



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Analisi della Popolazione dei Detriti in
Ambiente Geostazionario**

Relatore: Prof. Enrico Lorenzini

Enrico Lorenzini

Correlatore: Dr. Claudio Bombardelli,
Università Politecnica di Madrid

Laureando: Andrea Galvani
Matricola: 1084117

Anno Accademico 2014/2105

"The exploration and use of outer space (...) shall be carried out for the benefit and in the interests of all countries, irrespective of their degree of economic or scientific development, and shall be the province of all mankind."

"Outer space (...) shall be free for exploration and use by all States (...)."

"States Parties to the Treaty shall pursue studies of outer space, including the Moon and other celestial bodies, and conduct exploration of them so as to avoid their harmful contamination (...) and, where necessary, shall adopt appropriate measures for this purpose."

Outer Space Treaty – United Nations

January 27, 1967

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Abstract

Scuola di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Aerospace Engineering

Analisi della Popolazione dei Detriti in Ambiente Geostazionario

by Andrea GALVANI

Il lavoro di tesi svolto tratta del problema dei detriti spaziali in ambiente geostazionario, in particolare del loro impatto ambientale, volto all'identificazione dei più pericolosi rispetto ai satelliti operativi presenti. Si propone quindi una metodologia di identificazione per i corpi a più elevato rischio ambientale in vista di possibili manovre di rimozione futura. È stata identificata una zona protetta, al cui interno sono stati tradotti in un indice di rischio la permanenza dei corpi non controllati, la loro massa e la velocità relativa all'orbita geostazionaria ideale. Secondo questo indice è stata stilata una classifica che indica i corpi più pericolosi e che dovrebbero essere studiati più a fondo nella loro dinamica per una possibile progettazione di una missione di Active Debris Removal.

Indice

Abstract	iii
Contents	iv
List of Figures	vii
List of Tables	ix
Abbreviations	xi
1 Introduzione	1
2 Equazioni propagatore	5
2.1 Problema dei due corpi perturbato	5
2.2 Armoniche del geopotenziale	7
2.3 Perturbazioni di terzo corpo	10
2.4 Pressione di radiazione solare	12
3 Validazione del propagatore	15
3.1 Confronto con TLE	15
3.1.1 Errore TLE	16
3.1.2 Dati propagati e TLE	17
3.1.2.1 Classe L1	21
3.1.2.2 Classe L2	26
3.1.2.3 Classe L3	27
3.1.2.4 Classe D	31
3.1.2.5 Classe C1	38
3.1.2.6 Classe C2	38
3.2 Piano di Laplace	41
3.2.1 Definizione del piano e comportamento	41
3.2.2 Verifica del propagatore	42
4 Analisi corpi non controllati	47
4.1 Disposal guidelines	47
4.2 Database di partenza	50
4.3 Calcolo percentuali	52
4.4 Pericolosità oggetti	55
4.4.1 Velocità relativa	56

4.4.2	Coefficiente di rischio sul tempo	57
4.4.3	Massa catastroficamente frammentata	59
4.4.4	Indice di danno ambientale	61
4.4.5	Classificazione	61
4.5	Proposte di miglioramento	63
4.6	Conclusioni	65
A	TLE simulazione	69
A.1	Validazione propagatore	69
A.1.1	Confronto TLE/PROP	69
A.1.1.1	Classe L1	69
A.1.1.2	Classe L2	70
A.1.1.3	Classe L3	70
A.1.1.4	Classe D	71
A.1.1.5	Classe C1	71
A.1.1.6	Classe C2	72
A.1.2	Piano di Laplace	72
A.2	Controllo precisione calcolo zone	72
B	Classificazione generale	73
	Bibliografia	91

Elenco delle figure

3.1	Corpo 1985-035 B	18
3.2	Corpo 1994-060 A	19
3.3	Corpo 2006-048 A	20
3.4	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1984-063 A	22
3.5	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1985-035 B	22
3.6	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1986-090 D	23
3.7	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1990-061 A	23
3.8	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1991-014 A	24
3.9	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1992-088 A	24
3.10	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1993-039 A	25
3.11	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1995-054 A	25
3.12	Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 2000-036 A	26
3.13	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1967-094 A	27
3.14	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1984-078 A	28
3.15	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1985-035 A	28
3.16	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1988-081 A	29
3.17	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1990-016 A	29
3.18	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1993-058 B	30
3.19	Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1994-060 A	30
3.20	Confronto TLE/PROP - Classe L3 - Corpo 1971-095 B	32
3.21	Confronto TLE/PROP - Classe L3 - Corpo 1985-007 A	32
3.22	Confronto TLE/PROP - Classe L3 - Corpo 1986-027 A	33
3.23	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 1968-116 A	34
3.24	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 1969-045 A	34
3.25	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 1978-113 A	35
3.26	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 1978-113 D	35
3.27	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 1985-024 A	36
3.28	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 1997-040 A	36
3.29	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 2006-048 A	37
3.30	Confronto TLE/PROP - Classe D - Corpo 2008-006 C	37
3.31	Confronto TLE/PROP - Classe C1 - Corpo 2005-049 B	39
3.32	Confronto TLE/PROP - Classe C1 - Corpo 2007-021 A	39
3.33	Confronto TLE/PROP - Classe C1 - Corpo 2009-008 B	39
3.34	Confronto TLE/PROP - Classe C1 - Corpo 2010-037 B	40
3.35	Confronto TLE/PROP - Classe C2 - Corpo 2005-044 A	40
3.36	Confronto TLE/PROP - Classe C2 - Corpo 2008-011 A	41
3.37	Confronto TLE/PROP - Classe C2 - Corpo 2009-101 A	41

3.38	Variazione inclinazione nel tempo	43
3.39	Variazione inclinazione nel tempo	44
3.40	Variazione ascensione retta del nodo ascendente nel tempo	44
3.41	Variazione ascensione retta del nodo ascendente nel tempo	45
3.42	Puntamento del vettore ortogonale al piano orbitale	45
3.43	Puntamento del vettore ortogonale al piano orbitale	46
4.1	Combinazioni di puntamento e modulo del vettore eccentricità di un'orbita che causano un rientro del corpo orbitante nella zona protetta dell'orbita GEO in 40 anni	49
4.2	ΔV richiesto in funzione dell'altezza del re-orbit	49
4.3	Percentuali di corpi nelle varie classi	51
4.4	Confronto classi generali (controllati / non)	52
4.5	Suddivisione zone di pericolosità	52
4.6	Orbita ad hoc per la verifica del calcolo delle percentuali	54
4.7	Percentuale di permanenza rispetto al tempo di integrazione	55
4.8	Fattore di rischio sulla velocità relativa	57
4.9	Andamento della velocità relativa rispetto all'inclinazione	58
4.10	Distribuzione gaussiana dei pesi	58
4.11	Coefficiente di rischio sulla massa	60

Elenco delle tabelle

3.1	Validazione propagatore - Corpi di classe <i>L1</i>	21
3.2	Validazione propagatore - Corpi di classe <i>L2</i>	27
3.3	Validazione propagatore - Corpi di classe <i>L3</i>	31
3.4	Validazione propagatore - Corpi di classe <i>D</i>	33
3.5	Validazione propagatore - Corpi di classe <i>C1</i>	38
3.6	Validazione propagatore - Corpi di classe <i>C2</i>	40
3.7	Dati iniziali delle orbite	42
4.1	Composizione classi, dettaglio	51
4.2	Composizione classi, generale	51
4.3	Dati orbitali dell'orbita di verifica	54
4.4	Percentuali di permanenza, $\Delta t = 2000s$	54
4.5	Percentuali di permanenza, $\Delta t = 1000s$	55
4.6	Percentuali di permanenza, $\Delta t = 250s$	55
4.7	Pesi delle percentuali di tempo	59
4.8	Classifica corpi di classe <i>L1</i>	62
4.9	Classifica corpi di classe <i>L2</i>	62
4.10	Classifica corpi di classe <i>L3</i>	62
4.11	Classifica corpi di classe <i>D</i>	63
4.12	Classifica corpi di classe <i>I</i>	63
4.13	Classifica generale	64
B.1	Classifica generale completa, 1-25	73
B.2	Classifica generale completa, 26-70	74
B.3	Classifica generale completa, 71-115	75
B.4	Classifica generale completa, 116-160	76
B.5	Classifica generale completa, 161-205	77
B.6	Classifica generale completa, 206-250	78
B.7	Classifica generale completa, 251-295	79
B.8	Classifica generale completa, 296-340	80
B.9	Classifica generale completa, 341-385	81
B.10	Classifica generale completa, 386-430	82
B.11	Classifica generale completa, 431-475	83
B.12	Classifica generale completa, 476-520	84
B.13	Classifica generale completa, 521-565	85
B.14	Classifica generale completa, 566-610	86
B.15	Classifica generale completa, 611-655	87
B.16	Classifica generale completa, 656-700	88

B.17 Classifica generale completa, 701-734 89

Abbreviations

ADR	A ctive D ebris R emoval
ESOC	E uropean S pace O peration C entre
GEO	G eostationary E arth O rbital
IADC	I nter- A gency S pace D ebris C oordination C ommittee
LEO	L ow E arth O rbital
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
RAAN	R ight A scension of A scending N ode
TLE	T wo L ine E lements

Vorrei innanzitutto ringraziare tutti coloro che hanno contribuito e sostenuto la realizzazione di questa tesi.

