



This is the **published version** of the bachelor thesis:

Contreras Rafanell, Àngel; Mijares Verdú, Sebastià, tut. Algoritmos de compresión de datos de satélites de observación de la Tierra. 2025. (Enginyeria Informàtica)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/317537>

under the terms of the  license

Estudi de mètodes de compressió a satèl·lits

Àngel Contreras Rafanell

30 de juny de 2025

Resum– Aquest treball de fi de grau mostra un estudi dels mètodes de compressió d'imatges utilitzats en satèl·lits d'observació de la Terra. S'expliquen diferents tècniques existents, com ara la Transformada del Cosinus Discreta (DCT), la Transformada Wavelet Discreta (DWT), el DPCM (Differential Pulse Code Modulation) i altres algorismes de codificació. També s'estudia la relació entre les característiques dels satèl·lits, com el tipus de sensor, la resolució de les imatges, la capacitat de transmissió de dades i les limitacions de hardware, i l'elecció del mètode de compressió. S'han formulat certes hipòtesis que han passat un procés de verificació o refutació. Una d'aquestes és l'ús del mètode de compressió BAQ en dades SAR. Una altra és que el DWT té un millor comportament amb dades pancromàtiques i multiespectrals, però té un cost computacional superior. Entre d'altres hipòtesis.

Paraules clau– Compressió d'imatges, satèl·lits d'observació de la Terra, compressió sense pèrdua, compressió amb pèrdua, sensors òptics i SAR, transformada wavelet, DCT, DPCM i predictors.

Abstract– This final degree project presents a study of image compression methods used in Earth observation satellites. Various existing techniques are explained, such as the Discrete Cosine Transform (DCT), the Discrete Wavelet Transform (DWT), Differential Pulse Code Modulation (DPCM), and other coding algorithms. The study also examines the relationship between satellite characteristics—such as sensor type, image resolution, data transmission capacity, and hardware limitations, and the choice of compression method.

Several hypotheses have been formulated and subjected to a process of verification or refutation. One of these concerns the use of the BAQ compression method for SAR data. Another hypothesis suggests that DWT performs better with panchromatic and multispectral data, although it has a higher computational cost. These are just some of the hypotheses explored in the work.

Keywords– Image compression, Earth observation satellites, lossless compression, lossy compression, optical and SAR sensors, wavelet transform, DCT, DPCM, predictors



1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

DES de 1959, amb el llançament del satèl·lit Vanguard 2 fins a dia d'avui, s'han anat enviant satèl·lits d'observació de la Terra (EO). Aquests han tingut diversos objectius i han estat impulsats per diferents promotors. Des d'una perspectiva científica, s'han utilitzat per a estudis de la vegetació, el desglaç, els canvis de temperatura del mar, anàlisis geològics i la recerca de minerals, així com per a finalitats meteorològiques. Per altra banda, en l'àmbit privat i governamental, s'ha

utilitzat com a eina per a la gestió de desastres naturals, la construcció d'infraestructures, la cartografia terrestre (com Google Maps), la detecció d'il·legalitats (per exemple, plantacions il·legals), i per a usos militars i d'espionatge.

Per tal de complir els diferents objectius, aquests satèl·lits capturaven diferents tipus d'imatges: Des de pancromàtiques, multiespectrals, hiperspectral i fins a imatges radar. Aquest tipus s'explicaran amb més detall posteriorment.

Els satèl·lits d'observació necessiten enviar les imatges i les dades que generen. Aquesta necessitat sorgeix perquè estan constantment capturant imatges que abasten extensions de quilòmetres, amb resolucions de metres (i algunes de centímetres), la qual cosa genera un gran nombre de píxels. A més, cada píxel se sol representar amb 8-15 bits, donant com a resultat imatges molt pesades.

- E-mail de contacte: angel.contreras@uab.cat
- Menció realitzada: Enginyeria de Tecnologies de la Informació
- Treball tutoritzat per: Sebastià Mijares (Àrea de Ciències de la Computació i Intel·ligència Artificial)
- Curs 2024/25

Cal afegir que no només es generen les dades de la pròpia imatge, sinó que també hi ha metadades, com la calibració del satèl·lit, la seva posició i altres dades que dependran del sensor i de la informació que es vulgui enviar.

El satèl·lit ha d'enviar a la Terra les dades mitjançant antenes. No obstant això, tot i que aquestes solen ser capaces d'enviar les dades a gran velocitat, el gran volum de dades, sumat al fet que alguns satèl·lits només poden transmetre informació en punts específics i durant un temps determinat, fa que sorgeixi la necessitat de reduir les dades a enviar perquè es puguin transmetre totes.

Per dur a terme la reducció de dades, s'utilitzen mètodes de compressió. Aquests són de diferents tipus: des de compressors amb pèrdua o sense pèrdua, fins a compressió fixa o variable. Més endavant, s'analitzaran categories més concretes.

2 OBJECTIUS

Els objectius d'aquest treball, que es van plantejar inicialment, són:

1. Analitzar els mètodes de compressió de dades emprats en la captura d'imatges per satèl·lit, incloent-hi les seves fases i tècniques subjacents.
2. Determinar les raons d'ús dels mètodes de compressió aplicats en els satèl·lits de captura d'imatges, examinant-ne els propòsits i les característiques principals.

3 METODOLOGIA

Aquest projecte s'ha dut a terme seguint una metodologia de desenvolupament en cascada, tot i que algunes tasques s'han executat en paral·lel en determinades etapes, tal com es detallarà a la secció de planificació.

Per assolir els objectius definits, es van establir uns passos generals que, posteriorment, es van utilitzar per definir les tasques a executar, facilitant així la implementació del projecte:

- Buscar missions de satèl·lits d'observació que hagin estat en òrbita, els quals tinguin informació pública sobre els mètodes de compressió.
- De cada satèl·lit recollir informació sobre característiques seves (pes, distància de la terra, nombre de bandes que agafa, dades que agafa, agència/país ...), i mètode de compressió utilitzat i documentar-ho.
- Estudiar els mètodes de compressió de les missions. Mirar tant els seus passos, com les formes de transformar les dades i documentar-ho tot.
- Crear hipòtesis amb totes les dades recol·lectades, per trobar patrons entre les característiques del satèl·lit i els mètodes de compressió.

- Anar hipòtesis per hipòtesis verificant-les, utilitzant investigacions ja fetes, o provant-les al laboratori, fent servir dades i mètodes de compressió reals.

4 ETAPES DEL PROJECTE

Etapa 1 - Plantejament i recerca d'informació (Setm. 1-4):

- Definició dels objectius, metodologia i planificació inicial.
- Cerca de fonts sobre satèl·lits i mètodes de compressió.

Etapa 2 - Recerca i organització de la informació dels satèl·lits (Setm. 4-6)

- Estudi detallat dels satèl·lits seleccionats.
- Inici de l'escriptura de l'article.

Etapa 3 - Recerca sobre mètodes de compressió (Setm. 6-9):

- Estudi tècnic dels mètodes de compressió emprats.
- Ampliació de l'article.

Etapa 4 - Relació entre satèl·lits i compressió (Setm. 9-11):

- Establiment de relacions i patrons entre les dades dels satèl·lits i els sistemes de compressió.
- Documentació i actualització de l'article.

Etapa 5 - Creació d'hipòtesis (Setm. 11-13):

- Elaboració d'hipòtesis a partir de patrons observats, amb suport de documentació i fonts acadèmiques.
- Inclusió a l'article.

