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

Díaz Armenteros, Victor; Serra Sagrista, Joan, tut. Compresión de imágenes astronómicas del JWST. 2025. (Enginyeria Informàtica)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/317573>

under the terms of the  license

Compressió d'imatges astronòmiques del JWST

Víctor Díaz Armenteros

1 de juliol de 2025

Resum– Aquest treball de fi de grau explora el procés de compressió d'imatges astronòmiques capturades pel telescopi espacial James Webb (JWST). A partir de l'estudi de la seva arquitectura instrumental i del seu flux de dades, s'analitzen les característiques específiques de les imatges en format FITS i els algoritmes de compressió utilitzats. Es realitza una comparativa experimental entre diferents tècniques de compressió (RICE, HCOMPRESS i GZIP) emprant imatges reals del JWST, per tal d'avaluar la seva eficiència en termes de relació de compressió, temps de processament i manteniment de la integritat de les dades. Els resultats obtinguts permeten determinar quins algoritmes s'adapten millor a les necessitats del context espacial i posen de manifest la importància de seleccionar l'estratègia adequada segons els recursos disponibles i els requisits científics.

Paraules clau– Compressió d'imatges, JWST, algorismes de compressió, astrofotografia, espai.

Abstract– This final degree project investigates the compression of astronomical images captured by the James Webb Space Telescope (JWST). Starting from an overview of the telescope's instrumental architecture and data flow, the study focuses on the specific characteristics of FITS-format images and the compression algorithms applied. An experimental comparison is performed using real JWST data, evaluating the performance of different compression techniques (RICE, HCOMPRESS, and GZIP) in terms of compression ratio, processing time, and data integrity. The results help determine which algorithms are most suitable for space applications and highlight the importance of choosing the right compression strategy based on available resources and scientific requirements.

Keywords– Image compression, JWST, compression algorithms, astrophotography, space.



- E-mail de contacte: victor.diazarmenteros@gmail.com
- Menció realitzada: Tecnologies de la Informació
- Treball tutoritzat per: Joan Serra Sagristà (Àrea de Ciències de la Computació i Intel·ligència Artificial)
- Curs 2024/25

1 INTRODUCCIÓ

UN dels misteris que ha rodejat a l'ésser humà, ha sigut sempre l'espai: com és, si té final, que hi ha més enllà del que veiem des de la Terra... Fins fa relativament poc temps aquests dubtes s'han anat esclariant poc a poc gràcies a l'aparició de diferents maneres de realitzar fotografies de l'espai, i un dels moments més importants de tot aquest procés es va donar el 10 d'abril de 2019, quan es va capturar per primera vegada la imatge d'un forat negre, marcant un abans i un després en el camp de l'astrofotografia donant lloc a la creació d'una eina encara més important com ha sigut el James Webb Space Telescope, telescopi espacial sobre el qual es basa aquest Treball de Fi de Grau.

2 OBJECTIUS

Durant la realització d'aquest treball, es pretén aconseguir una visió més detallada del funcionament dels sistemes de compressió d'informació dins l'àmbit de les imatges astronòmiques, concretament del James Webb Space Telescope (JWST) des de un punt de vista funcional i de rendiment, sobretot enfocant-se en el tractament de les imatges generades per aquest telescopi, com es recullen, de quin tipus són, i sobretot, quin és el procés que es segueix en la compressió d'aquestes imatges i la diferència entre els diferents algorismes que es poden usar per a comprimir imatges d'aquest tipus, juntament amb la comparació d'algorismes de compressió d'imatges més genèrics amb algorismes especialitzats per a l'astrofotografia ja sigui a nivell de rendiment, cost computacional i altres mètriques.

En termes més generals, els principals objectius que es volen assolir amb aquest treball són: Aprendre sobre com la informació és tractada en un context tant complexe i crític com és l'espai i com són processades aquestes dades astronòmiques per als diferents usos que poden tenir, descobrir els tipus d'imatges que existeixen en l'àmbit de l'astrofotografia i en concret, quin tipus d'imatges captura el JWST, experimentar de primera mà, amb dades reals, com es tracten aquestes dades, el seu format, quin és el millor mètode a utilitzar per a la seva compressió i, a més, fer una comparació experimental sobre l'eficiència de la compressió de les dades astronòmiques usant diversos algorismes de compressió

2.1 Context i estat de l'art

2.1.1 Introducció

En termes generals, la compressió de dades és la reducció del volum de dades tractables per a representar una determinada informació fent servir una menor quantitat d'espai a la original, reduint la seva mida, però mantenint informació suficient per a poder desfer aquesta compressió a través del seu procés invers anomenat descompressió.

L'espai que ocupa una informació codificada sense compressió és el producte entre la quantitat de mostres i la seva resolució (mida que ocupa cada mostra). Aquestes dades són representades amb *mostres* i *bits/mostra* respecti-

vament. D'aquesta manera podem deduir que a més bits s'utilitzin per emmagatzemar cada mostra i a més mostres hi hagi, major sera la mida de l'arxiu. Un exemple adient al nostre cas seria una imatge, en la qual les mostres serien el nombre de píxels de la imatge, i la resolució serien el nombre de bits que s'utilitzen per a representar cada pixel.

2.1.2 Conceptes bàsics de compressió

Dos dels conceptes més importants per a entendre la compressió de dades són l'entropia i la redundància, ja que moltes tècniques de compressió els agafen com a base. Aquests dos conceptes ens permeten analitzar fins a quin punt és possible representar informació de la manera més eficient possible i són clau per a determinar els límits teòrics de la compressió.

2.1.2.1 Entropia

En l'àmbit de la compressió, l'entropia mesura la quantitat promig d'informació que proporciona cada mostra, és a dir, com d'imprevisible és el contingut de les dades, donant-nos la següent definició formal:

Sigui X una font d'informació discreta amb un conjunt de símbols $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ i sigui $p_i = P(X = x_i)$ la probabilitat d'aparició del símbol x_i .

L'entropia de la font X es defineix com:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (1)$$

Aquesta expressió mesura la quantitat mitjana d'informació (en bits) que produeix cada símbol de la font, mesurant quina és la seva incertesa i quins són els bits que, de mitjana, es necessiten per a codificar la informació de la manera més eficient possible i sense perdre cap dada.

2.1.2.2 Redundància

La redundància, dins el context de la compressió d'informació, és aquella part d'un missatge que no aporta informació nova ja que és considerada repetitiva o previsible i pot ser eliminada sense perdre contingut essencial.

La redundància en teoria de la informació es pot definir formalment com:

$$R = 1 - \frac{H(X)}{H_{\max}} \quad (2)$$

on:

- R és la **redundància relativa** de la font.
- $H(X)$ és l'**entropia real** de la font (mesura de la incertesa).
- $H_{\max}$ és l'**entropia màxima possible**, que es dona quan tots els símbols tenen la mateixa probabilitat: $H_{\max} = \log_2 n$, sent n el nombre de símbols possibles.