Un primo ringraziamento va al dottor Claudio Bombardelli, che mi ha accolto al suo dipartimento e ha indirizzato il lavoro, aiutandomi nelle questioni concettuali durante lo sviluppo, fornendomi pieno supporto in ogni materia e semplificando le ricerche necessarie.

Vorrei poi ringraziare Hodei e Juan Luis per l'aiuto e il supporto sulle questioni tecniche del lavoro.

Un ringraziamento va anche al professor Enrico Lorenzini per la solerzia con cui ha risposto alle mie necessità tecniche e burocratiche nei giorni precedenti alla presentazione.

Un grazie anche alla mia famiglia e ai miei amici più cari, che mi hanno aiutato a superare i momenti difficili che si sono presentati lungo tutto il percorso.

Infine un ringraziamento a mio cugino Bobby, a cui il lavoro è dedicato. Senza di lui niente di tutto questo esisterebbe.

Capitolo 1

Introduzione

La citazione in apertura introduce indirettamente quello che è il problema che verrà affrontato in seguito, ovvero la pericolosità dei corpi non controllati presenti in orbita. Lo presenta in maniera indiretta perché viene posto l'accento non tanto sul problema dei detriti in sé, ma sulle motivazioni per cui essi sono pericolosi. Chiunque deve poter essere libero di sfruttare lo spazio che circonda il nostro pianeta, ma se quelli che lo sfruttano prima, per maggiore disponibilità di risorse, non ne fanno buon uso, esso non sarà più utilizzabile per coloro che ci possono arrivare solo in un secondo momento. A questa motivazione, che può essere vista un po' come la più romantica, se ne affianca anche una estremamente pratica, ovvero che più corpi non controllati ci sono in orbita e maggiore sarà la probabilità che questi interferiscano con altri veicoli, magari ancora in funzione e operativi.

Una delle orbite di maggiore interesse, quella su cui di focalizzerà l'attenzione, è l'orbita geostazionaria. Dal nome si può subito capire la sua importanza: è infatti l'unica orbita che garantisce un periodo di rivoluzione dei corpi uguale a quello di rotazione della Terra sul proprio asse. Molti sono i vantaggi che discendono da questo comportamento e uno dei principali è il fatto che questa sincronizzazione tra periodi permette di rendere il moto relativo tra i due corpi quasi nullo, a vantaggio di puntamenti di sottosistemi per esempio. Un altro punto molto importante è la scarsa presenza di effetti dissipativi dell'energia del corpo, il che gli permette di essere molto stabile nel tempo e si traduce quindi in un minore utilizzo di risorse per lo station-keeping.

Non ci sono però solo aspetti positivi in tutto ciò, purtroppo, e anche le orbite geostazionarie sono affette da problemi di varia natura. Uno tra tutti deriva proprio dalla scarsa o nulla presenza di effetti dissipativi in orbita. Ne consegue che

i detriti che sono presenti non hanno modo di cambiare la propria orbita, come avviene invece nelle orbite terrestri molto più basse (LEO) con il drag atmosferico, che rallenta continuamente il corpo fino a quando questo non si brucia, di solito completamente, nell'atmosfera. Nelle orbite GEO manca quindi questo effetto di "pulizia naturale".

I detriti, che rimangono quindi in orbita, sono causa di problemi di varia natura, sia tecnica che economica. L'unicità delle caratteristiche dell'orbita GEO la rende molto preziosa e ambita, ma con la presenza di corpi non controllati le possibilità di utilizzo (ovvero le posizioni longitudinali che si possono occupare) diminuiscono. In più quando si parla delle problematiche generate dai detriti orbitali non si può non considerare l'effetto cascata, ovvero il fatto che maggiore è il numero di corpi non controllati in orbita e maggiore sarà la possibilità che questi collidano tra di loro o, peggio, con satelliti ancora funzionanti. Il tutto genererebbe altri detriti e si entrerebbe in un circolo vizioso che porterebbe all'aumento esponenziale del numero di corpi non controllati in orbita e al suo completo inutilizzo. In questo caso c'è comunque un punto a favore delle orbite geostazionarie cioè il fatto che la loro altitudine permette di avere delle velocità molto inferiori rispetto alle orbite più basse. Questo fa sì che le collisioni critiche siano più difficili da verificarsi, ma non è una sufficiente motivazione per trascurare il problema.

Un altro aspetto del problema è la presenza di perturbazioni, che influenzano la dinamica di ogni corpo in orbita. Se non ci fossero, i detriti si limiterebbero ad occupare uno degli slot longitudinali disponibili in ambiente geostazionario e i problemi causati sarebbero limitati. Questo però non corrisponde alla realtà dei fatti, che vede questi corpi non controllati spostarsi in longitudine e latitudine lungo l'anello geostazionario. Non si ha quindi un interessamento solamente di una particolare longitudine, ma di un range per i cosiddetti corpi libranti o di tutte quante per i corpi driftanti. Lo studio delle perturbazioni può poi portare alla scoperta di effetti in cui esse si combinano, come per esempio le attrazioni di terzo corpo di Luna e Sole che combinandosi con il termine J_2 del geopotenziale producono una precessione del piano orbitale di ogni corpo.

Lo studio della dinamica dei corpi non controllati permette la loro collocazione in classi, derivanti dal loro comportamento. La natura di queste classi può essere simile, ma possono essere molto diversi i problemi causati dai corpi a loro appartenenti.

Molte sono le proposte e le azioni intraprese per migliorare questa situazione o perlomeno fare in modo che non peggiori. Una di queste sono delle guidelines

che sono state decise e accettate da un gran numero di paesi che correntemente lanciano in qualsiasi orbita spaziale. Queste riguardano, per esempio, la rimozione dei satelliti dalle orbite una volta che hanno cessato di essere operativi e il loro riposizionamento in orbite apposite per il contenimento dei relitti satellitari. Regolano anche il comportamento riguardo a tutte quelle parti che vengono rimosse dal satellite prima che esso inizi la sua funzione, come coperchi di telescopi o porzioni di lanciatori.

Le guidelines ovviamente non possono essere applicate per veicoli che sono stati lanciati prima della loro introduzione e che, con ogni probabilità, sono destinati a rimanere nelle orbite sensibili. Anche per questo tipo di corpi sono state proposte delle soluzioni, indicate con l'acronimo ADR o Active Debris Removal, che possono prevedere o meno il contatto con il corpo in questione.

In quest'ultimo caso i costi di realizzazione delle missioni sono troppo alti perché si possa procedere indiscriminatamente alla rimozione di tutti i corpi non controllati presenti in orbita. È quindi necessario operare una scelta, ovvero decidere quali sono i corpi potenzialmente più pericolosi e che hanno quindi priorità nella rimozione e su questo si focalizzerà il lavoro che segue.

Capitolo 2

Equazioni propagatore

In questo capitolo verranno presentate le relazioni matematiche che stanno alla base del propagatore orbitale che verrà utilizzato in seguito per le varie simulazioni. Esso considererà il moto come soluzione del problema dei due corpi, a cui verranno aggiunte delle perturbazioni come le armoniche del geopotenziale, presenze di altri corpi e la pressione di radiazione solare. Verrà poi indicato per ognuna di queste in che limiti sono state applicate.

2.1 Problema dei due corpi perturbato

In questo capitolo sono presentate le equazioni che sono state utilizzate per il propagatore orbitale sviluppato. L'equazione fondamentale è quella del problema dei due corpi, in cui sono state inserite le perturbazioni orbitali come accelerazioni:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu_E}{r^3}\mathbf{r} + \mathbf{a}_{GEO} + \mathbf{a}_{3B} + \mathbf{a}_{SRP} \quad (2.1)$$

che possono essere proiettate sui tre assi del sistema di riferimento, ottenendo

$$\ddot{x} = -\frac{\mu_E}{r^3}x + a_{xGEO} + a_{x3B} + a_{xSRP} \quad (2.2a)$$

$$\ddot{y} = -\frac{\mu_E}{r^3}y + a_{yGEO} + a_{y3B} + a_{ySRP} \quad (2.2b)$$

$$\ddot{z} = -\frac{\mu_E}{r^3}z + a_{zGEO} + a_{z3B} + a_{zSRP} \quad (2.2c)$$

con $\mu_E = 398600.432897 \text{ km}^3/\text{s}^2$. Le tre accelerazioni di perturbazione sono rispettivamente quella dovuta al geopotenziale (ovvero al fatto che la Terra non è una perfetta sfera, come il problema dei due corpi suppone), quella dovuta alle

attrazioni gravitazionali di Sole e Luna e quella dovuta alla pressione di radiazione solare.

$$\mathbf{a}_{GEO} = \mathbf{a}_{J_2} + \mathbf{a}_{C_{22}} + \mathbf{a}_{J_3} + \mathbf{a}_{J_4} \quad (2.3a)$$

$$\mathbf{a}_{3B} = \mathbf{a}_{3BM} + \mathbf{a}_{3BS} \quad (2.3b)$$

Per quanto riguarda il geopotenziale si è verificato che i contributi delle armoniche superiori a quelle indicate avevano contributi di svariati ordini di grandezza inferiori e avevano un'influenza trascurabile sui risultati. Sono stati quindi trascurate nella propagazione, in favore di una più rapida elaborazione computazionale. Anche le armoniche J_3 e J_4 hanno, rispetto alle armoniche J_2 e C_{22} , un'influenza che può essere trascurabile, ma includerle non influenzava eccessivamente le simulazioni e quindi non sono state tolte.