Etapa 6 - Verificació d'hipòtesis (Setm. 13-16):

- Validació o refutació de les hipòtesis mitjançant proves, documentació i, si escau, experiments de laboratori. Incorporació dels resultats a l'article.

Etapa 7 - Revisió de l'article (Setm. 16-17):

- Millora de la coherència, estructura i qualitat de l'article final.

5 ESTAT DE L'ART

5.1 Tipus de satèl·lits: Criteris de selecció i anàlisi

Per poder dur a terme aquest projecte, s'han seleccionat diversos satèl·lits d'observació de la Terra. Els criteris d'elecció dels satèl·lits han estat els següents: que fossin d'observació de la Terra, que hi hagués prou informació pública disponible sobre ells, i que se n'hagués trobat el mètode de compressió utilitzat.

Amb aquests criteris s'ha descartat molts satèl·lits pel fet que moltes agències espacials i certes missions, que solen ser molt recents, així com els operats per agències privades, amb objectius militars, governamental o d'espionatge, no donaven la informació necessària.

La informació recollida més rellevant dels satèl·lits es pot trobar a la **Taula 4** (4) al **apèndix**. Aquesta taula ha anat evolucionat durant diverses fases del projecte, ampliant informació, treient alguns satèl·lits, i corregint dades quan ha estat necessari.

A la taula s'hi poden trobar satèl·lits amb sensor que recullen dades radar, pancromàtiques, multiespectrals i hiperespectrals. Alguns d'aquests sensor combinen dos tipus de dades (les combinacions habituals són pancromàtiques/multiespectrals i multiespectrals/hiperespectrals).

Els objectius principals dels satèl·lits estan majoritàriament orientats a la detecció de desastres naturals, a registrar l'evolució de la Terra al llarg dels anys (com ara el desglaç i les temperatures marítimes), la mineria i la cartografia. Cal destacar que, tot i no ser el seu propòsit principal, alguns satèl·lits també tenen una aplicació en defensa. En resum, la majoria estan orientats a la recerca científica, encara que també tenen aplicacions operatives i pràctiques en diversos sectors.

A més de contribuir al coneixement científic sobre el canvi climàtic, molts d'aquests satèl·lits són clau per a la gestió de recursos naturals, l'agricultura de precisió, la planificació urbana, la monitorització de masses forestals i agrícoles, i fins i tot per donar suport a operacions humanitàries en situacions d'emergència, com ara després d'inundacions o terratrèmols.

5.2 Tipus de dades

5.2.1 Sensor Òptics

Per obtenir imatges, els sensors òptics recullen la radiació solar reflectida pels objectes. Depenent dels objectes (material, forma i altres condicions) i les freqüències que li arriben, aquestes es reflectiran o absorbiran de formes diferents. Les freqüències reflectides que li arriben al sensor passaran per filtres de freqüències, que treuen els rangs de freqüència que el sensor no necessita. Després de passar pels filtres, mesuraran l'energia que li arriba. Els sensors poden agafar diferents rangs per separat, obtenint valors diferents per a cada rang de freqüència. Utilitzant conjuntament les dades recollides dels diferents rangs, permet diferenciar objectes, diferents estat del material, o detectar característiques dels objectes. Com per exemple poder detectar minerals, si hi ha humitat en una zona o la salut de la vegetació, entre altres aplicacions. Com els diferents materials reflecteixen i absorbeixen de forma diferent les diferents ones, es poden diferenciar. També els diferents rangs de freqüències que hi han, per si sols donen informació.

Dades pancromàtiques Les dades pancromàtiques s'obtenen a partir d'un ampli rang de freqüència, que cobreix els rangs de vermell, verd i blau. Amb aquestes dades es generen imatges en escala de grisos (de forma col·loquial es diria en blanc i negre, però seria erroni), i no en color, això passa perquè per tenir color fa falta la combinació de com a mínim tres bandes.

Les dades pancromàtiques es generen a partir de la intensitat de llum donada per tot el rang que agafa, que es condensa per ficar-la en un píxel.

Se sol utilitzar perquè té molt bona qualitat espacial en comparació a les altres imatges, els seus usos són per definir el relleu dels objectes que es veuen des de l'espai, com per exemple les cases, carreteres, pobles, vehicles entre d'altres.

Dades multiespectrals Les dades multiespectrals agafen més d'una banda. Encara que no hi ha un consens sobre quin és el límit superior per seguir determinar-ho multiespectrals i no hiperespectrals, però en aquest treball com en molts altres direm que el màxim perseguir considerar-ho multispectral serà que agafin 15 bandes.

Si es vol que tingui color a d'agafar com a mínim una banda que estigui en el rang del color vermell, un altre en el verd i una en el blau, com el RGB. Aquestes imatges estaran formades per diverses capes, tantes com bandes s'agin agafat. Ara gràcies a tenir més d'una banda, podem tenir color, però també podem tenir moltes més propietats útils a l'agricultura com la detecció del tipus de cultiu, si està fent la fotosíntesi, o la quantitat d'aigua. Tot això ens ho donaran diverses bandes, o fórmules que combini les dades de diverses bandes.

Dades hiperespectral Amb les dades hiperespectrals tampoc hi ha un consens sobre el nombre mínim de bandes que ha de tenir, encara que el més normal és trobar sensors amb més de 100 bandes, molt més estretes i abastant més espectre de freqüències. Això els permet tenir molta més informació, poden distingir els objectes i els fenòmens naturals amb molta més precisió, que les multiespectrals. Ja que hi ha minerals que utilitzant un sensor multiespectral no s'arriba a diferenciar entre ells.

Comparativa Les pancromàtiques solen tenir més resolució a causa de diversos motius, un és perquè solen tenir menys dades que guardar només tenen files i columnes, mentre les multiespectrals i hiperespectrals tenen les bandes, fent que es pugui utilitzar més píxels. També perquè les pancromàtiques tenen l'espectre de freqüència més gran permeten més llum, i degut això, en tenir més llum (més potència) la relació senyal soroll és més gran que en altres, fent que puguin ficar més píxels sense afectar a la qualitat.

5.2.2 Radar

Les imatges radar, són generades per sensors que llencen polsos d'energia (ones de ràdio), els quals reboten, i poden obtenir l'energia rebuda. L'energia retornada dependrà de

la inclinació, la rugositat del material i del tipus de material. Guardara l'amplitud i la fase. Les imatges radar no tenen color com podrien tenir algunes de les imatges fetes amb sensors òptics.

5.3 Algorismes de compressió

5.3.1 Mètodes de quantització

Quantificació adaptativa de blocs El mètode de Quantificació Adaptativa de Blocs (BAQ) és un algorisme de compressió que comença separant les dades en blocs, i per a cada bloc es mira una estadística. A partir de l'estadística que pot ser la variància del bloc, es normalitzen les dades del bloc, i es quantifica cada mostra. Depenent del nivell del BAQ aplicat que pot ser 2, 4, 8 o més, farà que cada valor normalitzat s'ajusti millor a un dels nivells. Per exemple si té 2 nivells, vol dir que el valor normalitzar serà un dels dos, i serà el que s'acosti més. Després a l'hora de descodificar, tindrem l'estadística i el nivell en què està cada valor del bloc, i anirem recuperant els valors (no seran exactes perquè hi ha hagut una pèrdua). [19]

També hi ha modificacions del BAQ, com el FDBAQ, el qual s'ajusta millor a les dades que poden tenir contrastos. Ara igual que havans se separa en blocs, i igual que havans s'escollirà una estadística, però també s'escollirà els nivells que tindrà el BAQ, si les dades són molt iguals s'escollirà un amb baix nivell, però si són molt diferents un amb molts nivells perquè així es podrà ajustar millor. Ara donarà l'estadística i el BAQ utilitzat per a cada bloc, per descodificar. [13]

5.3.2 Mètodes de transformades

DCT Per a la Transformada del Cosinus Discreta (DCT) bàsica, s'utilitza la fórmula de DCT-2D. No obstant això, en el cas del DCT amb quantificació escalar uniforme i codi de mida variable, com és el cas del sistema utilitzat pel satèl·lit SPOT-5, el procés és una mica més complex.