2.1.2.3 Relació de compressió

La relació de compressió és una mètrica quantitativa que permet avaluar l'eficiència d'un algorisme de compressió. Es defineix com el quocient entre la mida original del fitxer i la seva mida després de la compressió. Matemàticament, s'expressa com:

$$\text{Relació de compressió} = \frac{\text{Mida original}}{\text{Mida comprimida}} \quad (3)$$

Aquest valor indica quantes vegades s'ha reduït la mida del fitxer. Per exemple, una relació de compressió de 5,0 significa que el fitxer comprimit ocupa una cinquena part de l'espai original, o dit d'una altra manera, que la compressió ha reduït el volum de dades en un 80%.

Aquest indicador és especialment rellevant en el context de dades científiques de gran volum, com ara imatges astronòmiques en format FITS, ja que permet comparar de manera objectiva el rendiment dels diferents algorismes i prendre decisions informades segons les necessitats d'espai i eficiència computacional.

2.1.3 Algorismes de compressió

Els algorismes de compressió són tècniques que serveixen per a reduir la mida d'un arxiu o un conjunt de dades sense perdre informació (o perdent molt poca) al seguir una sèrie de passos que permeten reduir la mida original de les dades. Aquests algorismes acostumen a seguir una sèrie de passos comuns a l'hora de ser realitzats.

Primerament, es fa una transformació de les dades, on es canvia la representació d'aquestes per a que siguin més senzilles de comprimir, cal destacar que en aquest primer pas ja es pot introduir pèrdua. Un exemple de transformació de dades és la transformada del cosinus discreta (DCT) utilitzada en JPEG o la transformada wavelet, tot i que aquest pas és opcional i no sempre s'utilitza. Seguidament, es redueix la redundància fent servir algorismes com LZ77, LZ78 o RLE. I per últim, les dades resultants es codifiquen, aquest cop amb algorismes sense pèrdua, ja que l'entropia s'ha reduït i, tal com s'ha explicat abans, al reduir l'entropia calen menys bits per a representar la informació i, per tant, s'han d'enviar menys bits al receptor, aconseguint el propòsit de la compressió.

Aquests algorismes acostumen a ser bastant complexos, ja que trobar patrons de repetició per a tot tipus de dades no sempre és possible i això pot implicar una eficiència molt baixa a l'hora de comprimir les imatges, cosa que no interessa. Aquesta pèrdua d'eficiència, a vegades justifica la petita modificació de les dades, a canvi de millorar el rendiment global de la compressió tant a nivell temporal com a nivell de bitrate. És per aquest motiu que trobem dos tipus d'algorismes de compressió, els algorismes de compressió amb pèrdua i sense pèrdua.

2.1.3.1 Algorismes de compressió sense pèrdua

Els algorismes de compressió sense pèrdua, tal i com el seu nom indica, són algorismes amb els quals un cop les dades

han estat comprimides, aquestes poden ser retornades a la seva forma inicial sense que hi hagi cap tipus de modificació per culpa d'aquesta compressió, és a dir, les dades originals i les descomprimides són exactament iguals. No obstant, els algorismes de compressió sense pèrdua, acostumen a ser menys eficients ja que els processos sempre han de ser reversibles i no es pot sacrificar la integritat de les dades a canvi de millorar aquesta eficiència, ja que en els casos en que s'utilitzen aquest tipus d'algorismes, mantenir la integritat de les dades és clau.

Alguns exemples d'algorismes de compressió sense pèrdua àmpliament utilitzats són: L'algorisme de Huffman, on s'examinen els caràcters més repetits per a codificar els que més apareixen de manera més curta i reduir el nombre de bits a enviar o l'LZW, on es construeix un diccionari a partir de patrons trobats a les dades i s'hi fa referència després per a no haver d'escriure tots els caràcters un altre cop.

2.1.3.2 Algorismes de compressió amb pèrdua

La compressió amb pèrdua, és un tipus de compressió que elimina part de la informació original per a aconseguir reduir més la mida de les dades, fent que sigui impossible recuperar el fitxer original exactament igual que abans de comprimir-lo.

D'aquesta manera, es redueix molt més l'espai que amb la compressió sense pèrdua, però a costa de perdre qualitat i fidelitat de les dades, per tant, podem deduir que aquest tipus de compressió s'utilitza en contextos on no és essencial conservar el contingut exacte.

Un altre punt a destacar d'aquest tipus d'algorismes de compressió, és que es poden afegir dos passos més a l'hora de comprimir les dades: El filtratge perceptiu, on es treu informació que no serà percebuda per l'ésser humà, per exemple, en el cas de l'àudio, freqüències que l'humà no pot escoltar i també es pot aplicar la quantització, on es redueix la precisió de les dades, per exemple, si hi ha dades amb valors 152,153 i 154, tots aquests valors seran simplificats a 153.

3 CAS D'ÚS: JWST

El James Webb, és un telescopi espacial que va ser llançat en col·laboració amb 3 agències espacials, la nord-americana, l'europea i la canadenc, i és el telescopi espacial més potent mai construït. Va ser llançat a l'espai el 25 de desembre de 2021 i va començar a enviar les primeres imatges científiques al juliol de 2022. El JWST observa l'univers en infraroig ja que li permet 'veure' a través dels gasos i la pols còsmica, capturades amb un mirall de 6,5 metres de diàmetre que permet captar una enorme quantitat de llum, així com un escut tèrmic que el protegeix de la radiació solar i diferents instruments com el NIRCам, que captura les imatges en infraroig proper per extreure imatges detallades de les galàxies, estrelles i planetes, el MIRI que ho fa en infraroig mitjà per observar objectes freds i pols còsmica i el NIRSpec, que descompon la llum d'infraroig proper per a entendre la composició química dels objectes espacials. [Fig. 1]



Fig. 1: Imatge capturada pel JWST

3.1 Tipus d'imatges capturades pel JWST i mòduls que el componen

3.1.1 Sensors principals

El tipus d'imatges que captura el JWST i els amples de banda que es capturen, depenen dels sensors mencionats anteriorment.

3.1.1.1 Mid Infrared Instrument (MIRI)

L'instrument d'infraroig mitjà del JWST (MIRI) proporciona modes d'observació per imatge i espectroscòpia en un rang de longituds d'ona de 4,9 a 27,9 μ i les imatges que captura el MIRI gràcies als seus detectors, són de 1024 x 1024 pixels [1]

En la Figura 2 podem veure la corba de transmissió dels filtres d'imatge. A l'eix horitzontal trobem la longitud d'ona en micròmetres, que representa l'infraroig mitjà (on opera el MIRI) i a l'eix vertical l'eficiència de la conversió de fotó a electró en electrons per fotó, que ens indica com d'eficient es converteix la llum incident en senyal elèctric.