Nelle prossime sezioni, verranno presentati nel dettaglio come sono stati calcolati questi contributi, rispettivamente in SEZIONE 2.2 verrà trattato il geopotenziale, in SEZIONE 2.3 le perturbazioni di terzo corpo e in SEZIONE 2.4 la pressione di radiazione solare.

Il sistema di riferimento considerato è il sistema rettangolare in cui l'asse x punta dal centro del corpo principale, la Terra, al punto d'Ariete, l'asse y è ruotato rispetto al primo di 90° sul piano dell'eclittica e l'asse z punta verso il polo nord dell'eclittica, rendendo la terna levogira.

Il vettore di stato iniziale del corpo che viene propagato è ricavato in questo sistema di riferimento dagli elementi orbitali, [14], ricavati direttamente dalle TLE di ogni oggetto considerato come:

$$[x_0, y_0, z_0] = R \cdot \mathbf{U} \quad (2.4)$$

e

$$[\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0] = \dot{R} \cdot \mathbf{U} + R \dot{f} \cdot \mathbf{V} \quad (2.5)$$

dove

$$U_1 = \cos u \cdot \cos \Omega - \sin u \cdot \sin \Omega \cdot \cos i \quad (2.6a)$$

$$U_2 = \cos u \cdot \sin \Omega - \sin u \cdot \cos \Omega \cdot \cos i \quad (2.6b)$$

$$U_3 = \sin u \cdot \sin i \quad (2.6c)$$

$$V_1 = -\sin u \cdot \cos \Omega - \cos u \cdot \sin \Omega \cdot \cos i \quad (2.7a)$$

$$V_2 = -\sin u \cdot \sin \Omega - \cos u \cdot \cos \Omega \cdot \cos i \quad (2.7b)$$

$$V_3 = \cos u \cdot \cos i \quad (2.7c)$$

In queste ultime abbiamo $u = \omega + \theta_0$ che rappresenta la posizione dell'oggetto nella sua orbita, con ω l'argomento del perigeo e θ_0 l'anomalia vera iniziale, Ω rappresenta poi l'ascensione retta del nodo ascendente (spesso indicata anche come *RAAN*) e infine con i indichiamo l'inclinazione dell'orbita. Gli altri parametri sono

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (2.8)$$

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{\mu_E}{a}} \frac{e \sin f}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (2.9)$$

$$R\dot{f} = \sqrt{\frac{\mu_E}{a}} \frac{1 + e \cos f}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (2.10)$$

dove si intende $f = u - \omega = \theta_0$.

2.2 Armoniche del geopotenziale

Le equazioni del geopotenziale sono espresse nel sistema di riferimento equatoriale, quindi abbiamo bisogno di ruotare le componenti del vettore posizione del veicolo, come segue

$$\alpha_0 = -0.641 \cdot T \quad (2.11a)$$

$$\delta_0 = 90.0 - 0.557 \cdot T \quad (2.11b)$$

$$W_0 = 190.147 + 360.985623 \cdot d \quad (2.11c)$$

dove T è il tempo in secoli giuliani (in cui ogni anno è composto da 365.25 giorni) passato dalla data di riferimento, che è il primo gennaio 2000 alle ore 12 (e che in giorni giuliani è la data 2451545.0), e gli angoli α_0 , δ_0 e W_0 sono ottenuti da [3]. Abbiamo quindi

$$T = \frac{JD - 2451545.0}{36525} \quad (2.12)$$

dove JD è la data giuliana dell'istante di tempo considerato. La matrice di rotazione risulta quindi

$$[R] = \begin{bmatrix} -C_W S_\alpha - S_W S_\delta C_\alpha & C_W C_\alpha - S_W S_\delta S_\alpha & S_W C_\delta \\ S_W S_\alpha - C_W S_\delta C_\alpha & -S_W C_\alpha - C_W C_\delta S_\alpha & C_W C_\delta \\ C_\delta C_\alpha & C_\delta S_\alpha & S_\delta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

dove sono stati omessi i pedici dei tre angoli per brevità. Con C si intende il coseno dell'angolo, con S il seno. La rotazione al contrario viene effettuata dopo aver calcolato le tre componenti del geopotenziale, per riportare tutto nel sistema di riferimento rettangolare.

L'equazione fondamentale che esprime il potenziale gravitazionale è, [20],

$$\mathcal{U} = \frac{\mu_E}{r} \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_E}{r} \right)^n (C_n^{(m)} \cos m\lambda + S_n^{(m)} \sin m\lambda) P_n^{(m)}(\cos \theta) \right] \quad (2.14)$$

con n e m gli ordini dell'armonica, λ la longitudine dell'oggetto, θ la colatitudine e $P_n^{(m)}$ la corrispondente funzione di Legendre, data da

$$P_n^{(m)}(x) = \frac{1}{2^n n!} (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^{n+m}(x^2-1)^n}{dx^{n+m}} \quad (2.15)$$

Le accelerazioni si ricavano dalla derivata del potenziale rispetto alle coordinate del sistema di riferimento, ma prima dobbiamo esprimere tutti i termini in questo sistema di riferimento, cosa che porta a

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.16)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (2.17)$$

$$\lambda = \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \quad (2.18)$$

anche se poi questa verrà sostituita con la funzione `atan2` nel codice MatLab, essendo quest'ultima in grado restituire l'angolo da 0° a 360° .

Esprimendo quindi le variabili in funzione di x, y, z abbiamo per l'armonica

$n = 2$ e $m = 0$, ovvero il termine J_2

$$a_{xJ_2} = - \frac{3\mu_E J_2 R_E^2 x (x^2 + y^2 - 4z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} \quad (2.19a)$$

$$a_{yJ_2} = - \frac{3\mu_E J_2 R_E^2 y (x^2 + y^2 - 4z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} \quad (2.19b)$$

$$a_{zJ_2} = - \frac{3\mu_E J_2 R_E^2 z (3x^2 + 3y^2 - 2z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} \quad (2.19c)$$

Per l'armonica $n = 2$ e $m = 2$, ovvero il termine C_{22} abbiamo

$$\begin{aligned} a_{xC_{22}} = & - \frac{9\mu_E R_E^2 x (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} [C_{22} \cos(\mathfrak{T}) + S_{22} \sin(\mathfrak{T})] \\ & - \frac{6\mu_E R_E^2 y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} [C_{22} \sin(\mathfrak{T}) - S_{22} \cos(\mathfrak{T})] \\ & - \frac{6\mu_E R_E^2 x z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} [C_{22} \cos(\mathfrak{T}) + S_{22} \sin(\mathfrak{T})] \end{aligned} \quad (2.20a)$$

$$\begin{aligned} a_{yC_{22}} = & - \frac{6\mu_E R_E^2 x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} [C_{22} \sin(\mathfrak{T}) + S_{22} \cos(\mathfrak{T})] \\ & - \frac{9\mu_E R_E^2 y (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} [C_{22} \cos(\mathfrak{T}) - S_{22} \sin(\mathfrak{T})] \\ & - \frac{6\mu_E R_E^2 y z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} [C_{22} \cos(\mathfrak{T}) + S_{22} \sin(\mathfrak{T})] \end{aligned} \quad (2.20b)$$

$$a_{zC_{22}} = - \frac{15\mu_E R_E^2 z (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{7}{2}}} [C_{22} \cos(\mathfrak{T}) + S_{22} \sin(\mathfrak{T})] \quad (2.20c)$$

con $\mathfrak{T} = 2 \arctan(y/x)$ oppure la funzione $\arctan2(y, x)$. Notiamo che è solo in questa armonica che troviamo la funzione \arctan e questo è perché, di quelle considerate, il termine C_{22} è l'unico che varia sia con la longitudine che con la latitudine. È infatti un termine detto tesserale, mentre i termini con $m = 0$ sono detti settoriali, perché variano solamente con la longitudine.

Di secondaria importanza rispetto a questi primi due termini sono le armoniche $n = 3$ e $m = 0$, ovvero il termine J_3 , e $n = 4$ e $m = 0$, ovvero il termine J_4 . Per il

termine J_3 abbiamo

$$a_{xJ_3} = - \frac{5\mu_E J_3 R_E^3 x z (3x^2 + 3y^2 - 4z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{9}{2}}} \quad (2.21a)$$

$$a_{yJ_3} = - \frac{5\mu_E J_3 R_E^3 y z (3x^2 + 3y^2 - 4z^2)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{9}{2}}} \quad (2.21b)$$

$$a_{zJ_3} = \frac{\mu_E J_3 R_E^3 (3x^4 + 6x^2 y^2 - 24x^2 z^2 + 3y^4 - 24y^2 z^2 + 8z^4)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{9}{2}}} \quad (2.21c)$$

e per il termine J_4

$$a_{xJ_4} = \frac{15\mu_E J_4 R_E^4 x (x^4 + 2x^2 y^2 - 12x^2 z^2 + y^4 - 12y^2 z^2 + 8z^4)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{11}{2}}} \quad (2.22a)$$

$$a_{yJ_4} = \frac{15\mu_E J_4 R_E^4 y (x^4 + 2x^2 y^2 - 12x^2 z^2 + y^4 - 12y^2 z^2 + 8z^4)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{11}{2}}} \quad (2.22b)$$

$$a_{zJ_4} = \frac{5\mu_E J_4 R_E^4 z (15x^4 + 30x^2 y^2 - 40x^2 z^2 + 15y^4 - 40y^2 z^2 + 8z^4)}{2(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{11}{2}}} \quad (2.22c)$$