El procés comença dividint la imatge en blocs, habitualment de 8×8 píxels. Per a cada bloc, es calcula la quantitat d'informació continguda. Aquest valor, juntament amb la capacitat actual del buffer de sortida i la taxa de compressió desitjada, permet seleccionar un factor de quantificació adequat per a cada bloc. Abans de la quantificació, les dades del bloc passen per la transformada DCT-2D, que converteix els valors espacials en coeficients de freqüència.

Un cop aplicada la quantificació, els coeficients resultants són codificats mitjançant l'algoritme de Rice, que és especialment eficient per a seqüències de residus petits. Aquest mètode permet aconseguir una bona relació entre qualitat i taxa de compressió, essent especialment útil en entorns amb limitacions de recursos computacionals. [21]

DWT Els mètodes basats en la Transformada Wavelet Discreta (DWT) són àmpliament utilitzats en sistemes de compressió d'imatges en satèl·lits. Tant el standard CCSDS 122.0-B-2 com el JPEG 2000, així com algunes de les seves adaptacions, fan servir aquesta transformada com a

pas fonamental.

El procés del CCSDS 122.0-B-2 i del JPEG 2000 es, aplicar la transformada wavelet, els coeficients obtinguts són processats mitjançant un codificador de plans de bits (bit plane encoder), que pot ser tant amb pèrdues com sense pèrdues. Tant el JPEG 2000 com CCSDS 122.0-B-2, inclouen extensions per treballar amb dades tridimensionals, fet que el fa especialment útil per a aplicacions multispectral o hiperspectral, on es combinen múltiples bandes espectrals. El JPEG 2000 té la extensió JP3D (JPEG 2000 Part 10) la qual fa una transformada wavelet en 3 dimensions. El CCSDS 122.0-B-2 té l'estàndard CCSDS 122.1-B-1 el qual és una extensió que mostra diferents tècniques per pre-processar les dades i reduir la redundància de les dades multispectrals i hiperspectrals, per després millorar la compressió d'aquestes dades.

La primera fase consisteix en aplicar la transformada wavelet a la imatge, descomponent-la en diferents nivells d'escala i direcció. A continuació, es realitza una etapa de quantificació (opcional) i codificació basada en planes de bits.

5.3.3 Mètodes de predicció

Modulació Diferencial per Impulsos Codificats El mètode Modulació Diferencial per Impulsos Codificats (DPCM) és un algoritme de compressió predictiu. El seu funcionament bàsic consisteix a restar el valor actual del píxel amb un valor predit a partir de píxels veïns, quantificar aquesta diferència i codificar-la.

Aquest mètode va ser utilitzat pel satèl·lit SPOT-4, degut a les limitacions de hardware disponibles. L'algoritme només requereix tres operacions bàsiques de mitjana, per píxel predit. El procés segueix una seqüència específica:

Es parteix d'un valor de referència R_i . Seguit per els dos valors adjacents A i B, i després el segon valor de referència R_{i+1} : ... | R_i | A | B | R_{i+1} | ...

Es calcula $P = \lceil \frac{R_i}{2} \rceil + \lceil \frac{R_{i+1}}{2} \rceil$.

Les prediccions per A i B es calculen com:

$$\begin{cases} \text{Predicció del píxel } A_p = A - P \\ \text{Predicció del píxel } B_p = B - P \end{cases}$$

Els valors de referència es mantenen iguals. Es segueix amb la seqüència on el nou R_i esdevé R_{i+1} . El cicle continua avançant a través de la imatge.

Aquest mètode permet una implementació senzilla i eficient en sistemes amb recursos limitats.

Sistema ràpid de compressió d'imatges sense pèrdua

Sistema ràpid de compressió d'imatges sense pèrdua (FELICS) és un mètode de compressió sense pèrdues que ofereix ràtios de compressió similars als del JPEG-LS, tot i no utilitzar les mateixes tècniques. És conegut per ser fins i tot cinc vegades més ràpid que altres mètodes equivalents.

El sistema utilitza una estratègia de predicció combinada amb codificació binària ajustada, incloent-hi codis de

Golomb-Rice. Processa la imatge seguint un patró de tipus raster-scan (escaneig de la imatge per files, d'esquerra a dreta), exceptuant els píxels de la primera fila i el primer píxel de cada fila (pel fet que no es pot fer la predicció d'aquests píxels).

El procés de predicció es basa en agafar els píxels immediatament superior (N_1) i esquerre (N_2) del píxel actual (P). Es defineix $H = \max(N_1, N_2)$ i $L = \min(N_1, N_2)$, i es calcula $A = H - L$.

Es fa servir un bit per indicar si el píxel actual està dins o fora del rang $[L, H]$.

Si hi és dintre: Es transmet el bit indicant-ho que està dintre. Es calcula $V = P - L$.

El valor V es codifica segons amb unes taules predefinides, que tenen la mida A . El qual tindrà $\log_2(A + 1)$ bits. Si el nombre de bits no és enter. Els valors més allunyats del centre s'assignarà més bits.

Si el píxel està fora del rang: S'afegirà un altre bit, un indica que està fora i l'altre especifica si és inferior a L o superior a H . El valor predit dependrà si està a sobre o per sota:

$$\begin{cases} \text{Si és inferior a } L: L - P - 1 \\ \text{Si és superior a } H: P - H - 1 \end{cases} \quad \text{EL valor es codifica amb un codi de Golomb-Rice.}$$

Aquesta flexibilitat li permet assolir bones taxes de compressió mantenint una velocitat elevada. [15]

5.3.4 Mètodes de codificació

Rice L'algorisme de codificació de Rice és una variant simplificada de la codificació de Golomb, molt utilitzada en compressió d'imatges per a dades residuals, especialment en entorns espacials com els satèl·lits com per exemple l'estàndard CCSDS 121.0-B-3.

Funciona escollint un paràmetre M , que dividirà el valor a codificar. El quocient es codifica mitjançant codificació unària, mentre que el residu es codifica amb un codi truncat

El procés comença amb un predictor, normalment basat en la diferència amb el píxel anterior. Posteriorment, es fa un mapeig que converteix nombres negatius en positius, fent que els positius siguin parells i els negatius senars, ja que el codificador Rice funciona només amb nombres enters positius. Per exemple, un nombre negatiu $-x$ es converteix en $2 * |x| - 1$ i un positiu x en $2 * x$, permetent gestionar-ho de manera unificada.

Un cop preparat els valor a codificar, l'algoritme prova diversos valors de M (generalment de 0 a 12) i selecciona el que produeix millor compressió. Els bits menys significatius es deixen tal com són, mentre que els més significatius es codifiquen amb un codi de coma (comma code). [25]

6 RELACIONS ENTRE SATELITES I MÈTODES, I COSES QUE TENIR EN COMPTE

En aquest apartat es mostraran un conjunt de evidències. Aquestes evidències serveixen per poder plantejar la hipòtesis amb una cerata base.