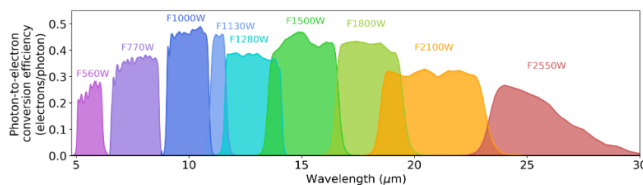


Fig. 2: Corba de filtres d'imatge del MIRI

3.1.1.2 Near Infrared Camera (NIRCam)

La càmera d'infraroig proper del JWST (NIRCam) observa en un rang de 0,6 a 5,0 μ i disposa de dos mòduls gairebé idèntics que apunten a camps de visió adjacents, cada mòdul utilitza un dicròic per observar simultàniament en un canal de longitud d'ona curta (0,6–2,3 μ) i un canal de longitud d'ona llarga (2,4–5,0 μ), és a dir, que cada mòdul de la càmera NIRCam fa servir un component òptic anomenat dicròic per dividir la llum en dues parts segons la

seua longitud d'ona on a més de generar imatges tenen una resolució de 2040 x 2040 pixels. [2]

En la Figura 3 es mostren els filtres de la NIRCam, organitzats segons la longitud d'ona que es cobreixen (curta i llarga) i el canal al qual pertanyen, que són banda molt ampla, banda ampla, banda mitjana i banda estreta, respectivament.

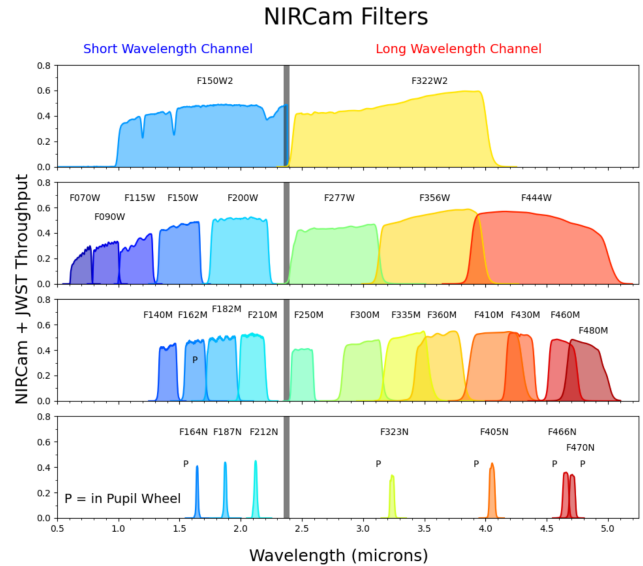


Fig. 3: Corba de filtres d'imatge de la NIRCam

3.1.1.3 Near Infrared Spectrograph (NIRSpec)

El NIRSpec és un altre dels mòduls del JWST, dissenyat per fer espectroscòpia en la regió de l'infraroig proper, concretament en les longituds d'ona de 0,6 a 5,3 μ . Això vol dir que, a part de capturar imatges amb una resolució de 2048 x 2048 pixels, descompon la llum dels objectes celestes en les seves diferents longituds d'ona, cosa que permet estudiar la seva composició química, temperatura, moviment i altres propietats físiques, fent servir eines com el Micro-Shutter Assembly, que permet seleccionar quins objectes s'observen fent servir micropersianes que es poden obrir o tancar, l'Integrated Field Unit (IFU), que fa espectroscòpia de cada pixel de la imatge, creant dades en 3D (dues dimensions espacials i una espectral) i els Fixed Slits (FSs), que són ranures que deixen passar la llum d'un sol objecte per a fer un anàlisi espectral molt detallat. [3]

3.1.1.4 Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS)

El NIRISS ofereix modes d'observació per a espectroscòpia sense esclatxa, imatges interferomètrica d'alt contrast i imatge convencional, en un rang de longituds d'ona de 0,6 a 5,0 μ , cosa que el permet estudiar l'espectre de múltiples objectes sense necessitat de seleccionar-los prèviament amb una esclatxa (espectroscòpia sense esclatxa), bloquejar parcialment l'obertura del telescopi per a observar detalls molt petits aprop de fonts brillants (imatges interferomètriques) o també pot ser fer servir com una càmera d'infraroig proper,

oferint imatges de 2048 x 2048 píxels (imatge convencional). [4]

És usat principalment per a l'estudi d'exoplanetes i les seves atmosferes, l'observació de les primeres galxies formades a l'univers i la caracterització d'estrelles joves i cúmuls estel·lars.

3.1.2 Integrated Science Instrument Module Command and Data Handling (ICDH)

L'ICDH és el sistema que rep i processa les dades captades pels detectors científics abans d'enviar-les a la Terra [5]. La velocitat màxima sostinguda de dades que ofereix l'ICDH és d'aproximadament 48 Mb/s per segon, incloent les possibles sobrecàrregues que pugui haver-hi durant la paquetització de dades. Aquesta dada correspon a sis imatges completes de 2048 x 2048 píxels cada 10,7 segons. No obstant, la velocitat real de transmissió de dades depèn de varis factors com poden ser el nombre de detectors que són usats de manera simultània (amb un màxim de 14) o el moment exacte en que les lectures d'exposició arriben a l'ICDH per ser processades.

Per exemplificar aquesta informació, suposarem que volem fer una observació amb dos mòduls de la NIRCam (utilitza 10 detectors, 5 per cada mòdul), observacions simultànies amb NIRSpec (utilitza 2 detectors) i el sensor FGS que serveix per al guiatge, que ens dona un total de 13 detectors a l'ICDH, per tant podríem suportar una observació d'aquest tipus ja que no es superaria el límit de 14 detectors que es poden utilitzar com a màxim.

De totes maneres, el moment exacte en que arriben els paquets de dades que es recopilen és imprevisible, però aquesta incertesa ja es té en compte en el moment d'establir el límit de 48 Mb/s.

3.1.3 JWST Solid State Recorder (SSR)

Per a l'emmagatzematge i transmissió de dades, el JWST utilitza un registrador d'estat sòlid (SSR) a bord que emmagatzema les dades científiques fins que es transmeten a la Terra, cosa que passa en dues connexions de 4 hores al dia. Cada connexió amb terra pot transmetre almenys 28,6 GB de dades científiques enregistrades i en cas de que no es pugui contactar, les observacions científiques poden continuar sense emplenar l'enregistrador i actualitzar-se en el següent contacte. A més, el SSR pot emmagatzemar aproximadament 65 GB de dades científiques [6].

3.2 Volum i excés de dades del JWST

La capacitat de descàrrega de dades i l'emmagatzematge són recursos limitats que han de ser gestionats de la manera més eficient possible. Els observadors, poden aplicar estratègies que redueixen la quantitat d'informació que es genera, fent servir mètodes com patrons de lectura que agrupin diversos fotogrames en una sola imatge o poder interrompre les sessions de captura de dades per a distribuir millor l'ús dels recursos, això pot arribar a ajudar en situacions en les que es genera un volum de dades significativament major al que el SSR pot emmagatzemar, evitant reprogramacions de captures de dades i retards en l'execució.