I coefficienti, invece, valgono:

$$J_2 = 1082.63 \cdot 10^{-6}$$

$$C_{22} = 0.157474 \cdot 10^{-5}$$

$$S_{22} = -0.902376 \cdot 10^{-6}$$

$$J_3 = -2.51 \cdot 10^{-6}$$

$$J_4 = -1.60 \cdot 10^{-6}$$

2.3 Perturbazioni di terzo corpo

Le accelerazioni di terzo corpo sono calcolate, [20], come

$$\mathbf{a}_{3B} = -Gm \left(\frac{\mathbf{r}_{VP}}{r_{VP}^3} + \frac{\mathbf{r}_P}{r_P^3} \right) \quad (2.24)$$

dove $\mathbf{r}_{VP} = \mathbf{r}_V - \mathbf{r}_P$, con V che indica il veicolo considerato e P la massa secondaria perturbante (Sole o Luna), m è la massa del terzo corpo considerato e G è la costante gravitazionale universale. Analogamente all'attrazione terrestre, nel

codice vengono considerati i termini

$$\begin{aligned}\mu_S &= G \cdot m_s \\ \mu_M &= G \cdot m_m\end{aligned}$$

che valgono rispettivamente

$$\begin{aligned}\mu_S &= 1.327124400179869 \cdot 10^{11} \\ \mu_M &= 4.902800582147796 \cdot 10^3\end{aligned}$$

I due algoritmi che permettono di calcolare i vettori delle posizione di Sole e Luna sono approssimati e sono presi da [23], capitolo 5.

Il vettore posizione del Sole nel sistema di riferimento rettangolare si può calcolare con il seguente algoritmo

$$T = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (2.27)$$

$$\lambda_{M_\odot} = 280.460 + 36000.771 \cdot T \quad (2.28)$$

$$M_\odot = 357.5277233 + 35999.05034 \cdot T \quad (2.29)$$

$$\lambda_{ecliptic} = \lambda_{M_\odot} + 1.914666471 \sin(M_\odot) + 0.019994643 \sin(2M_\odot) \quad (2.30)$$

$$r_\odot = 1.000140612 - 0.016708617 \cos(M_\odot) - 0.000139589 \cos(2M_\odot) \quad (2.31)$$

$$\varepsilon = 23.439291 - 0.0130042 \cdot T - 1.64 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 5.04 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (2.32)$$

e infine

$$\mathbf{r}_\odot = r_\odot AU \begin{bmatrix} \cos(\lambda_{ecliptic}) \\ \cos(\varepsilon) \sin(\lambda_{ecliptic}) \\ \sin(\varepsilon) \sin(\lambda_{ecliptic}) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

con $AU = 149597870.691$ km.

Con dei passaggi molto simili possiamo ottenere anche la posizione della Luna

$$\begin{aligned}\lambda_{ecliptic} &= 218.32 + 481267.8813 \cdot T + 6.29 \sin(134.9 + 477198.85 \cdot T) \\ &\quad - 1.27 \sin(259.2 - 413335.38 \cdot T) + 0.66 \sin(235.7 + 890534.23 \cdot T) \\ &\quad + 0.21 \sin(269.9 + 954397.70 \cdot T) - 0.19 \sin(357.5 + 35999.05 \cdot T) \\ &\quad - 0.11 \sin(186.6 + 966404.04 \cdot T)\end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \phi_{ecliptic} = & 5.13 \sin(93.3 + 483202.03 \cdot T) + 0.28 \sin(228.2 + 960400.87 \cdot T) \\ & - 0.28 \sin(318.3 + 6003.18 \cdot T) - 0.17 \sin(217.6 - 407332.20 \cdot T) \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{P} = & 0.9508 + 0.0518 \cos(134.9 + 477198.85 \cdot T) \\ & + 0.0095 \cos(259.2 - 413335.38 \cdot T) + 0.0078 \cos(235.7 + 890534.23 \cdot T) \\ & + 0.0028 \cos(269.9 + 954397.70 \cdot T) \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\varepsilon = 23.439291 - 0.0130042 \cdot T - 1.64 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 5.04 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (2.37)$$

$$r_{\zeta} = \frac{1}{\sin(\mathfrak{P})} \quad (2.38)$$

e infine

$$\mathbf{r}_{\zeta} = r_{\zeta} \begin{bmatrix} \cos(\phi_{ecliptic}) \cos(\lambda_{ecliptic}) \\ \cos(\varepsilon) \cos(\phi_{ecliptic}) \sin(\lambda_{ecliptic}) - \sin(\varepsilon) \sin(\lambda_{ecliptic}) \\ \sin(\varepsilon) \cos(\phi_{ecliptic}) \sin(\lambda_{ecliptic}) - \cos(\varepsilon) \sin(\lambda_{ecliptic}) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

In prima istanza sono state introdotte anche le perturbazioni di terzo corpo risultanti anche da tutti gli altri pianeti del sistema solare, ma i loro contributi si sono rivelati trascurabili rispetto agli effetti di Luna e Sole. Sono stati quindi successivamente rimossi dal propagatore.

2.4 Pressione di radiazione solare

Nel propagatore è inserita anche la possibilità di valutare l'accelerazione data dalla pressione della radiazione solare. Questa viene valutata, [16], come

$$\mathbf{a} = \alpha R_P M_D \frac{\mathbf{r}_{VS}}{r_{VS}^2} \quad (2.40)$$

dove $\mathbf{r}_{VS} = \mathbf{r}_V - \mathbf{r}_S$ è il vettore Sole-veicolo, $1 \leq \alpha \leq 2$ è il coefficiente che indica quanta radiazione viene riflessa o assorbita (considerato unitario per mancanza di dati sui materiali utilizzati e le loro proprietà), $R_P = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{N/m}^2$ è la pressione data dalla radiazione solare e M_D è la il rapporto area/massa del corpo considerato. Per quest'ultimo parametro in particolare la modellazione risulta estremamente difficoltosa, data la sua difficoltà di valutazione, sia per il calcolo della superficie in sé, sia per la variazione di questa nel tempo.

Come si può poi vedere, nella modellazione di questa perturbazione non è stato considerato il tempo che il veicolo passa in condizione di eclisse rispetto al Sole,

ovvero quando attraversa il cono d'ombra creato dalla Terra. In più, l'incertezza su questo parametro impedisce di ottenere delle propagazioni di estrema accuratezza e che riescano a seguire, come verrà mostrato in seguito, i dati ottenuti dai set di TLE.

Capitolo 3

Validazione del propagatore

In questo capitolo verrà validato il comportamento del propagatore, verificandone le prestazioni e la precisione computazionale. Per fare ciò verranno utilizzate due metodologie: il confronto dei dati ottenuti tramite propagazione con i dati ottenuti dai set di TLE (Two Line Elements) di Space Track e la verifica dell'esistenza del piano di Laplace con dei set di TLE creati ad hoc. A questi precederà una prima analisi sui dati iniziali che si ottengono dai set di TLE, mostrando come questi sono mediati nel tempo e che piccoli errori possono essere sovuti a questo fatto.

3.1 Confronto con TLE

Ci concentriamo ora sul primo metodo di validazione del propagatore, ovvero il confronto dei dati da esso ottenuti con i parametri orbitali calcolati direttamente dai set di TLE che si ottengono da Space Track, [18].

Le TLE sono composte di dati alfanumerici che contengono alcuni parametri relativi all'identità e all'orbita di un corpo, mediati in un certo periodo di tempo variabile da set a set, [17].

Essendo i set TLE mediati nel tempo, delle piccole discrepanze con i risultati del propagatore sono ammissibili, non essendo questi ultimi mediati. Una dimostrazione di questo è presentata in SOTTOSEZIONE 3.1.1.

Per la validazione con questo metodo verranno scelti alcuni oggetti appartenenti alle varie classi definite da ESOC, [10], e che verranno approfondite in seguito. Per ognuno degli oggetti presi in considerazione verrà presentata la TLE utilizzata

come punto iniziale della propagazione e la durata di questa, nonché l'andamento di alcuni dei parametri orbitali.

Data la difficoltà di previsione della manovre di station keeping verranno presi in considerazione preferibilmente oggetti che non sono più controllati, il movimento dei quali è quindi libero e soggetto solo all'attrazione gravitazionale e alle perturbazioni. Una volta verificato il corretto comportamento del propagatore con i corpi liberi verranno analizzati anche alcuni dei corpi controllati. Il controllo operato, già comunque visibile dall'estrema stabilità di longitudine e latitudine, sarà visibile per confronto con i risultati propagati.

Nel rapporto di ESOC i corpi sono definiti geostazionari i corpi che hanno:

- eccentricità minore di 0.2;
- moto medio compreso tra 0.9 e 1.1 rivoluzioni per giorno sidereo, il che corrisponde circa a un semiasse maggiore compreso tra 39,664 e 45,314 km;
- inclinazione minore di 70° .

Questi sono poi stati divisi in tre macrocategorie:

- *classe D*, corpi driftanti;
- *classe L*, corpi libranti;
- *classe C*, corpi controllati.

Ognuna di queste classi verrà approfondita in seguito con degli esempi di corpi che vi appartengono per valutarne il comportamento.