6.0.1 Evidència 1

La relació més evident que podem observar és que els sensors que utilitzen radar sempre fan servir el mètode BAQ o algun derivat d'aquest (en els casos que s'han pogut analitzar).

6.0.2 Evidència 2

Un altre detall és que el satèl·lit *WorldView-1* té molta memòria i, encara que tingui una resolució de 0,5 m, presenta un *swath* de 17,9 km. Això fa que, si fem $17,9 \text{ km} / 0,5 \text{ m} = 35.800$ píxels d'amplada, i suposem que les escenes són quadrades, tindríem $35.800^2 \times 11$ bits, és a dir, uns 1,762 Gb. Aquesta mida és bastant habitual per una imatge de satèl·lit.

Però la clau és que es vol transmetre en temps real. Per això disposa d'una molt bona velocitat de transmissió, i es busca un compressor ràpid i simple per tal d'enviar la imatge el més ràpidament possible.

Curiosament, l'estàndard *CCSDS 122.0-B-2* és un compressor 2D, però s'aplica a dades multiespectrals i hiperespectrals, com en el cas del satèl·lit *EnMap*, que utilitza aquest compressor per a cada banda per separat, tot i que això és ineficient. Tot això sense aplicar el preprocesament del *CCSDS 122.1-B-1*, que ajudaria a millorar la compressió. Pot ser que no aplica aquest preprocesament degut al cost de processament que afegiria.

Mirant les especificacions del *Enmap*, veiem que cada dia agafa 5000 km, i que l'amplada és de 30 km on cada píxel és de 30 m x 30 m, amb 14 bits per píxel i 246 bandes. Això ens dona 574 Gbits per dia, i aplicant la compressió d'1.6 obtenim 358,75 Gbits. Si ho dividim per la capacitat de transmissió que és de 320 Mbit/s obtenim que pot transmetre totes les dades en aproximadament 19 minuts. Tenint suficient marge perquè cada dia pot transmetre durant 30 minuts.

6.0.3 Evidència 3

També el satèl·lit *SPOT-4* utilitza un compressor amb predictor, un *DPCM*, però els motius són que es buscava un compressor senzill, amb només dues instruccions, a causa de limitacions de *hardware*. La relació entre els dos satèl·lits és la cerca d'un compressor simple, amb poc cost computacional, ja sigui per limitacions de maquinari o per restriccions de temps. Tots dos han utilitzat derivacions del *DPCM*.

6.0.4 Evidència 5

El mètode de compressió del *SPOT-5* és una DCT variable, amb una ràtio de compressió entre 2,2 i 2,8, mentre que la del *SPOT-4* era d'1,33. Això és perquè generava imatges més pesades que el *SPOT-4*, degut a la seva major resolució. No obstant això, tenien el problema de la velocitat màxima per enviar dades a les centrals, que era de 50 Mb/s. Per això, van instal·lar dues antenes i van millorar el compressor.

Una suposició és que segurament ja no tenien tant el problema que tenia el *SPOT-4*, que requeria un compressor

amb poques capacitats de computació.

També, com explica l'article [20], el *SPOT-5* tenia el doble de resolució que el *SPOT-4*. En lloc de 10 m de resolució, tenia 5 m en pancromàtica, i en la multiespectrals, en lloc de 20 m tenia 10 m. Això feia que es quadruplicava la quantitat d'informació (128 Mbit/s en lloc de 32 Mbit/s per a cada instrument).

Amb aquestes dades, i tenint en compte que l'antena havia de ser de 50 Mb/s per mantenir la compatibilitat, calia un mètode de compressió. Tot i que es podien ajuntar dues antenes per arribar a 100 Mb/s, la generació de dades era de 256 Mbit/s, sense comptar altres dades a part de les imatges.

Si només considerem les dades generades per enviar amb 100 Mb/s, que era l'objectiu, la taxa de compressió havia de ser de $256/100 = 2,56$. Per tenir més marge i poder enviar altres dades, es volia un compressor amb un ratio de 2,82. Finalment, van aconseguir un compressor amb una compressió entre 2,28 i 2,8.

També vaig notar que en les cinc propostes no n'hi havia cap de basat en *wavelet*, ja que deien que no complia els requisits per ser massa complex d'aplicar.

A més, l'algorisme que estandarditza la tècnica *wavelet*, el *JPEG 2000*, encara s'estava desenvolupant l'any 1998.

6.0.5 Evidència 6

Les tècniques de *wavelet* (DWT, JPEG 2000 o CCSDS 122.0-B-2) són les més comunes des del 2011, com podem veure al nostre registre de la taula, amb el cas del *Pléiades*. Abans d'aquestes, és difícil trobar un satèl·lit que utilitzés *wavelets*. Això pot ser degut al fet que, en general, els mètodes basats en DCT i predicció solen tenir menys complexitat, cosa que els fa més adequats per a les possibles limitacions de hardware, com es pot veure en el cas del paper del *SPOT-5*.

6.0.6 Evidència 7

El fet que la majoria de satèl·lits més nous que tenim a la taula (4) facin servir tècniques amb més complexitat es pot deduir pel que ha anat sortint durant la recerca: la predicció és, en general, menys complexa que el DCT. El DCT sol ser un algorisme amb millor compressió, però també és més exigent computacionalment. A més, veient que es descarten tècniques com les *wavelet* (com en el cas del *SPOT-5*), podem suposar que el DCT és menys complex que el DWT.

Si mirem els valors de compressió dels satèl·lits, el *SPOT-4*, que utilitzava DPCM (predicció), tenia una compressió de 1,33, que era just el que buscaven. En canvi, el DCT del *SPOT-5* arribava a 2,8, i el JPEG 2000 del *Pléiades HR* arriba fins a 4,8.

Tot i això, hem de tenir en compte que no tots els mètodes basats en predicció tenen una compressió baixa; per exemple, en l'*ALOS-3*, el sensor *HISUI* utilitza predicció i tot i així aconsegueix un CR de 3,3.

No incloc els hiperespectrals, ja que el satèl·lit *EnMap* utilitza CCSDS 122.0-B-2 per a cada banda. Al ser un satèl·lit hiperespectral i usar un compressor que no aprofita les relacions entre bandes, acaba tenint un CR de només 1,6.

7 HIPOTESIS

- En les satèl·lits que utilitzen sensor SAR, s'escolleixen BAQ.
 - Evidència 1
- Ajustament del rati de compressió a la capacitat de transmissió
 - Evidència 2
 - Evidència 5
- Complexitat dels algorismes ha anat creixent al llarg del temps
 - Evidència 3
 - Evidència 5
- Els mètodes basats en wavelet tenen més complexitat però donen millors resultats de compressió les prediccions i el DCT, en les imatges multiespectrals.
 - Evidència 6
 - Evidència 7

8 AVALUACIÓ D'HIPÒTESIS

8.1 En les satèl·lits que utilitzen sensor SAR, s'escolleix BAQ

Fent una cerca superficial de satèl·lits que utilitzen sensors SAR, hem obtingut la següent llista (excloent els ja trobats i els que no especifiquen el seu mètode de compressió): TerraSAR-X, TanDEM-X, RADARSAT-2, SAOCOM 1, PAZ, Kompsat-5, Gaofen-3 i NovaSar-1.