3.2.1 Volum de dades

El volum de dades en una exposició depen principalment del nombre de detectors, el nombre d'outputs per detectors, el patró de lectura (on es decideix com es capturen i processen les dades), el nombre de grups per integració (nombre de lectures per un mateix senyal) i el nombre d'integracions.

3.3 JWST Science Calibration Pipeline

A diferència d'observatoris espacials anteriors com el Hubble Space Telescope (HST), el James Webb Space Telescope (JWST) utilitza una única 'pipeline' de calibratge científic [Fig. 3] per al processament de totes les dades observacionals. Aquesta 'pipeline' ha estat dissenyada per ser compartida entre diferents instruments sempre que sigui viable, especialment en les etapes inicials de processament a nivell de detector.

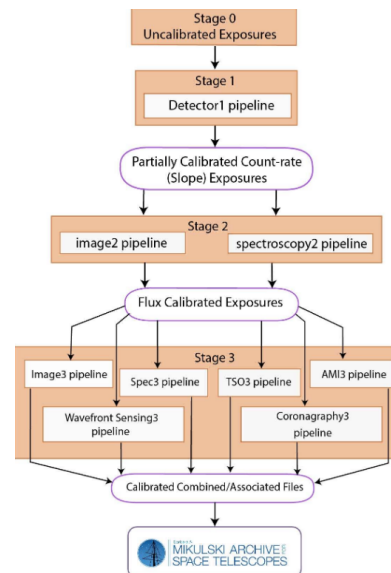


Fig. 4: Etapes de la pipeline de calibració

La seva arquitectura modular permet que només s'executin els passos de processament rellevants per al mode observacional utilitzat, ja sigui en observacions d'imatge o d'espectroscòpia. Això facilita l'adaptació del processament segons les característiques específiques de cada conjunt de dades.

A més, la 'pipeline' inclou molts passos opcionals, i ofereix diferents maneres de configurar aquests passos segons els requisits científics particulars de cada observació. Aquesta flexibilitat permet optimitzar el processament de dades en funció dels objectius de cada projecte astronòmic. Un concepte important de la 'pipeline' de calibració són les rampes de senyal, ja que el JWST no captura imatges com una càmera convencional, sinó que utilitza un sistema de lectura progressiva dels detectors anomenat lectura no destructiva.

En aquest procés, els píxels del detector s'observen repetidament durant l'exposició, i es registra com el senyal augmenta amb el temps a mesura que reben llum. Aquest augment progressiu es coneix com una rampa de senyal. Les

rampes representen, per a cada píxel, com creix la quantitat de llum detectada al llarg del temps. Aquest tipus de lectura té diversos avantatges: permet identificar píxels defectuosos, corregir impactes de raigs còsmics i millorar la precisió de la mesura final. [7]

3.3.1 Etapa 0: Preprocessament (SDP)

El sistema Science Data Processing (SDP) realitza el preprocessament de la telemetria bruta rebuda des de l'espai abans d'iniciar-se la 'pipeline' de calibració científica del JWST. En aquesta fase, es genera informació essencial dels encapçalaments (headers) a partir de diverses fonts com ara telemetria que hi ha a bord o les dades que proporciona el JPL (Jet Propulsion Laboratory), que guarda un històric de on es troba la nau i la velocitat que té en tot moment.

El primer conjunt de dades disponible per a l'anàlisi externa són els fitxers `*.uncal.fits`, que contenen les rampes de senyal no calibrades.

Aquests fitxers tenen habitualment quatre dimensions:

- Columnes i files del detector (2D).
- Nombre de grups per integració (3a dimensió).
- Nombre d'integracions per exposició (4a dimensió).

En alguns casos, especialment en observacions de sèries temporals (TSO), les dades es poden dividir en segments de menys de 2 GB per tal de mantenir els fitxers dins d'un límit raonable d'espai. Aquests segments es marquen amb `segNNN` en el nom del fitxer.

3.3.2 Etapa 1: Calibració de nivell detector

Entrada: Dades de rampa no calibrades (`*.uncal.fits`)

Sortida: Imatges de pendent no calibrades (`*.rate.fits`, `*.rateints.fits`)

La primera etapa, implementada pel codi `calwebb_detector1`, aplica correccions a nivell de detector per transformar les rampes brutes en imatges bidimensionals de taxa de comptes per exposició (o per integració en alguns modes).

Inclou processos com:

- Correcció del corrent fosc.
- Marcatge de píxels defectuosos.
- Correcció de la no-linealitat.
- Identificació de salts per raigs còsmics.

Aquest pas és comú a totes les dades del JWST.

3.3.3 Etapa 2: Calibració científica primària

Entrada: Imatges de pendent no calibrades (`*.rate.fits`, `*.rateints.fits`)

Sortida: Imatges de pendent calibrades (`*.cal.fits`, `*.calints.fits`)

Aquesta etapa calibra les rampes obtingudes en l'etapa anterior. S'hi aplica:

- Correcció de la resposta plana del píxel.
- Assignació de coordenades celestes i longituds d'ona.

- Aplicació de factors de calibratge espectrofotomètric.

Segons el tipus de dades:

- `calwebb_image2`: per dades d'imatge (inclosa coronografia i AMI).
- `calwebb_spec2`: per dades espectroscòpiques.

Els fitxers `*.cal.fits` contenen les integracions combinades, mentre que els `*.calints.fits` mantenen cada integració per separat, fet especialment rellevant en observacions de tipus TSO.

3.3.4 Etapa 3: Productes científics finals

Entrada: Imatges de pendent calibrades (`*.cal.fits`, `*.calints.fits`)

Sortida: Mosaics d'imatges, cubs tridimensionals (IFU) i espectres unidimensionals (`*.i2d.fits`, `*.s3d.fits`, `*.x1d.fits`)

En aquesta última etapa es combinen les exposicions calibrades per obtenir els productes finals preparats per a l'anàlisi científica. Per a imatges, s'agrupen exposicions sobre una graella comuna i es generen catàlegs de fonts bàsiques. Per a espectroscòpia, es poden crear cubs de dades en 3D o espectres 1D finals.

Pipelines específics per a cada tipus de dades:

- `calwebb_image3`: per a MIRI, NIRCam i NIRISS (imatges directes).
- `calwebb_coron3`: per a imatges coronogràfiques.
- `calwebb_ami3`: per a interferometria amb màscara d'obertura (AMI).
- `calwebb_spec3`: per a espectroscòpia amb MIRI, NIRSpec i NIRCam/NIRISS WFSS.
- `calwebb_tso3`: per a observacions de sèries temporals.

3.4 Transmissió de les dades del telescopi a la Terra

Per a enviar aquestes imatges FITS que ja han sigut calibrades, s'utilitzen algorismes de compressió sense pèrdua, ja que és fonamental que no es perdin les dades que es recopilen degut a que qualsevol modificació d'aquestes és rellevant a l'hora d'estudiar aquestes dades, i a més, el JWST disposa d'un ample de banda limitat, cosa que justifica encara més aquesta compressió.