3.1.1 Errore TLE

Per prima cosa mostriamo con una simulazione che i set di TLE contengono elementi orbitali mediati nel tempo. Per verificare questo sono stati selezionati alcuni corpi presenti in orbita, appartenenti alle classi *D*, *L1* ed *L2*.

Sono stati considerati gli ultimi 250 set di TLE circa e ognuno di questi è stato propagato fino all'epoca della TLE più recente. Nei grafici è presente la differenza tra la posizione finale ottenuta dalla simulazione e quella ottenuta dai dati della

TLE più recente in termini di posizione e velocità, in funzione del numero di TLE considerati.

In FIGURA 3.3 sono presentati i risultati per il corpo *2006-048 A* di classe *D*, in FIGURA 3.1 per il corpo *1985-035 B* di classe *L1* e infine in FIGURA 3.2 per il corpo *1994-060 A* di classe *L2*.

Come si può notare da FIGURA 3.1 e da FIGURA 3.2, l'errore che viene commesso durante la propagazione dei corpi *1985-035 B* e *1994-060 A* è oscillante. Il valore medio di questa oscillazione è abbastanza basso, con ampiezza tanto maggiore quanto più lungo è il periodo di integrazione del movimento del corpo.

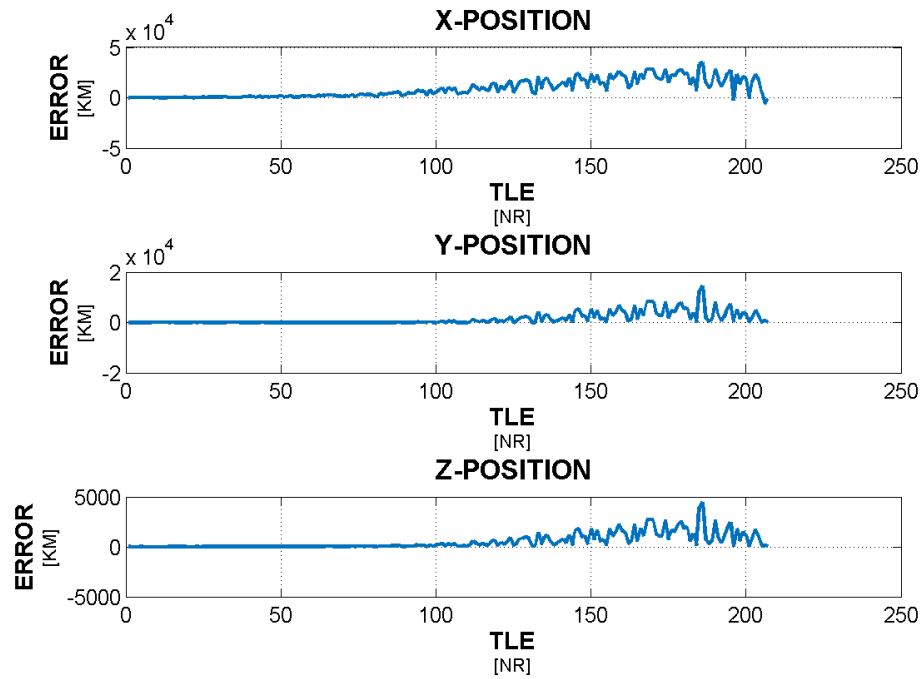
Il comportamento che viene evidenziato però per il corpo *2006-048 A* è leggermente diverso. Si può notare, infatti, che intorno al 150esimo set TLE si ha un brusco cambio del valore medio dell'oscillazione, con questa che poi rimane circa stabile attorno a questo. Si può quindi pensare che intorno a quell'istante temporale il corpo sia stato oggetto di una manovra o di una, ben meno probabile, collisione con qualche altro corpo in orbita, che ne ha causato lo spostamento di posizione così brusco.

Questo permette di intuire che alcune delle discrepanze che possono esserci tra il comportamento integrato e quello misurato con i set TLE possono essere date da impatti non prevedibili, oltre che dal fatto che questi set contengono elementi mediati nel tempo.

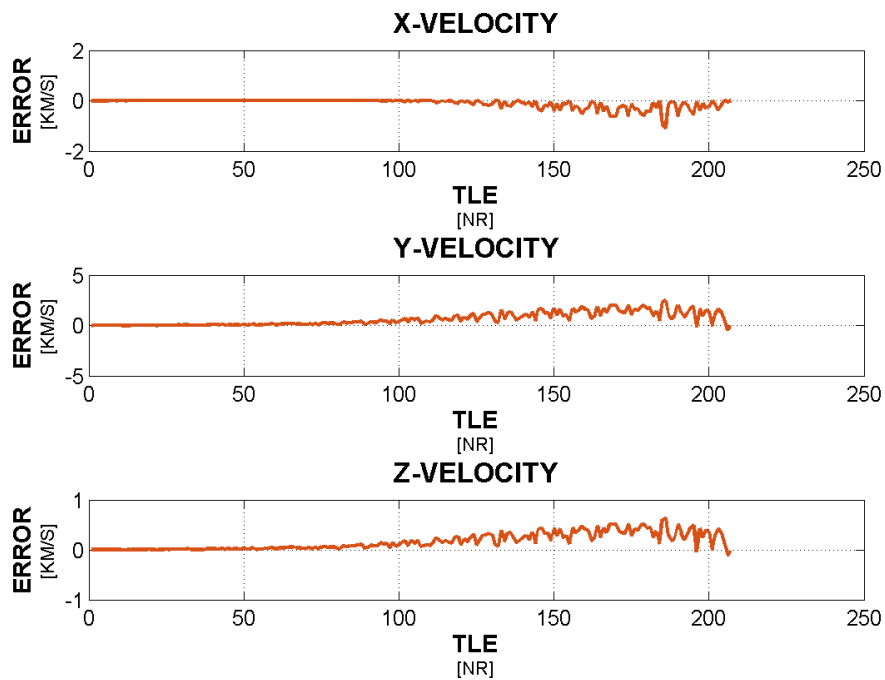
3.1.2 Dati propagati e TLE

Vediamo ora le differenze tra i risultati ottenuti tramite propagazione e i dati reali ottenuti dai set di TLE. Ricordiamo, come mostrato in SOTTOSEZIONE 3.1.1, che le TLE sono composte di dati mediati nel tempo e che quindi degli errori non rendono inutilizzabili i risultati ottenuti.

Per posizione relativa, nei grafici, si intende la posizione del corpo propagato rispetto a un sistema di riferimento orbitale geostazionario che inizialmente è nello stesso punto del corpo considerato e che si muove, appunto, lungo un'orbita perfettamente geostazionaria. In questo sistema di riferimento l'asse x è tangenziale all'orbita nella direzione positiva della velocità, l'asse y diretto lungo la congiungente tra centro di gravità e corpo e l'asse z è quello, fuori dal piano orbitale, che rende questa terna levogira. Nei grafici sono presentate le sole componenti x e y di questa posizione relativa.