Dels satèl·lits identificats, tots fan servir el BAQ com a mètode de compressió. Amb aquesta informació, hem corroborat la hipòtesi, però no l'hem pogut verificar definitivament.

Es tracta d'una hipòtesi que, a nivell pràctic, no es pot verificar plenament, però sí que pot ser refutada si es troben excepcions.

Per poder-la considerar verificada, caldria justificar teòricament per què el BAQ és un bon mètode de compressió per a dades SAR, anant més enllà de l'observació empírica.

Com diu l'article [17], les dades SAR són molt pesades, fent que per poder transmetre-les faci falta un pas de quantització. Com que les dades SAR són echos que reboten sobre les superfícies, representen la forma del terreny [3], solen seguir algunes distribucions entre les dades més pròximes, sovint gaussianes.

Tenint aquesta informació, es pot veure que el BAQ és un bon mètode de compressió per aquestes dades. Primer perquè agafa les dades per blocs, les quals són dades que estan més relacionades i és més probable que segueixin una distribució. D'aquestes dades se'n fa una quantificació, però no pas amb valors genèrics, sinó amb valors relacionats amb l'estadística. On l'estadística, com ja hem mencionat en explicar el BAQ, s'obté a partir de les dades d'aquell bloc.

Tanmateix, també s'ha trobat un article que indica que el satèl·lit EO-ALERT [22] utilitza el compressor CCSDS-123.0-B (predictor) per comprimir les dades SAR. Aquest

satèl·lit no té un sensor propi com els satèl·lits mostrats anteriorment, sinó que rep dades d'altres satèl·lits per enviar-les a la Terra. Pot enviar tant dades òptiques com SAR.

L'article fa una comparació entre el CCSDS-123.0-B i el BAQ bàsic. En la comparació es mostra que, encara que siguin molt semblants, el CCSDS-123.0-B és superior, utilitzant com a mètrica el SNR (relació senyal-soroll), que es calcula fent la divisió de la variància de la imatge original dividida per la variància de l'error (imatge original menys reconstruïda), i després s'aplica el logaritme de 10 multiplicat per 10.

Tot i això, cal remarcar que per fer la comparació no s'utilitza una versió adaptada del BAQ, sinó només la versió bàsica. Les adaptacions del BAQ són les que realment s'utilitzen als satèl·lits SAR i milloren notablement el SNR.

Per concloure amb aquesta hipòtesi, podem veure que per als satèl·lits exclusius de tipus SAR, s'utilitza el BAQ i les seves adaptacions. No obstant això, comencen a aparèixer casos on s'utilitzen altres compressors que poden oferir resultats igual o més bons que el BAQ. Per això, es rebutja la hipòtesi inicial.

8.2 Ajustament del rati de compressió a la capacitat de transmissió

A la taula 1 (1) es pot veure alguns dels satèl·lits que havíem trobat. S'hi mostra la capacitat del canal, la ràtio de compressió i la quantitat màxima de dades que poden generar els sensors d'aquests satèl·lits. La capacitat del canal es refereix a les dades que pot enviar l'antena per segon. Cal destacar que no s'han pogut obtenir totes les dades d'alguns satèl·lits, i per això no apareixen tots a la taula.

La taula també inclou dues columnes addicionals. Una d'elles mostra la diferència entre les dades del canal i les generades aplicant la compressió, calculada amb la fórmula inferior. L'altra columna indica el percentatge de no utilització del canal, és a dir, el percentatge de dades que caldrien per assolir la capacitat màxima de transmissió.

$$\text{Diferència} = \text{Capacitat del canal} - \frac{\text{Generació de dades}}{\text{Rati de compressió}}$$

Analitzant la taula 1 (1) podem veure que en alguns satèl·lits sí que es compleix la hipòtesi com és el cas del Cosmos-Skynet, Spot 4, Spot 5 i el Sentinel 1, que tenen petits marges. En canvi, el Sentinel 2 i el Pleiades-HR presenten un marge molt gran.

Amb aquesta informació podem deduir que hi ha certa relació, però la capacitat del canal i les dades generades no són els únics factors que determinen la ràtio de compressió.

8.3 Complexitat dels algorismes ha anat creixent al llarg del temps

Un dels majors problemes que tenen a l'hora de crear un satèl·lit i ficar-ho en òrbita, és el que el satèl·lit no pot ser ni molt pesat ni de grans dimensions, degut a que contra més pesat o dimensionat més hauran de pagar pel llançament. Fent que l'espai que poden utilitzar, tant pel hardware de la computació, les antenes, els sensors entre altres, hagin de ser el més reduït possible.

També que el hardware que utilitzen per a la computació són rad-hard, que vol dir que són components que tenen més resistència a la radiació que els components COTS (Commercial Off-The-Shelf). Hi ha un trade-off entre poder ser resistent a la radiació i ser eficients. Al ser menys eficients, es necessiten més components per arribar a la capacitat de computació que es vol.

Amb això explicat es pot veure que els dissenyadors dels satèl·lits han de fer un bon balanceig entre el nivell de computació que volen, i l'espai que poden disposar per aquests components.

I contra més computació més complex pot ser l'algorisme a utilitzar.

Per poder demostrar l'hipòtesi, podem veure que han anat millorant els microprocessadors, al llarg del temps, i així veure que aquests tenen millor rendiment.

Utilitzant una gràfica obtinguda d'una presentació de la NASA (1). Ens mostra que com ja havíem dit els processadors comercials (COTS) van més avançats que els rad-hard, a nivell de rendiment. També ens mostra que hi ha la millora que hem explicat.

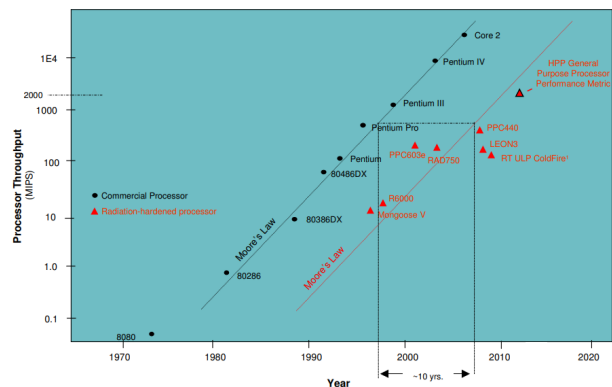


Fig. 1: Gràfica del creixement del rendiment al llarg dels anys [18]

8.4 Els mètodes basats en wavelet tenen més complexitat però donen millors resultats de compressió les prediccions i el DCT, en les imatges muliespectrals.

Els mètodes basats en wavelet (DWT) solen tenir una complexitat computacional superior respecte als basats en predictors o en DCT, però també tendeixen a oferir millors taxes de compressió, especialment en imatges muliespectrals. Aquesta hipòtesi s'ha volgut comprovar mitjançant una comparativa experimental entre tres algorismes diferents.

Per verificar aquesta hipòtesi, s'ha preparat un experiment on es fa compressió amb pèrdua i sense pèrdua amb tres mètodes de compressió: un predictor, un basat en DWT i un altre en DCT.

Predictor: - Sense pèrdua: S'utilitza el compressor del GI-CI EMPORDA (CCSDS 123.0-B-1).

- Amb pèrdua: Es quantitzen les dades perquè tinguin un cert BPS, i després s'aplica el compressor EMPORDA.

DWT: - Sense pèrdua: S'utilitza el compressor del GICI TER (CCSDS 122.0-B-1), en mode sense pèrdua.

