una àrea marítima presenta una altra troballa interessant, ja que l'algoritme ha mostrat una capacitat destacada per diferenciar entre les plomes de metà reals i les anomalies visuals com els vessaments d'aigua. Aquesta habilitat és especialment valuosa en entorns complexos com el marítim, on les condicions poden variar significativament. En aquest cas, em sembla que l'ús del Vapor d'Aigua (WV) i la Classificació de la Superfície (SCL) ha sigut clau per a filtrar outliers relacionats amb l'aigua en moviment i altres interferències. A partir d'aquests resultats, es fa evident que l'algoritme té un gran potencial per ser ajustat de manera específica per a diferents tipus d'entorn. Així mateix, l'ajust del nombre d'estimadors i del paràmetre de contaminació de l'Isolation Forest en aquest context marítim ha demostrat ser un pas necessari per millorar la seva precisió, cosa que em fa pensar que una personalització d'aquests paràmetres segons l'entorn podria ser una estratègia molt fructífera per a futures investigacions.

Pel que fa als Estats Units, els resultats són també molt prometedors. L'algoritme ha estat capaç de distingir clarament entre les plomes de metà i altres anomalies visuals en un entorn agrícola complex amb diferents tipus de cultius i variacions de sòl. Aquesta precisió en la detecció és molt encoratjadora i posa de manifest l'eficàcia de l'algoritme quan s'utilitzen adequadament els indicadors de vegetació com el NDVI i l'EVI. En la meua opinió, aquesta capacitat per eliminar les anomalies associades amb els canvis en la vegetació i per diferenciar les terres de cultiu de les terres de guaret, gràcies a l'ús de la classificació de superfície (SCL), subratlla la versatilitat i adaptabilitat de l'algoritme. Aquest aspecte és especialment rellevant per a aplicacions futures, on la detecció precisa de plomes de metà en entorns diversos serà cada vegada més important per a la mitigació de les emissions de metà a escala global.

Lliçons Aprengudes d'Altres Localitzacions:

Tot i els resultats prometedors obtinguts en algunes localitzacions, l'anàlisi d'altres regions com **Algèria, Rússia, Bahrain i Egipte** també ha aportat informació valuosa sobre les limitacions de

l'algoritme i la necessitat de realitzar millores addicionals. Aquesta diversitat de resultats és fonamental per comprendre els desafiaments que l'algoritme encara ha d'afrontar.

En el cas d'Algèria, l'algoritme va mostrar certes limitacions, ja que va identificar incorrectament una part significativa de la ploma de metà com un outlier. Tot i això, va ser capaç de detectar correctament altres anomalies visuals, com carreteres o estructures edificades. Aquesta situació posa de manifest una debilitat del model en diferenciar entre emissions reals de metà i altres anomalies visuals quan presenten característiques similars. Per abordar aquesta limitació, seria pertinent considerar ajustos més precisos dels paràmetres de detecció. A més, la integració de dades complementàries, com informació meteorològica o dades procedents d'altres sensors, podria ajudar a millorar la capacitat de discriminació de l'algoritme entre diferents tipus d'anomalies.

A Rússia i Egipte, l'anàlisi de les imatges va revelar problemes de saturació en les dades (b), que van complicar la capacitat de l'algoritme per identificar amb exactitud les emissions de metà. Aquest fet evidencia que, tot i les capacitats promeses de l'algoritme, encara cal desenvolupar noves estratègies de filtratge i ajustar els paràmetres per gestionar millor zones amb alta luminància o variabilitat visual significativa. Explorar noves tècniques de processament d'imatges podria ser clau per afrontar aquestes dificultats i optimitzar la detecció de plomes de metà en regions on les condicions visuals representen un repte major.

En contrast, l'anàlisi de Bahrain va demostrar que l'algoritme podia identificar un gran nombre d'outliers associats a infraestructures industrials, la qual cosa va ser coherent amb les observacions visuals. Tot i això, la saturació moderada de la imatge va complicar la identificació precisa de la ploma de metà. Aquest escenari posa en relleu la necessitat d'un ajustament més acurat de l'algoritme per millorar la seva capacitat de distingir entre les plomes de metà reals i altres fonts d'emissió no relacionades. Una possible millora podria incloure l'ús d'una combinació de paràmetres més sofisticats o, fins i tot, la incorporació de tècniques d'aprenentatge automàtic, que permetrien a l'algoritme adaptar-se de manera més eficaç a les condicions variades de les imatges que s'analitzen.