El format FITS s'utilitza ja que conté metadades i diversos plans d'informació com la imatge, errors o màscares que permeten garantir la integritat completa de les dades, característica que és vital en aquest context.

3.4.1 Algorismes de compressió utilitzats

Actualment, no hi ha cap documentació on s'afirmi que el JWST utilitza l'algorisme RICE per a comprimir les imatges capturades pel telescopi, però degut a l'extens ús d'aquest algorisme i el seu bon rendiment en missions espacials d'aquest tipus, el més probable és que RICE o alguna variant d'aquest algorisme sigui l'usada per la compressió

d'imatges del JWST.

Aquest algorisme de compressió RICE és una tècnica sense pèrdua àmpliament utilitzada en l'àmbit científic, especialment per a imatges en format FITS provinents de missions espacials. Està basat en la codificació *Golomb-Rice* [8], una variant eficient del codi de Golomb que aprofita la freqüència de valors petits en les dades. Abans de codificar, les dades es transformen mitjançant tècniques de decorrelació, com ara la predicció o la resta entre valors consecutius, obtenint així diferències (residus) que presenten menys entropia i són més fàcils de representar de manera compacta.

Cada residu es codifica dividint-lo en un quocient i un residu respecte un valor M , que acostuma a ser una potència de dos. Aquesta divisió permet una codificació ràpida i eficaç utilitzant codi unari per al quocient i binari truncat per al residu [8].

Finalment, en el procés de descompressió es recuperen exactament les dades originals, garantint així que el mètode no introdueix cap pèrdua d'informació. La seva simplicitat, baix cost computacional i precisió el fan ideal per a l'ús en dispositius embarcats i entorns amb recursos limitats, com els instruments del JWST.

3.4.2 Enviament de dades a la Terra

Les dades que ja han estat comprimides tal i com s'ha explicat a la secció anterior, s'envien a través de l'enllaç de comunicacions del JWST fent servir la Deep Space Network, un sistema gestionat per la NASA que permet rebre dades des de missions espacials llunyanes com el JWST o Discovery. Un cop aquestes dades han arribat a la Terra, el Science and Operations Center (STScI), descomprimeix els fitxers per a començar el processament d'aquests.

4 METODOLOGIA: ANÀLISI COMPARATIU DE RENDIMENT DELS ALGORISMES DE COMPRESSIÓ AMB IMATGES REALS DEL JWST

4.1 Extracció de les imatges reals

Per a realitzar la part pràctica d'aquest treball, s'han extret dades reals del JWST en el seu format sense calibrar, és a dir, a la part superior de la 'pipeline' mostrada a la figura [Fig. 4]

Concretament aquestes dades han sigut publicades el 13 de juliol del 2022 i han sigut filtrades a través de l'arxiu de dades per a obtenir únicament imatges capturades per la NIRCAM de l'objecte espacial 'NGC3132', que correspon a una nebulosa.

4.2 Processament de dades amb SAOImageDS9

Un cop han sigut extretes les dades, aquestes han sigut observades fent servir un editor d'imatges que suporta els arxius amb extensió '.FITS' anomenat 'SAOImageDS9', d'aquí en endavant referit com 'DS9' [9].

JWST LHM View										Album View	
Edit Columns...		Table Display: All								Show Preview: ☐ Show Cutoff: ☐	
	Actions	Observation T...	Mission	Provenance Name	Instrument	Project	Filters	Waveband	Target Name	Target Classification	
☐	1   ***	science	JWST	CALJWST	NIRISS/SOISS	JWST	CLEAR...	INFRARED	WASP-96	Star, Exoplanet System	
☐	2   ***	science	JWST	CALJWST	NIRISS/SOISS	JWST	CLEAR...	INFRARED	WASP-96	Star, Exoplanet System	
☒	3    ***	science	JWST	CALJWST	MIRI/IMAGE	JWST	F1130W	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	4    ***	science	JWST	CALJWST	MIRI/IMAGE	JWST	F770W	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	5    ***	science	JWST	CALJWST	MIRI/IMAGE	JWST	F1800W	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	6    ***	science	JWST	CALJWST	MIRI/IMAGE	JWST	F1280W	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	7    ***	science	JWST	CALJWST	NIRCAM/DMA...	JWST	F187N	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	8    ***	science	JWST	CALJWST	NIRCAM/DMA...	JWST	F090W	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	9    ***	science	JWST	CALJWST	NIRCAM/DMA...	JWST	F356W	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	10    ***	science	JWST	CALJWST	NIRCAM/DMA...	JWST	F212N	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	11    ***	science	JWST	CALJWST	NIRCAM/DMA...	JWST	F444W...	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	
☒	12    ***	science	JWST	CALJWST	NIRCAM/DMA...	JWST	F444W...	INFRARED	NGC-3132	ISM, Planetary nebula	

Fig. 5: Dades descarregades del MAST corresponents a l'objecte 'NGC3132'

Aquest editor d'imatges permet el processament de les imatges descarregades, podent aplicar-hi diferents filtres amb la creació de 'frames' on es poden superposar les imatges i poder tenir una representació amb colors 'reals' tenint en compte la conversió que es mostra a la [Fig.3] tot i que les imatges són capturades amb banda infraroja.

Per exemple, una de les imatges capturades amb el filtre F444W, que correspon a un color vermellós, es veu d'aquesta manera [Fig. 6]:

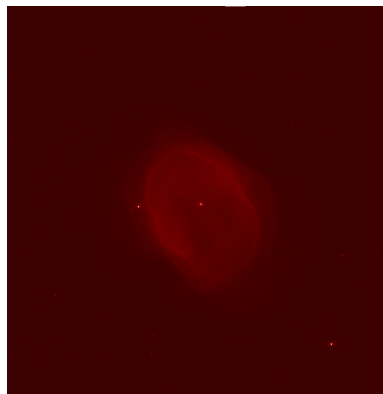


Fig. 6: Imatge amb filtre vermell F444W

Cal destacar que en les dades reals, com que la llum que es rep dels objectes es concentra en pocs píxels ja que hi ha una forta exposició de llum per part d'un punt concret (per exemple, una estrella), en el moment de visualitzar la imatge, s'ha d'aplicar una escala logarítmica per a poder tenir una representació visual acurada de com es la imatge real, en aquest cas, aquesta escala logarítmica ja ha sigut aplicada a la [Fig. 6].

Un cop tenim clar com processar cada imatge, aprofitem la capacitat de DS9 per a superposar 'frames' i creem un nou frame que en aquest cas serà de tipus RGB per a poder obtenir una imatge amb colors més vius.

Per a aquest cas, farem servir la imatge anterior amb el filtre F444W per al color vermell, la imatge amb el filtre F090W per al color blau i la imatge amb el filtre F212N per al color verd. Un cop hem superposat aquests 'frames', aconseguirem la següent imatge, la qual encara té molt marge de millora, però ja aconsegueix una representació que permet distingir l'objecte de manera clara [Fig. 7].