- Amb pèrdua: S'utilitza el compressor del GICI TER, en mode amb pèrdua, i amb un BPS especificat.

DCT: - Sense pèrdua: S'utilitza un compressor personalitzat desenvolupat amb Python, que aplica la DCT per a cada banda per separat i codifica els coeficients amb Huffman.

- Amb pèrdua: Es quantitzen les dades per assolir un BPS concret, i després s'aplica el compressor personalitzat.

8.4.1 Dades utilitzades

Per dur a terme l'experiment, s'han utilitzat dues imatges:

1. Una imatge del satèl·lit Sentinel-2, amb 8 bandes, assignant-li un BPS de 4.1, que és el valor habitual d'aquest tipus d'imatges.

- Fitxer: T31TCG_20230907T104629.5.8_512_512_2_1_0.raw

2. Una imatge del satèl·lit Landsat 8, amb un BPS de 8, ja que cada mostra té 16 bits i el compressor utilitzat té una relació de compressió de 2:1.

- Fitxer: LC08_L1GT_001075_20150324_20170411_01_T2_b1-7.7_4096_4096_2_1_0.raw

8.4.2 Resultats obtinguts

Amb un programa de pythom hem plantejat tots els casos, i ens ha donat la taula 2 (2) per a la primera imatge i la taula 3 (3) per a la segona imatge.

Amb les dades obtingudes, podem observar certa informació destacable a les taules:

Quan es fa la compressió **sense pèrdua**, el predictor és el que ofereix millors resultats de compressió, encara que no sigui el més ràpid. Això posa en dubte la hipòtesi inicial que afirma que el DCT sempre té més complexitat computacional que els predictors, i també la que diu que el predictor és el que menys compressió fa.

Si analitzem els resultats **amb pèrdua**, podem veure que, amb el mateix BPS i ràtio de compressió, el DWT és el que ofereix millor qualitat, cosa reflectida pel seu alt PSNR. També es pot observar que és el que triga més, mostrant una complexitat computacional més elevada. Tot i això, no es compleix la idea que el DCT tingui millors resultats ni que sigui més complex; passa just el contrari.

Una altra observació important és que el DWT ha estat molt més costós computacionalment que els altres dos mètodes, especialment en la imatge Landsat, que és molt més gran.

Podem concloure que sí que es compleix la hipòtesi que diu que el DWT proporciona millors resultats de compressió però amb una complexitat computacional superior, però només en el cas de compressió amb pèrdua. En canvi, en el cas de sense pèrdua, això no queda del tot clar.

També cal tenir en compte que l'algorisme de DCT aplicat no és un algorisme professional com el TER o l'EMPORDA, sinó que és un compressor personalitzat desenvolupat amb Python. Això fa que no estigui pensat es-

pecíficament per a dades espacials i pot tenir un rendiment significativament inferior al d'un compressor formal.

9 CONCLUSIONS

Les hipòtesis plantejades originalment han resultat ser massa universals, la qual cosa ha dificultat que es puguin acceptar completament, tot i que sí que contenen certs punts vàlids.

Fent una revisió dels satèl·lits, dels mètodes de compressió que utilitzen i de les hipòtesis creades, hem observat que els satèl·lits amb sensors de radar, com el Sentinel-1, el COSMO-SkyMed i l'ALOS-3, utilitzen BAQ com a compressor. La raó és que, durant molts anys, BAQ ha estat el compressor per defecte per a les dades de radar. Aquesta elecció s'explica perquè les dades de radar solen tenir una distribució gaussiana, i el BAQ aprofita aquesta característica mitjançant la partició de blocs i la quantificació adaptada a les estadístiques.

No obstant això, s'estan buscant substituïts. Per exemple, el satèl·lit EO-ALERT, que en el seu cas concret necessitava comprimir dades òptiques i SAR, utilitza CCSDS-123.0-B. Aquest mètode proporciona resultats molt similars al BAQ bàsic en dades SAR. Malgrat això, no s'ha comparat amb les adaptacions del BAQ, que són les que s'acostumen a utilitzar, la qual cosa impedeix afirmar que el CCSDS-123.0-B vagi a substituir el BAQ.

No obstant, en el cas concret de l'EO-ALERT, la seva elecció s'entén. En conclusió, es podria dir que el BAQ i les seves adaptacions segueixen sent la millor opció si només es volen comprimir dades SAR, però la tendència futura suggereix que aquesta hipòtesi no es pot garantir a llarg termini.

La segona hipòtesi va sorgir per les observacions del WorldView-1, l'EnMAP, el SPOT-4 i el SPOT-5. El WorldView-1 generava força dades i les enviava bastant ràpid, utilitzant un compressor predictor (ADPCM) que és bastant senzill. Tot això era per la motivació d'enviar les dades en temps real.

L'EnMAP utilitzava un compressor que, d'entrada, semblava estrany d'utilitzar, ja que aplicava un compressor de 2 dimensions a dades de moltes bandes. Això feia que no s'aprofitessin totes les correlacions. Si mirem les dades que genera en tot un dia i la velocitat de transmissió, s'hi podia veure una relació. Aquesta encaixava el temps total per enviar les dades amb el temps màxim que tenia per fer-ho. Això vol dir que no necessitava un compressor amb una ràtio de compressió molt alta.

Quant als SPOT-4 i SPOT-5, com diuen els articles [20] sobre la seva elecció, estaven condicionats per la capacitat de transmissió. Amb totes aquestes observacions, es va crear la hipòtesi que la ràtio de compressió desitjada pels satèl·lits estava condicionada per la capacitat de transmissió. Encara que una millor hipòtesi hauria implicat més factors, com la memòria a bord, cada quant poden enviar les dades i quant de temps poden fer-ho. Incloure tants factors hauria estat molt complicat, a causa de la dificultat de trobar informació.

Si mirem el resultat de la verificació de la hipòtesi, la majoria de satèl·lits seleccionats la compleixen. N'hi ha dos, com el Sentinel-2 i el Pleiades-HR, que tenen marges més grans. Això ens indica que la hipòtesi no està desencaminada, però no és del tot completa, indicant que hi puguin haver més factors que afectin el mètode de compressió seleccionat.

En la tercera hipòtesi, hem investigat si la complexitat dels algorismes de compressió ha anat creixent al llarg dels anys. Aquesta hipòtesi sorgeix per l'observació dels satèl·lits SPOT-4 i SPOT-5. En diversos articles [20] es comentava la motivació darrere l'elecció dels seus algorismes: el SPOT-4 utilitzava un DPCM de tres operacions, mentre que el SPOT-5 emprava un DCT variable, molt més complex. Per al SPOT-4, una de les motivacions era la necessitat d'un compressor de poca complexitat perquè s'adaptés al hardware disponible. El SPOT-5, en canvi, no tenia aquesta mateixa limitació.

Per aquest motiu, la verificació d'aquesta hipòtesi se centra a comprovar la millora dels components de hardware en l'àmbit espacial. Fet que es demostra, però amb algunes mancances, ja que les dades són antigues. Això fa que no es pugui afirmar que en l'actualitat segueixi passant. Tampoc s'ha demostrat que els algorismes hagin augmentat la complexitat; l'únic cas que he trobat ha estat el mencionat del SPOT-4 i SPOT-5. Mirant tot el progrés dels compressors, es podria dir que hi ha hagut un salt, però si ens centrem en els últims anys, això no s'ha verificat.