(A) Errore sulla posizione



(B) Errore sulla velocità

FIGURA 3.1: Corpo 1985-035 B

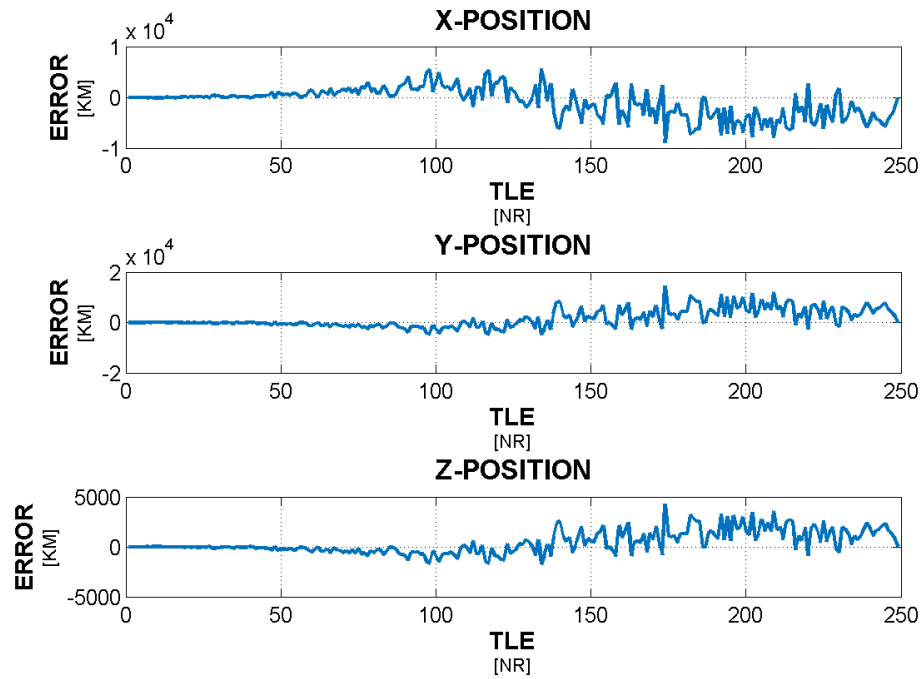
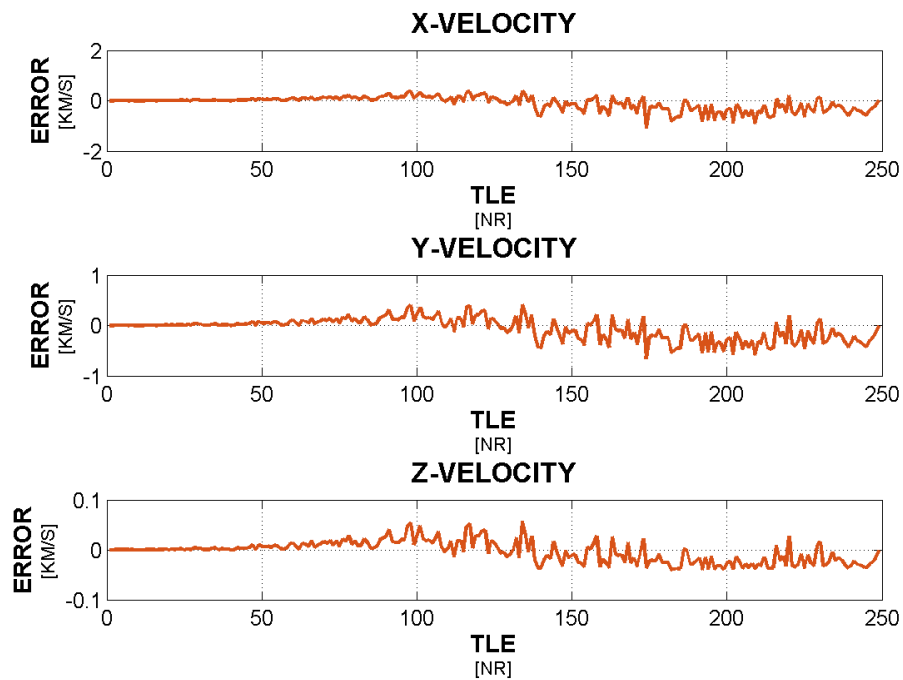
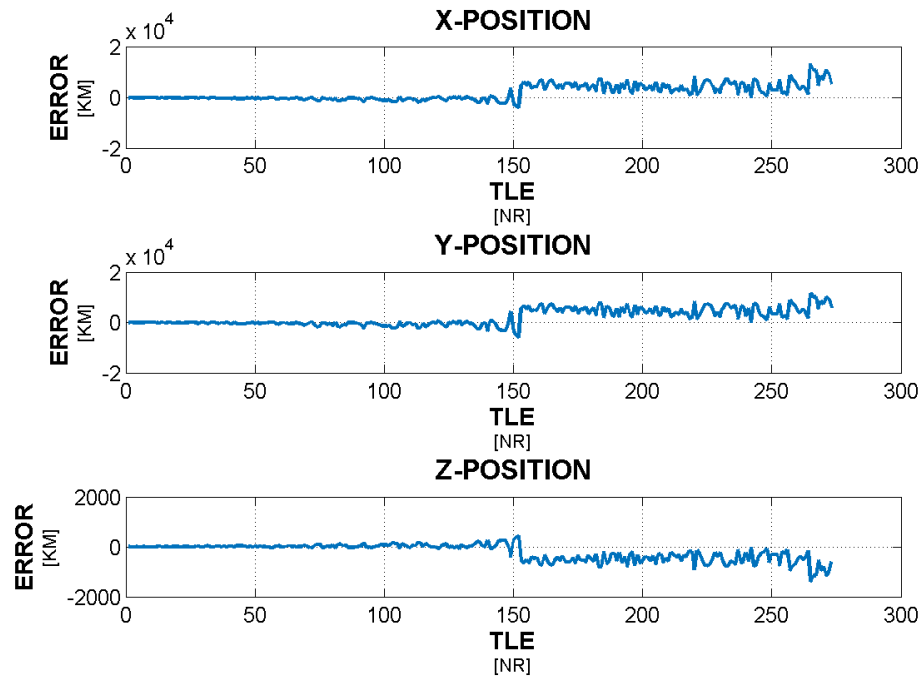
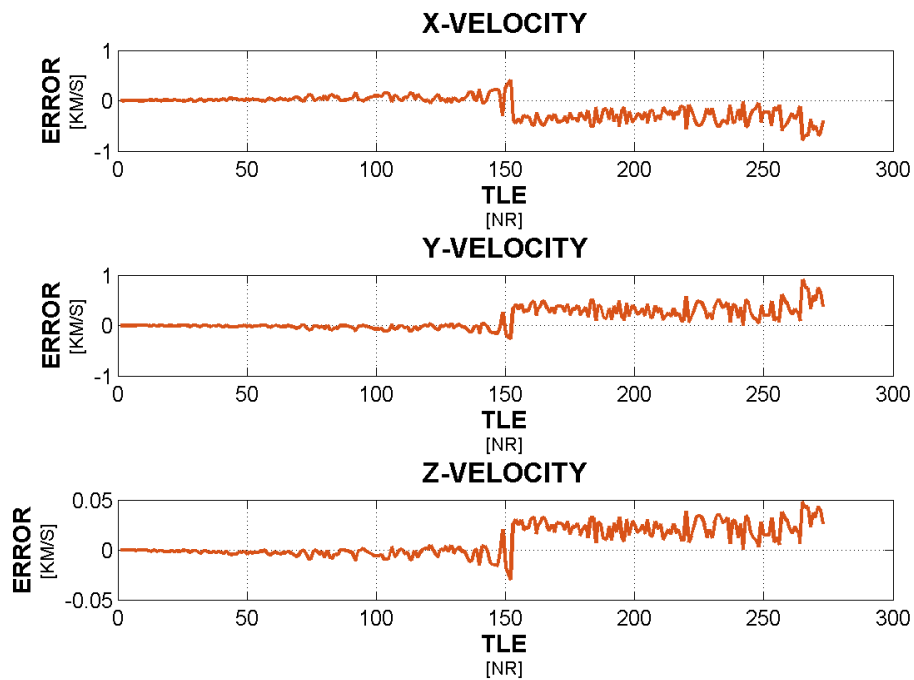
(A) *Errore sulla posizione*(B) *Errore sulla velocità*

FIGURA 3.2: Corpo 1994-060 A



(A) Errore sulla posizione



(B) Errore sulla velocità

FIGURA 3.3: Corpo 2006-048 A

3.1.2.1 Classe L1

Alla classe L appartengono gli oggetti che librano attorno a due posizioni dell'anello GEO. Queste due posizioni stabili sono dovute ai termini tesserali delle armoniche del geopotenziale e si trovano sopra il Colorado (105°W) e sopra l'India (75°E). In particolare, alla classe $L1$ appartengono tutti quei corpi che nel loro moto libero oscillano attorno al punto stabile del geopotenziale posto alla longitudine di 75°E .

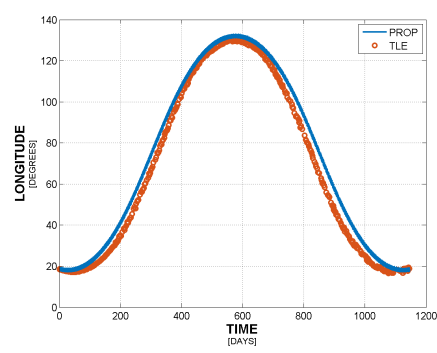
Per questi corpi il periodo di oscillazione è crescente insieme alla sua ampiezza, con oggetti che oscillano con periodo di 740 giorni per un'ampiezza di 5° fino a corpi che oscillano con periodo di 1700 giorni e ampiezza di 153.5° .

Di questa classe sono stati considerati 9 corpi per la validazione del propagatore, le cui sigle identificative sono presentate in TABELLA 3.1. Le TLE da cui sono stati ricavati i dati iniziali della propagazione sono riportate in SOTTOSOTTOSEZIONE A.1.1.1.

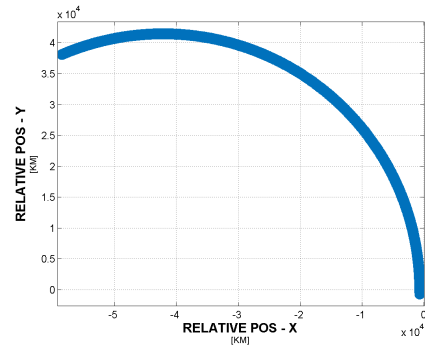
I dati che sono presentati in seguito sono l'andamento della longitudine nel tempo, la posizione relativa del satellite (come anticipato in SOTTOSOTTOSEZIONE 3.1.2), l'andamento dell'inclinazione e dell'eccentricità dell'orbita. Per quanto riguarda longitudine, inclinazione ed eccentricità sono anche presentati i valori che si ottengono da ogni set di TLE.