Futurs Camps d'Estudi

Els resultats obtinguts indiquen diverses direccions prometedores per a futurs camps d'estudi:

1. **Millora de l'Algoritme d'Isolation Forest:** Tot i els resultats positius, hi ha espai per millorar l'algoritme d'Isolation Forest per ajustar-se millor a diferents condicions ambientals i característiques del terreny. Això podria incloure la integració de models més avançats d'aprenentatge automàtic que puguin adaptar-se a les especificitats de cada ubicació.
2. **Ampliació de l'Ús de Dades Multiespectrals:** L'ús d'una gamma més àmplia de dades multiespectrals, incloent-hi missions satel·litàries amb major resolució espectral o temporal, podria proporcionar informació addicional per millorar la discriminació entre plomes reals de metà i altres anomalies.
3. **Validació en Diversos Entorns:** Realitzar estudis addicionals en diverses ubicacions geogràfiques amb diferents condicions de terreny (urbà, forestal, costaner, marí) ajudaria a validar la robustesa i versatilitat de l'algoritme.
4. **Desenvolupament de Noves Estratègies de Filtratge:** L'optimització de tècniques de filtratge per reduir el soroll en dades satel·litàries, especialment en zones amb alta saturació o condicions visuals complexes, podria millorar encara més els resultats de detecció.

Secció 6. Conclusions

Els resultats obtinguts en les localitzacions seleccionades demostren que l'ús d'informació auxiliar i l'algoritme d'Isolation Forest són eines efectives per millorar la precisió en la detecció de falsos positius als mapes d'increment de concentració de metà. Especialment en zones com els Estats Units, Turkmenistan i Mèxic, l'algoritme ha demostrat una capacitat prometedora per identificar gairebé tots els falsos positius i deixar gran part de la ploma de metà intacta, demostrant així la seva utilitat per a la gestió ambiental i la mitigació de les emissions de metà. No obstant això, els resultats d'altres localitzacions han posat de manifest algunes limitacions que cal abordar. Amb ajustos addicionals i millores, aquest algoritme podria convertir-se en una eina encara més precisa i, així, suposar avanços en la millora de la detecció global d'emissions de metà, contribuint significativament a la lluita contra el canvi climàtic i millorant la gestió d'emissions en infraestructures industrials.

6.1 Bibliografia

[1] Epdata, "Cambio climático: datos y gráficos," [En línia]. Disponible en: <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>. [Data d'accés: Agost 2024].

[2] Agència Europea del Medi Ambient (EEA), "Climate change impacts and vulnerability 2016," [En línia]. Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>. [Data d'accés: Agost 2024].

[3] Saunio, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P. M., Covey, K., Curry, C. L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M. I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K. M., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P. B., Langenfelds, R. L., Laruelle, G. G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., McNorton, J., Miller, P. A., Melton, J. R., Morino, I., Müller, J., Murguía-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R. J., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W. J., Rosentreter, J. A., Segers, A., Simpson, I. J., Shi, H., Smith, S. J., Steele, L. P., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F. N., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T. S., van Weele, M., van der Werf, G. R., Weiss, R. F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q., and Zhuang, Q.: The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>, 2020.

[4] United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition, "Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions," 2021. [En línia]. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>. [Data d'accés: Agost 2024].

[5] Jacob, D. J., Varon, D. J., Cusworth, D. H., Dennison, P. E., Frankenberg, C., Gautam, R., Guanter, L., Kelley, J., McKeever, J., Ott, L. E., Poulter, B., Qu, Z., Thorpe, A. K., Worden, J. R., and Duren, R. M.: Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 9617–9646, <https://doi.org/10.5194/acp-22-9617-2022>, 2022.

[6] Varon, D. J., Jervis, D., McKeever, J., Spence, I., Gains, D., and Jacob, D. J.: High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 2771–2785, <https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021>, 2021.



[7] Gorroño, J., Varon, D. J., Irakulis-Loitxate, I., and Guanter, L.: Understanding the potential of Sentinel-2 for monitoring methane point emissions, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 89–107, <https://doi.org/10.5194/amt-16-89-2023>, 2023.

[8] United Nations Environment Programme, "International Methane Emissions Observatory," [En línia]. Disponible en: <https://www.unep.org/topics/energy/methane/international-methane-emissions-observatory>. [Data d'accés: Agost 2024].

[9] EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>, Sinergise Solutions d.o.o., a Planet Labs company. Disponible en: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. [Data d'accés: Agost 2024].

[10] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R.: Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27, 2017.