La quarta hipòtesi afirmava que els mètodes basats en la Transformada Wavelet Discreta (DWT) eren més complexos, però comprimien millor que la Transformada del Cosinus Discreta (DCT), i que aquesta era, al seu torn, més complexa però amb una millor ràtio de compressió que els predictors. Aquesta hipòtesi va sorgir perquè en articles com el del SPOT-5 es mencionava no utilitzar mètodes amb DWT, ja que tenien més complexitat (l'article és anterior al JPEG 2000 i al CCSDS 122.0-B-2) que la DCT. A més, es buscava una millor compressió que la que ofería un predictor com el del SPOT-4. També, a partir del 2011 (segons les dades recollides dels satèl·lits), els satèl·lits van començar a utilitzar la DWT en comptes de la DCT, cosa que feia pensar en una millora respecte a la DCT. Com que en complexitat no seria degut al que deia l'article del SPOT-5, havia de ser que tenia millor compressió. Això es recolzava també en la ràtio de compressió del Pleiades-HR, que era de 4.8, en comparació amb la del SPOT-5, que era de 2.8.

Per comprovar la hipòtesi, es van utilitzar tres compressors: el TER, que realitza la compressió CCSDS 122.0-B-2; EMPORDA, un predictor; i un DCT personalitzat fet en Python. Vam emprar dues imatges multiespectrals de diferents mides: una del Sentinel-2 de 512512 píxels amb 8 bandes, i una del Landsat-8 de 40964096 píxels amb 7 bandes.

Es van dur a terme dos experiments amb cada imatge: un processant-les amb pèrdua, ajustant-les als bits per sample (BPS) amb què comprimien els satèl·lits reals, i un altre

sense pèrdua. Com que el predictor i el DCT no tenien un mode de compressió amb pèrdua, es va haver d'utilitzar una quantificació personalitzada, ajustant-la als BPS dels satèl·lits.

Com a resultats, vam veure que, si la compressió era amb pèrdua, la hipòtesi es verificava amb el DWT, ja que ofería una millor compressió (més qualitat), però tardava més. En l'experiment sense pèrdua no es complia, ja que el predictor era més ràpid i comprimia millor. Les dades del DCT no són gaire bones, ja que el compressor implementat no està optimitzat ni segueix cap estàndard per a la compressió espacial. En conclusió, podríem dir que la hipòtesi es compleix a mitges.

Aquest projecte a ajudat a donar una visió de tot el context de la compressió de dades al espai. Encara que no s'hagi aconseguit obtenir els motius concrets que hi ha a l'hora d'escollir un compressor, sí que ha estat un projecte que s'ha pogut veure els reptes que hi ha a l'hora de transmetre les dades.

Aquest projecte ha ajudat a donar una visió de tot el context de la compressió de dades a l'espai. Encara que no s'hagin pogut obtenir els motius concrets que hi ha a l'hora d'escollir un compressor, sí que ha estat un projecte on s'han pogut veure els reptes que hi ha a l'hora de transmetre les dades.

Durant el procés del projecte hi ha hagut dificultats, com la manca d'informació, pel fet que no se sol donar tota la informació dels satèl·lits. A més, n'hi ha molts que no la mostren, fins i tot hi ha informació contradictòria, a causa de dades que es mostraven durant el procés de disseny que es contradiuen amb les dades finals. Aquestes dificultats han fet més difícil demostrar les hipòtesis i buscar satèl·lits per obtenir patrons.

AGRAÏMENTS

Agrair al meu tutor Sebastia per tota la orientació, revistes i implicació. Al GICI per tenir públics el mètode de compressió TER i EMPORDA.

REFERÈNCIES

REFERÈNCIES

- [1] Centre National d'Études Spatiales (CNES). *Applications*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2022. URL: <https://web.archive.org/web/20221005000636/http://spot5.cnes.fr/applications/applications.htm>.
- [2] Centre National d'Études Spatiales (CNES). *SPOT 4*. Accessed: Apr. 13, 2025. 1998. URL: http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/index.htm.
- [3] Cheng Yen Chiang et al. "Radar Imaging Statistics of Non-Gaussian Rough Surface: A Physics-Based Simulation Study". A: *Remote Sensing* 14 (2 2022). ISSN: 20724292. DOI: 10.3390/rs14020311.

- [4] eoPortal. *ALOS-3 (Advanced Land Observing Satellite-3)*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2023. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/alos-3>.
- [5] eoPortal. *Copernicus Sentinel-2*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2025. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-2#eop-quick-facts-section>.
- [6] eoPortal. *COSMO-SkyMed*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2025. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/cosmo-skymed>.
- [7] eoPortal. *Pléiades (High-Resolution Optical Imaging Constellation of CNES)*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2023. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/pleiades>.
- [8] eoPortal. *SPOT-4*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2025. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/spot-4>.
- [9] eoPortal. *SPOT-5*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2025. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/spot-5>.
- [10] eoPortal. *WorldView-1*. Accessed: Apr. 13, 2025. 2025. URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/worldview-1>.
- [11] ESA. *Sentinel-1: ESA's radar observatory mission for GMES operational services*. Vol. 1. 2012.
- [12] Luis Guanter et al. *The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation*. 2015. DOI: 10.3390/rs70708830.
- [13] Pietro Guccione et al. "Sentinel-1A: Analysis of FDBAQ Performance on Real Data". A: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53 (12 2015). ISSN: 01962892. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2449288.
- [14] Asami Hayato et al. "Development of the wide-swath and high-resolution optical imager (WISH) onboard Advanced Land Observing Satellite-3 (ALOS-3)". A: 2022. DOI: 10.1117/12.2636402.
- [15] Paul G. Howard i Jeffrey Scott Vitter. "Fast and efficient lossless image compression". A: *Data Compression Conference Proceedings*. 1993. DOI: 10.1109/DCC.1993.253114.
- [16] Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). *ALOS-2 Overview*. Accessed: Apr. 13, 2025. Maig de 2014. URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos-2/a2_about_e.htm.
- [17] Wei Ji et al. "An improved BAQ encoding and decoding method for improving the quantized SNR of SAR raw data". A: *Sensors (Switzerland)* 18 (12 2018). ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s18124221.
- [18] A. S. Keys et al. *Radiation Hardened Electronics for Space Environments (RHESE)*. Presentation at the Military and Aerospace FPGA and Applications (MAFA) Conference. MAFA-27. Nov. de 2007. URL: https://nepp.nasa.gov/mafa/talks/MAFA07_17_Keys.pdf (cons. 28-06-2025).
- [19] Ronald Kwok i William T.K. Johnson. "Block Adaptive Quantization of Magellan SAR Data". A: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 27 (4 1989). ISSN: 15580644. DOI: 10.1109/36.29557.
- [20] Catherine Lambert-Nebout, Christophe Latry i Gilles Moury. "La compression d'images embarquée pour les missions spatiales". A: *Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications* 56 (11-12 2001). ISSN: 00034347. DOI: 10.1007/bf02995557.
- [21] Philippe Lier et al. "Selection of the SPOT5 image compression algorithm". A: *Earth Observing Systems III*. Vol. 3439. 1998. DOI: 10.1117/12.325660.
- [22] Nicola Prette, Enrico Magli i Tiziano Bianchi. "Using CCSDS Image Compression Standard for SAR Raw Data Compression in the H2020 EO-Alert Project". A: (2019).
- [23] U.S. Geological Survey. "Landsat 8 Data Users Handbook". A: *Nasa* 8 (November 2019).
- [24] USGS. *Landsat 9 Data Users Handbook*. 2022.
- [25] Pen-Shu Yeh i Warner H. Miller. *Application Guide for Universal Source Encoding for Space*. NASA Technical Paper 3441. NASA, des. de 1993.