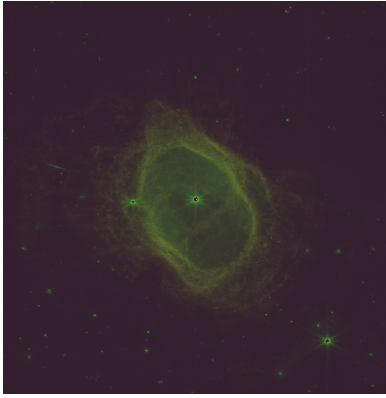


Fig. 7: Imatge RGB processada de la nebulosa 'NGC3132'

No obstant, els processaments professionals són fets de manera molt més precisa i aprofiten molt millor les dades obtingudes ja que es disposen de millors equips, tècniques i coneixements per a fer-ho [10].

Aquesta diferència es pot denotar en la [Fig. 1] imatge que correspon a la mateixa nebulosa amb la qual s'han fet les proves de processament d'imatge anteriors on es veu una millora clara en relació al processament d'aquesta imatge. Un cop hem vist la imatge a processar i com aquesta pot ser representada de diverses maneres, ens centrarem en els algorismes de compressió que s'utilitzen per a comprimir aquestes imatges.

4.3 Proves de rendiment amb algorismes de compressió d'imatges

Per a realitzar aquest anàlisi comparatiu, s'han utilitzat 6 imatges en total de dades sense calibrar extretes del MAST[11] (sense cap processament), 3 per al sensor NIRC*am* i 3 per al sensor MIRI. S'han seleccionat 3 algorismes: RICE, HCOMPRESS i GZIP.

El primer és l'utilitzat per a la compressió de les imatges reals del JWST i en la gran majoria de missions que tracten aquest tipus de dades, així que ens servirà com a punt de referència respecte els altres dos algorismes.

El segon és una alternativa a RICE, utilitzat també amb algunes imatges astronòmiques, com per exemple de manera puntual al Hubble Space Telescope (HST) o al Sloan Digital Sky Survey (SDSS) ja que HCOMPRESS ofereix millor compressió amb imatges 'netes' com les del cel profund que es capturaven.

Per últim, utilitzarem GZIP per tenir una visió de com és la compressió amb un algorisme més 'convencional' i que no és específic per a imatges de l'espai.

4.3.1 Entorn de treball i llibreries utilitzades

L'entorn de treball utilitzat és l'editor de codi Visual Studio Code, en el qual s'ha realitzat un script fent servir el llenguatge de programació Python, que permet tractar grans volums de dades de manera eficient amb una sintaxi de codi senzilla i còmode d'utilitzar, a part de tenir una gran quantitat de llibreries útils per a tractar aquest tipus de dades.

Per a poder utilitzar les tècniques de compressió mencionades anteriorment, s'ha utilitzat la llibreria 'funpack'[12] (o fpack) que és una eina desenvolupada per l'Oficina de Suport FITS de la NASA i que està integrada dins la biblioteca CFITSIO, dissenyada específicament per a la compressió de fitxers FITS, el format estàndard utilitzat en astronomia per a l'emmagatzematge d'imatges científiques i dades multidimensionals. En aquest cas, s'ha extret la biblioteca d'un repositori de Github [13]

A diferència dels mètodes de compressió genèrics com ZIP o GZIP, la llibreria fpack està optimitzada per tractar directament amb el contingut estructurat dels fitxers FITS, permetent conservar la integritat de les capçaleres i metadades, alhora que aplica algorismes de compressió eficients a les imatges científiques sense alterar el format del fitxer, característica clau en el context de compressió de dades per a imatges científiques.

4.4 Resultats de les proves comparatives de rendiment

Primerament, veiem el primer fitxer de la NIRC*am* analitzat *jw02733001001_02101_00001_nrcb1_uncal.fits*, que pertany al filtre F212N [Fig. 3].

Mètrica	RICE	HCOMPRESS	GZIP_1
Mida original (KB)	57400,31	57400,31	57400,31
Mida comprimida (KB)	45767,81	42415,31	49997,81
Relació de compressió	1,25	1,35	1,15
Temps de compressió (s)	0,8062	2,0756	2,7295
Temps de descompressió (s)	0,0261	0,0379	0,0236
Entropia original	11,96	11,96	11,96
Entropia descomprimida	11,96	11,96	11,96

TAULA 1: COMPARACIÓ IMATGE AMB FILTRE F212N

Seguidament analitzem el fitxer *jw02733001001_02103_00001_nrcb1_uncal.fits*, que pertany al filtre F187N [Fig. 3] i trobem el següent resultat.

Mètrica	RICE	HCOMPRESS	GZIP_1
Mida original (KB)	57400,31	57400,31	57400,31
Mida comprimida (KB)	45770,62	42418,12	50000,62
Relació de compressió	1,25	1,35	1,15
Temps de compressió (s)	0,6221	2,0625	2,6117
Temps de descompressió (s)	0,0247	0,0318	0,0284
Entropia original	11,96	11,96	11,96
Entropia descomprimida	11,96	11,96	11,96

TAULA 2: COMPARACIÓ IMATGE AMB FILTRE F187N

Ara analitzem l'última imatge de les proves amb NIRC*am*, el fitxer *jw02733001001_02105_00001_nrcb1_uncal.fits*, que correspon al filtre F090W [Fig. 3].

Mètrica	RICE	HCOMPRESS	GZIP_1
Mida original (KB)	73780,31	73780,31	73780,31
Mida comprimida (KB)	58817,81	54483,75	64262,81
Relació de compressió	1,25	1,35	1,15
Temps de compressió (s)	0,7815	2,4718	3,1854
Temps de descompressió (s)	0,0226	0,0199	0,0275
Entropia original	11,96	11,96	11,96
Entropia descomprimida	11,96	11,96	11,96

TAULA 3: COMPARACIÓ IMATGE AMB FILTRE F090W

Les imatges analitzades de MIRI donen els següents resultats: *jw02733002001_02101_00001_mirimage_uncal.fits*, que pertany al filtre F770W del mòdul MIRI [Fig. 2].

Mètrica	RICE	HCOMPRESS	GZIP_1
Mida original (KB)	154853,44	154853,44	154853,44
Mida comprimida (KB)	92207,81	89071,88	117680,62
Relació de compressió	1,68	1,74	1,32
Temps de compressió (s)	1,5501	4,0212	7,9581
Temps de descompressió (s)	0,0244	0,0213	0,0237
Entropia original	11,68	11,68	11,68
Entropia descomprimida	11,68	11,68	11,68

TAULA 4: COMPARACIÓ IMATGE AMB FILTRE F770W

Ara analitzem el fitxer *jw02733002001_02103_00001_mirimage_uncal.fits*, corresponent al filtre F1130W del mòdul MIRI [Fig. 2].