TABELLA 3.1: Validazione propagatore - Corpi di classe $L1$

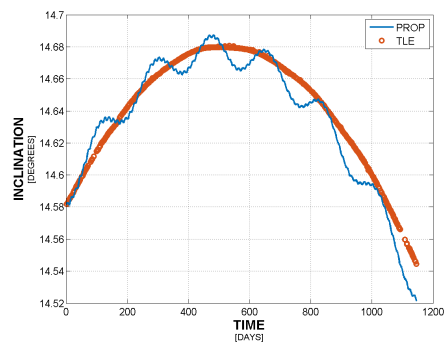
Nr.	NORAD	COSPAR	Durata [DAYS]	$\Delta\lambda$ [DEG]
1	15057	1984-063 A	1146	112.1
2	15678	1985-035 B	1755	150.3
3	17125	1986-090 D	1125	108.3
4	20693	1990-061 A	718	10.2
5	21132	1991-014 A	1142	110.9
6	22269	1992-088 A	1743	150.5
7	22694	1993-039 A	711	6.3
8	23680	1995-054 A	711	5.0
9	26394	2000-036 A	792	10.0



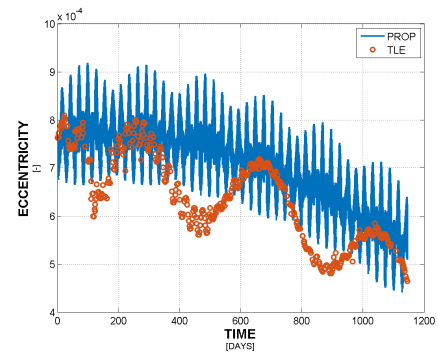
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

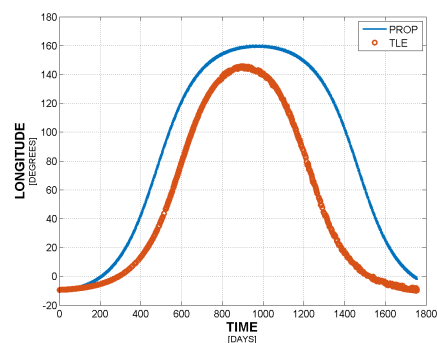


(C) Inclinatione

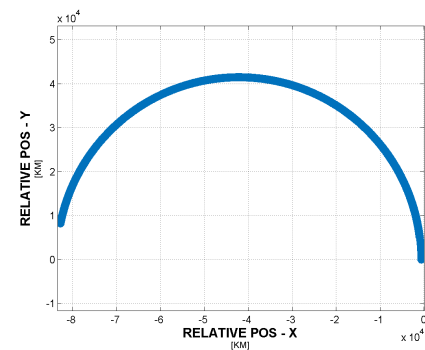


(D) Eccentricità

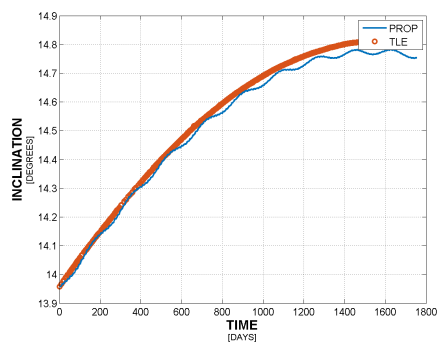
FIGURA 3.4: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1984-063 A



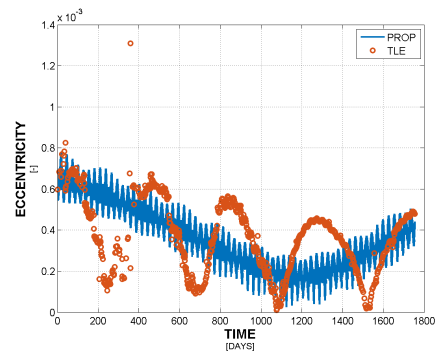
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

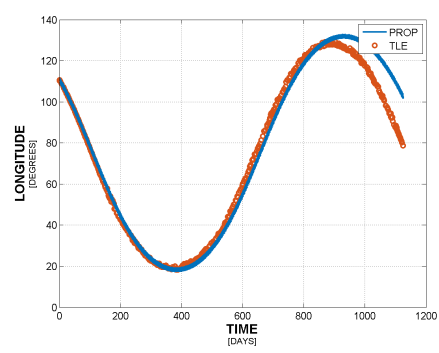


(C) Inclinatione

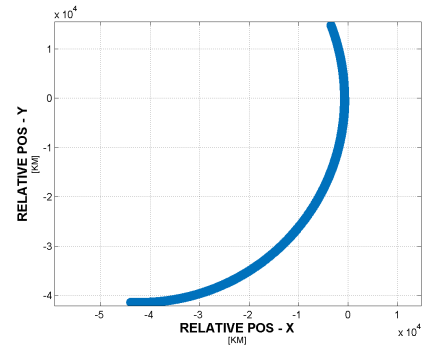


(D) Eccentricità

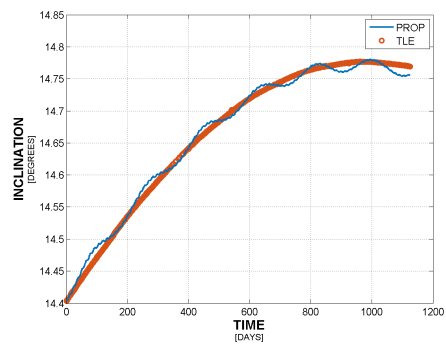
FIGURA 3.5: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1985-035 B



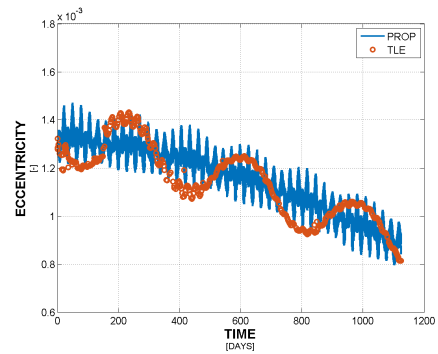
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

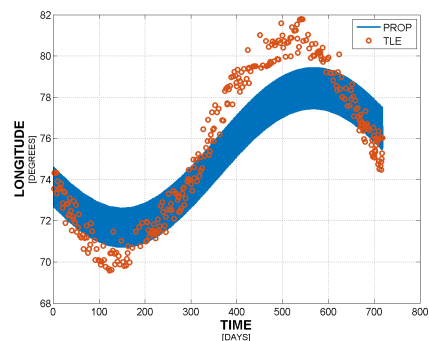


(C) Inclinazione

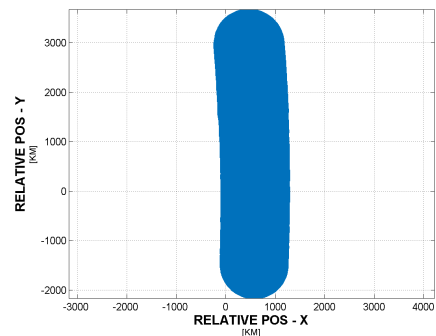


(D) Eccentricità

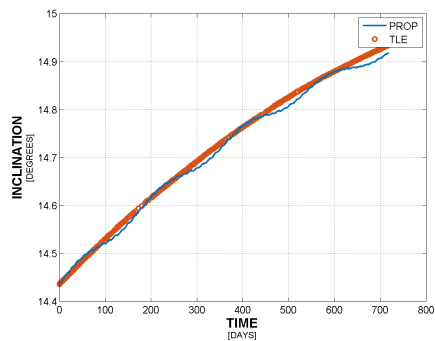
FIGURA 3.6: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1986-090 D



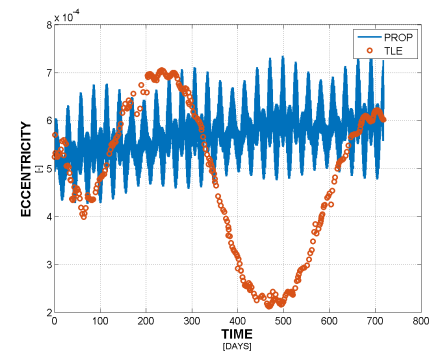
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

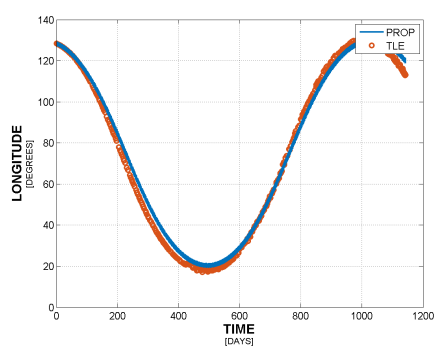


(C) Inclinazione

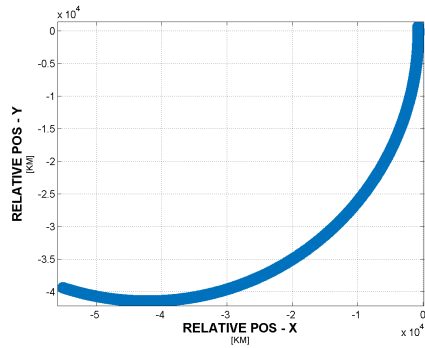


(D) Eccentricità

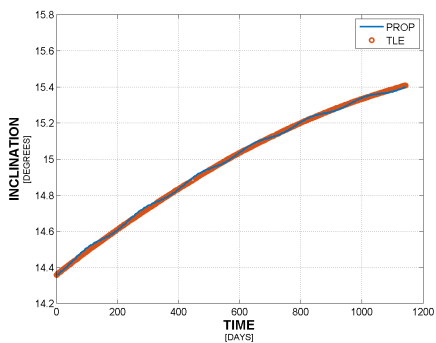
FIGURA 3.7: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1990-061 A



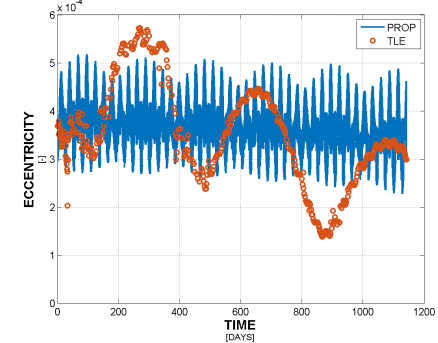
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