10 APENDIX: TAULA DE MISSIONS I SATÈL·LITS TROBATS

TAULA 1: TAULA COMPARATIVA DE SATÈL·LITS, CAPACITAT DEL CANAL, RATI DE COMPRESSIÓ, GENERACIÓ DE DADES I PERCENTATGE DE NO UTILITZACIÓ

Satèl·lit	Capacitat del canal	Rati de compressió	Generació de dades (Max)	Diferència (Mbit/s)	% de no utilització del canal
Sentinel 1	520 Mb/s	2.7:1	1280 Mbit/s	45.92	8.83%
Sentinel 2	560 Mb/s	2.89:1	1300 Mbit/s	110	19.64%
Spot 4	50 Mb/s	1.33:1	64 Mbit/s	1.87	3.74%
Spot 5	100 Mb/s	2.28–2.8:1	256 Mb/s	–12.28 – 8.57	–12.20 – 8.57%
Pleiades HR	465 Mb/s	4.8:1 (max 7:1)	4.3 Gbit/s	–430.83 (max –149.28)	–92.65% (max –32.10%)
COSMOS-SKYNET	300 Mb/s	4:1	1.2 Gbit/s	0	0%

TAULA 2: RESULTATS DE COMPRESSIÓ - IMATGE 1

Mètode	Tipus	Temps (s)	CR	BPS	PSNR
DCT (custom)	amb pèrdua	0.91	3.91	4.096	25.87
DWT-TER	amb pèrdua	2.06	3.90	4.100	71.92
Predictor-EMPORDA (simulated lossy)	amb pèrdua	2.20	3.92	4.082	48.46
DCT (custom)	sense pèrdua	1.52	1.09	—	—
DWT-TER	sense pèrdua	2.22	1.73	—	—
Predictor-EMPORDA	sense pèrdua	2.41	1.91	—	—

TAULA 3: RESULTATS DE COMPRESSIÓ - IMATGE 2

Mètode	Tipus	Temps (s)	CR	BPS	PSNR
DCT (custom)	amb pèrdua	60.77	2.08	7.676	6.27
DWT-TER	amb pèrdua	179.00	2.00	8.000	85.97
Predictor-EMPORDA (simulated lossy)	amb pèrdua	49.94	2.04	7.858	14.75
DCT (custom)	sense pèrdua	67.39	1.54	—	—
DWT-TER	sense pèrdua	191.59	1.43	—	—
Predictor-EMPORDA	sense pèrdua	50.62	1.69	—	—

TAULA 4: CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS DE DIFERENTS MISSIONS D'OBSERVACIÓ TERRESTRE.

Nom Missió	Any	Tipus d'imatge	Mètode de compressió	Pes	Dimensió	Orbita	Velocitat transmissió	Memòria	Sensor
Sentinel 1 [11]	2014	Imatge radar	FDBAQ	2.300 kg	3.4m x 1.3m x 1.3m	LEO (693km)	520Mbps	1.410 Gb	C-SAR, obté imatges de dia i de nit, amb 10 bits de profunditat.
Sentinel 2 [5]	2015	Imatge multiespectrals	JPEG 2000	1.140kg	3m x 1.7m x 2.2m	LEO (786Km)	490Mbps	2.000Gb	MSI (MultiSpectral Instrument) mostra 13 bandes espectrals, 4 bandes a 10m de resolució espacial, 6 bandes a 20m i 3 bandes a 60m, amb 12 bits de profunditat.
SPOT-4 [2][8]	1998	Imatge pancromàtica i multiespectrals	DPCM	755kg	2m x 2m x 5.6m	LEO (822 km)	50Mb/s	12Gb de recorder i 9Bb de solid state (400 imatges)	HRVIR de 5 bandes, 1 pancromàtica de 10m de resolució espacial i les altres a 20m. Amb 15 bits de profunditat.
SPOT-5 [1][9]	2002	Imatge pancromàtica i multiespectrals	DCT variable rate algorithm	3000kg	3.1m x 3.1m x 5.7m	LEO (822km)	50Mb/s * 2 (100Mb/s)	90Gb (599 imatges)	Un sensor HRG que és com el HRVIR (SPOT-4), però la pancromàtica és de 2.5 a 5 m, les multiespectrals a 10 m, i un sensor HRS pancromàtic.
Landsat 8 [23]	2013	Imatge pancromàtica, multiespectrals i tèrmica	2:1 Variable Rice Compression (CCSDS 121.0-B-3)	2071kg	2.4m x 2.4m x 3m	LEO (705Km)	284Mbps	3.17Tb (700 escenes)	Té dos sensors el Operational Land Imager (OLI), que captura les bandes, multiespectrals (8 bandes amb resolució de 30m) i pancromàtiques (1 banda a 15m), i les dades es comprimeixen. També el sensor TIRS, tèrmic el qual no comprimeix.

Landsat 9 [24]	2021	Imatge pancromàtica, multi-espectrals i tèrmica	Rice Compression (CCSDS 121.0-B-3)	2071 kg	3m x 2.4m x 2.4m	LEO (705km)	384Mbps	3.14 Tb	Té dos sensors el Operational Land Imager (OLI-2), que captura les bandes, mulitespectrals (8 bandes amb resolució de 30 m) i pancromàtiques (1 banda a 15 m), i les dades es comprimeixen. També el sensor TIRS-2, tèrmic el qual no comprimeix. (Els dos sensors són quasi idèntics amb petites millores en l'electrònica)
Worldview-1 [10]	2007	Imatge pancromàtica	ADPCM Kodak	2500 kg	3.6m (altura) x 2.5m (diàmetre)	LEO (496)	800Mbps	2,199Tb	WV60 amb una banda pancromàtica de 50 cm de resolució, i 11 bits de profunditat
EnMAP [12]	2022	Imatge hiperespectral	CCSDS Standard 122 (JPEG 2000-based)	980kg	3.1m x 2.0m x 1.7m	LEO (643km)	320Mbps	512Gb	HSI (Hyperspectral Imager) de 228 bandes
Pleiades HR [7]	2011	Imatge pancromàtica i multiespectrals	JPEG 2000 modificat (DWT + BitPlaneEncoder)	940kg	1.59m x 0.98m x 2.24m	LEO (694Km)	465Mbps	600Gb	HiRI 5 bandes, 1 d'elles pancromàtica amb 0.7m de resolució, i les multi espectrals amb 2.8m, amb 12 bits de profunditat.
COSMO-SkyMed [6]	2007	Imatge radar	BAQ	1900kg	?	LEO (619.6KM)	300Mbps	300Gb solid state	SAR-2000
ALOS-2 [16]	2014	Imatge radar	BAQ	2100Kg	16.5m x 3.5m x 9.9m	LEO (628Km)	800Mbps	128Gb	PALSAE-2
ALOS-3 [14] [4]	2023	Imatge pancromàtica, hiperespectral i multiespectrals	JPEG 2000 y FELICS	2120Kg	9.9m x 16.6m x 3.7m	LEO (669Kg)	1.8Gbps i	0.8Gbps	HISUI és un instrument multiespectrals i hiperespectrals, amb 12 bits de profunditat. El sensor hiperespectral detecta 185 bandes.