Mètrica	RICE	HCOMPRESS	GZIP_1
Mida original (KB)	154853,44	154853,44	154853,44
Mida comprimida (KB)	92123,44	88709,06	114904,69
Relació de compressió	1,68	1,75	1,35
Temps de compressió (s)	1,6059	4,1992	8,3194
Temps de descompressió (s)	0,0250	0,0169	0,0167
Entropia original	11,31	11,31	11,31
Entropia descomprimida	11,31	11,31	11,31

TAULA 5: COMPARACIÓ IMATGE AMB FILTRE F1130W

Per últim, trobem la següent imatge: *jw02733002001_02107_00001_mirimage_uncal.fits*, associat al filtre F1800W del mòdul MIRI [Fig. 7].

Mètrica	RICE	HCOMPRESS	GZIP_1
Mida original (KB)	154853,44	154853,44	154853,44
Mida comprimida (KB)	92008,12	90413,44	125299,69
Relació de compressió	1,68	1,71	1,24
Temps de compressió (s)	1,4004	4,2517	8,1093
Temps de descompressió (s)	0,0169	0,0154	0,0154
Entropia original	14,18	14,18	14,18
Entropia descomprimida	14,18	14,18	14,18

TAULA 6: COMPARACIÓ IMATGE AMB FILTRE F1800W

Després d'avaluar els tres algorismes de compressió —RICE, HCOMPRESS i GZIP— aplicats a les diverses imatge FITS d'alta resolució, podem extreure conclusions rellevants observant les dades de la següent gràfica que mostra el rendiment mitjà dels 3 algorismes amb les 6 imatges mencionades anteriorment:

Relació de compressió vs Temps de compressió

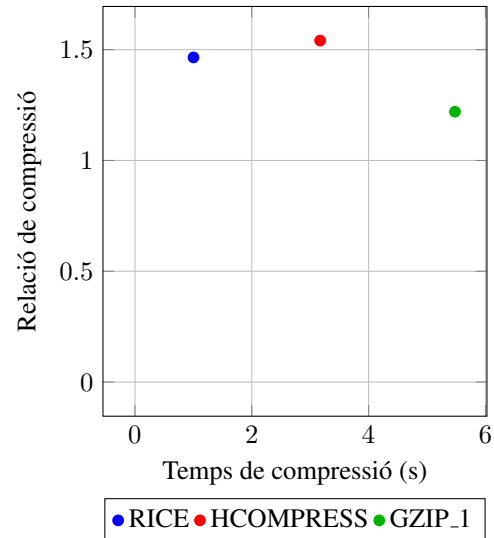


Fig. 8: Relació de compressió en funció del temps de compressió

L'algorisme HCOMPRESS ofereix la millor relació de compressió (1,541), fet que el posiciona com l'opció més eficaç en termes de reducció de mida dels fitxers. No obstant, aquest avantatge es reflexa en un temps de compressió elevat (3,17s), fet que pot limitar la seva utilitat en entorns on el temps és un recurs limitat, com és el nostre cas.

Per contra, l'algorisme RICE presenta un compromís molt equilibrat entre eficiència i velocitat, amb una bona relació de compressió (1,465) i el temps de compressió més baix (1,002 segons). Aquesta característica el fa especialment adequat per a aplicacions espacials, on cal un processament ràpid amb una compressió raonable. De fet, aquest algorisme és el que probablement utilitza actualment la missió JWST per a la compressió sense pèrdua de les dades a bord.

Finalment, GZIP ha estat l'algorisme amb pitjor comportament global: la seva relació de compressió (1,22) ha estat la més baixa, i el temps de compressió més alt (5,478 segons), fet que en limita clarament la viabilitat per a aquest tipus de dades. Tot i que el temps de descompressió ha estat lleugerament inferior en alguns casos, les diferències són pràcticament negligibles entre els tres algorismes.

En conclusió, i tenint en compte les restriccions de la missió espacial (com la limitació d'ample de banda i capacitat de càlcul), RICE es consolida com la millor opció global per a la compressió d'imatges astronòmiques, tot i que HCOMPRESS podria ser útil en escenaris on la màxima compressió sigui prioritària, es disposi de més temps per dur-la a terme i no sigui tan important el cost computacional.

5 CONCLUSIONS

A través de la realització d'aquest treball, he pogut endinsar-me en un àmbit altament especialitzat com és la compressió d'imatges astronòmiques, un tema que no només té una forta base teòrica, sinó també aplicacions

molt concretes i crítiques en contextos com les missions espacials. Durant aquest procés he après conceptes essencials sobre teoria de la informació, entropia, redundància i les bases matemàtiques que fan possible la compressió de dades sense pèrdua. A més, he adquirit coneixements tècnics sobre els formats d'imatge utilitzats en astrofotografia, com el FITS, i he entès per què aquests formats són fonamentals per preservar la qualitat i la integritat de les dades científiques. També he après com funciona la infraestructura del telescopi James Webb (JWST), incloent-hi els seus mòduls d'imatge, el procés de captació i transmissió de dades, i la 'pipeline' de calibració científica que processa les observacions des de l'espai fins al seu ús per part de la comunitat científica.

El punt clau d'aquest treball ha estat l'experimentació directa amb imatges reals del JWST i la comparació de diversos algorismes de compressió (RICE, HCOMPRESS i GZIP) fent servir la llibreria fpack. Aquest procés m'ha permès entendre com s'apliquen realment aquestes tècniques, quins compromisos existeixen entre eficiència, velocitat i pèrdua d'informació, i per què certs algorismes (com RICE) són preferits en missions espacials reals en les quals es treballa dins el context astrofotogràfic.

Finalment, aquest treball m'ha fet reflexionar sobre la importància de l'optimització de recursos en entorns amb limitacions estrictes com l'espai exterior. He après que la compressió d'imatges no és només una qüestió de reduir mida, sinó una eina fonamental per garantir la viabilitat operativa d'un projecte científic, i que la tria d'un algoritme òptim depèn sempre del context: ample de banda disponible, capacitat de càlcul a bord, i requisits científics de precisió en les imatges. En definitiva, aquest projecte m'ha proporcionat una visió integral de tot el cicle de vida de les dades astronòmiques —des de la seva captura fins a la seva preparació per a l'anàlisi científic— i m'ha permès adquirir una experiència tècnica i pràctica molt valuosa que connecta el món de l'enginyeria informàtica amb la recerca científica espacial.

A més, aquest aprenentatge obre la porta a futures línies de treball que permetin aprofundir en la millora dels sistemes de compressió i com adaptar-los a diferents missions i escenaris d'observació, ja sigui proposant modificacions dels algorismes ja existents per a intentar oferir un millor rendiment a l'actual o poder fer comparatives més extenses amb altres tipus d'imatges espacials de diferents missions per a poder observar el comportament dels diferents algorismes en cada cas específic.

6 AGRAÏMENTS

Primerament, voldria agrair al meu tutor Joan Serra per haver decidit tutoritzar el meu treball i confiar en la meua proposta de Treball de Fi de Grau, a més d'oferir ajuda sempre que ho he necessitat i fer-me propostes de millora per a poder extreure el màxim durant aquesta etapa de realització del treball. També voldria donar les gràcies als meus companys, els quals m'han fet sentir-me acompanyat durant tota la durada del treball.

Per últim, vull mencionar a la meua parella, la qual sempre m'ha donat suport durant tota la realització del projecte, fins i tot en els moments de més càrrega de treball que em feien pensar que no podria acabar-lo, i m'ha animat a seguir endavant fins a veure'm finalitzar aquest treball de fi de grau.

REFERÈNCIES

- [1] "JWST Mid-Infrared Instrument." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-mid-infrared-instrument>.
- [2] "JWST Near-Infrared Camera." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-camera>.
- [3] "JWST Near-Infrared Spectrograph." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-spectrograph>.
- [4] "JWST Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-imager-and-slitless-spectrograph>.
- [5] "JWST Integrated Science Instrument Module." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-hardware/jwst-integrated-science-instrument-module>.
- [6] "JWST Solid State Recorder." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-hardware/jwst-solid-state-recorder>.
- [7] "Science Calibration Pipeline." (), adr.: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-science-calibration-pipeline>.
- [8] P. R., H. U. i S. S., "Satellite Image Compression using RICE Algorithm," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2019.
- [9] "SAOImage DS9 Download Page." (), adr.: <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimages9/download>.
- [10] "How Are Webb's Full-Color Images Made?" (), adr.: <https://webbtelescope.org/contents/articles/how-are-webbs-full-color-images-made>.
- [11] "MAST, JWST." (), adr.: <https://mast.stsci.edu/search/ui/#/jwst>.
- [12] "FITS Image Compression Utilities (Fpack/Funpack)." (), adr.: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/fitsio/fpack/>.
- [13] "Fpack and Funpack for Windows." (), adr.: <https://github.com/champcm/Fpack-and-Funpack-for-Windows/>.

APÈNDIX

A continuació hi ha el script de Python que ha sigut utilitzat per a realitzar la comparativa pràctica dels diferents algorismes que s'han provat en l'anàlisi de rendiment.

```

1 import subprocess
2 import os
3 import shutil
4 import time
5 from pathlib import Path
6 from skimage.measure import shannon_entropy
7 import numpy as np
8 from astropy.io import fits
9 import sys
10
11 # Algoritmes a utilitzar
12 algorithms = {
13     "rice": [],
14     "gzip_1": ["-g"],
15     "hcompress": ["-h"]
16 }
17
18 input_file = "
19     jw02733002001_02107_00001_mirimage_uncal.
20     fits"
21 results = {}
22
23 def calculate_entropy(file_path):
24     """Calcula l'entropia de la imatge dins
25     del fitxer FITS."""
26     with fits.open(file_path) as hdul:
27         for hdu in hdul:
28             if isinstance(hdu.data, np.ndarray):
29                 image_data = hdu.data.astype(
30                     np.float32)
31                 return shannon_entropy(
32                     image_data)
33     return None
34
35 def calculate_compressed_entropy(file_path):
36     """Calcula l'entropia d'un fitxer .fz."""
37     with open(file_path, "rb") as f:
38         data = f.read()
39         return shannon_entropy(np.frombuffer(
40             data, dtype=np.uint32))
41
42 def decompress_file(input_file, output_file):
43     """Descomprimeix un fitxer .fz amb FPack.
44     """
45     subprocess.run(["C:\\TFG\\x64\\FPack.exe",
46                     "-d", input_file])
47     decompressed_path = input_file.replace('.
48         fz', '')
49
50     if os.path.exists(decompressed_path):
51         if os.path.exists(output_file):
52             os.remove(output_file)
53             os.rename(decompressed_path,
54                       output_file)
55     else:
56         print(f"Error: No s'ha creat
57             correctament el fitxer
58             descomprimit: {decompressed_path}")
59
60 # Obtenir el filtre del FITS
61 with fits.open(input_file) as hdul:
62     header = hdul[0].header
63     filter_used = header.get('FILTER', '
64         Desconegut')
65
66 # Redirigir la sortida a un fitxer
67 with open("algorithm_comparison_results.txt",

```

```

55 "w") as file:
56     sys.stdout = file
57
58 print(f"Fitxer analitzat: {input_file}")
59 print(f"Filtre utilitzat: {filter_used}")
60
61 for name, args in algorithms.items():
62     output_file = input_file + f".{name}.
63         fz"
64     decompressed_file = input_file + f".{
65         name}.decompressed.fits"
66
67     shutil.copy(input_file, "temp.fits")
68
69     if os.path.exists("temp.fits.fz"):
70         os.remove("temp.fits.fz")
71
72     start_time = time.time()
73     subprocess.run(["C:\\TFG\\x64\\FPack.
74         exe", *args, "temp.fits"])
75     compression_time = time.time() -
76         start_time
77
78     compressed_size = os.path.getsize("
79         temp.fits.fz")
80     original_size = os.path.getsize(
81         input_file)
82     compression_ratio = original_size /
83         compressed_size
84
85     original_entropy = calculate_entropy(
86         input_file)
87     if original_entropy is None:
88         print(f"Advertència: No s'han
89             pogut llegir les dades del
90             fitxer original.")
91
92     compressed_entropy =
93         calculate_compressed_entropy("temp
94             .fits.fz")
95
96     decompression_start_time = time.time()
97     decompress_file("temp.fits.fz",
98         decompressed_file)
99     decompression_time = time.time() -
100         decompression_start_time
101
102     decompressed_entropy =
103         calculate_entropy(
104             decompressed_file)
105     if decompressed_entropy is None:
106         print(f"Advertència: No s'han
107             pogut llegir les dades del
108             fitxer descomprimit.")
109
110     results[name] = {
111         "original_size": original_size,
112         "size": compressed_size,
113         "time": compression_time,
114         "compression_ratio":
115             compression_ratio,
116         "original_entropy":
117             original_entropy if
118             original_entropy is not None
119             else "N/A",
120         "compressed_entropy":
121             compressed_entropy,
122         "decompressed_entropy":
123             decompressed_entropy if
124             decompressed_entropy is not
125             None else "N/A",
126         "decompression_time":
127             decompression_time
128     }
129
130 if os.path.exists(output_file):
131     os.remove(output_file)
132     os.rename("temp.fits.fz", output_file)

```

```
105     for algo, data in results.items():
106         print(f"\n{algo}:")
107         print(f"  Mida original: {data['original_size'] / 1024:.2f} KB")
108         print(f"  Mida comprimida: {data['size'] / 1024:.2f} KB")
109         print(f"  Relacio de compressio: {data['compression_ratio']:.2f}")
110         print(f"  Temps de compressio: {data['time']:.4f} segons")
111         print(f"  Temps de descompressio: {data['decompression_time']:.4f} segons")
112         print(f"  Entropia original: {data['original_entropy']}")
113         print(f"  Entropia descomprimida: {data['decompressed_entropy']}")
```

Listing 1: Script de compressió de les imatges del JWST