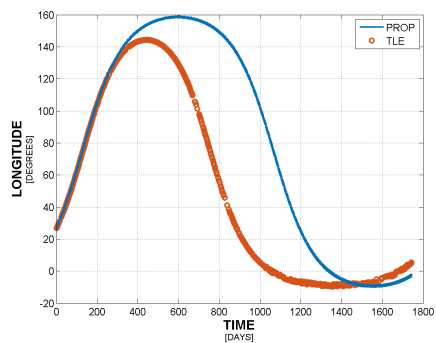


(C) Inclinazione

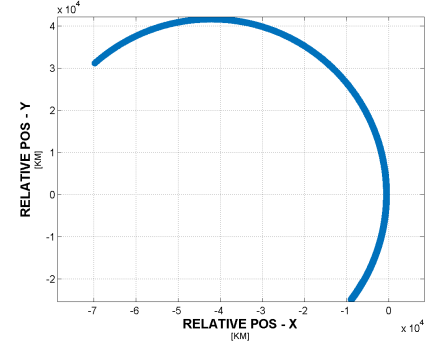


(D) Eccentricità

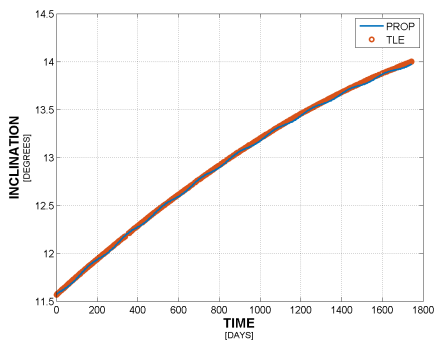
FIGURA 3.8: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1991-014 A



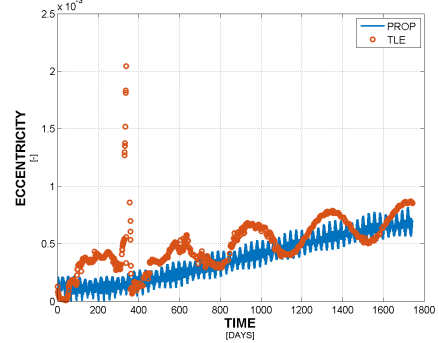
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

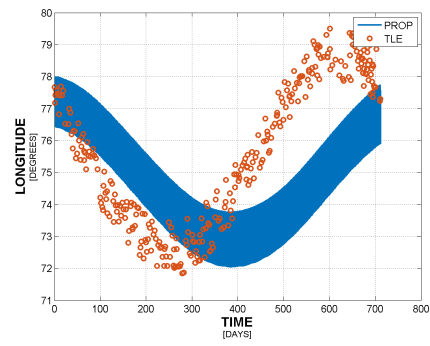


(C) Inclinazione

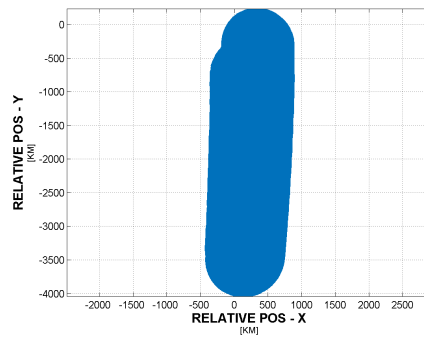


(D) Eccentricità

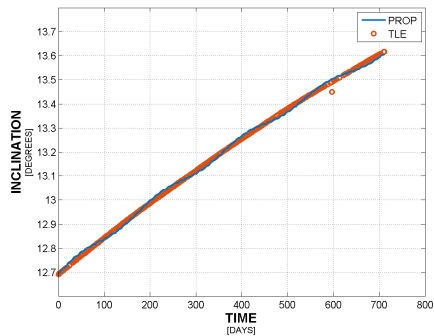
FIGURA 3.9: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1992-088 A



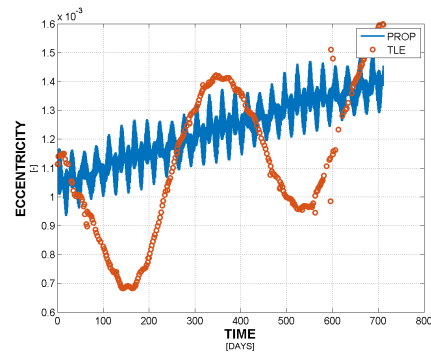
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

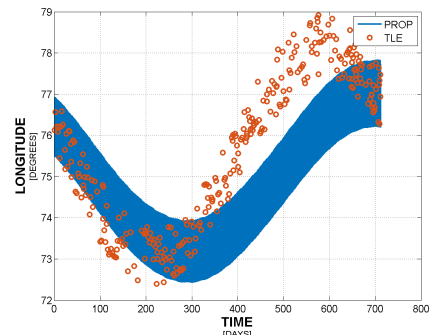


(C) Inclinatione

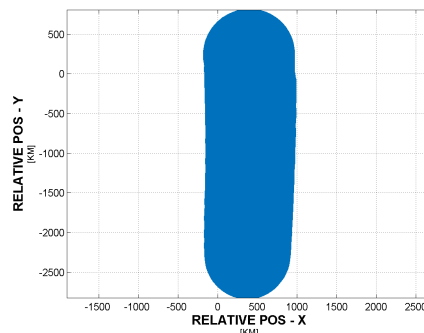


(D) Eccentricità

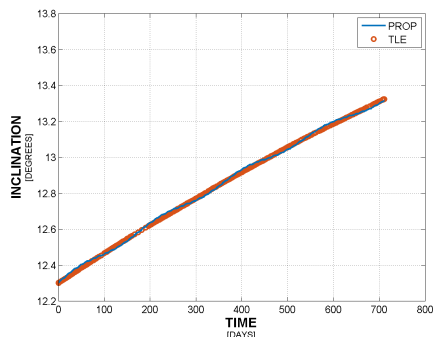
FIGURA 3.10: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1993-039 A



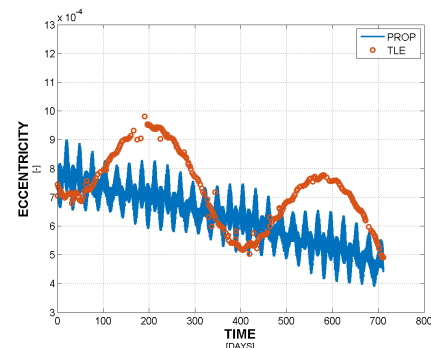
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa



(C) Inclinatione



(D) Eccentricità

FIGURA 3.11: Confronto TLE/PROP - Classe L1 - Corpo 1995-054 A

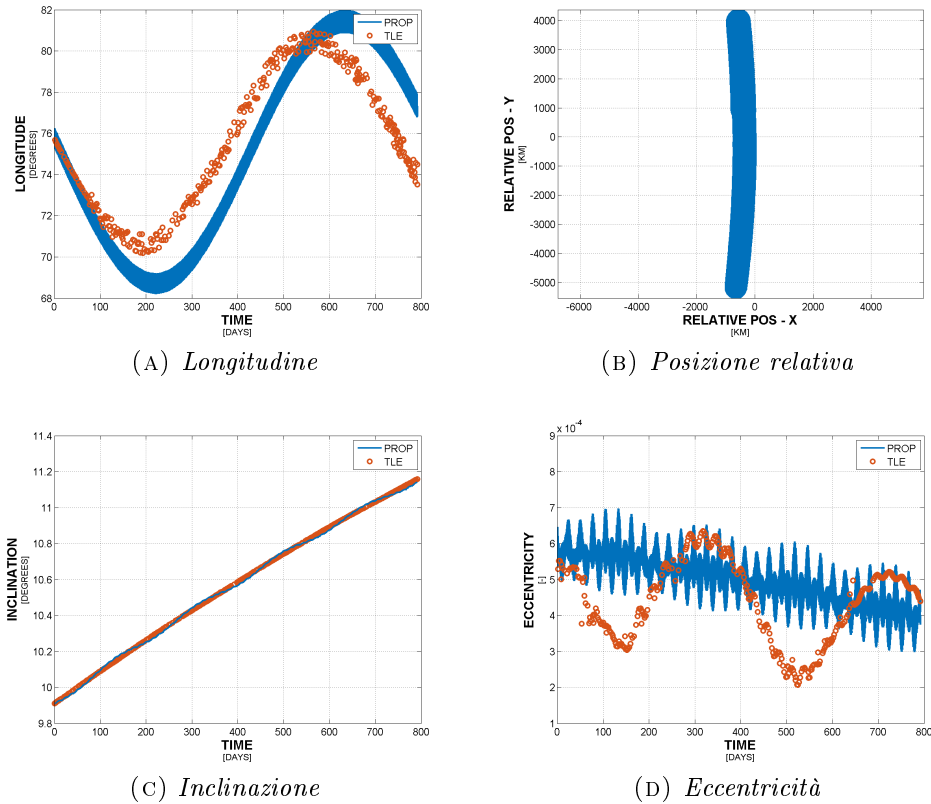


FIGURA 3.12: Confronto TLE/PROP – Classe $L1$ – Corpo 2000-036 A

3.1.2.2 Classe L2

Alla classe L appartengono gli oggetti che librano in certe posizioni dell'anello GEO e, in particolare, alla classe $L2$ appartengono tutti quei corpi che nel loro moto libero oscillano attorno al punto stabile del geopotenziale posto alla longitudine di 105°W .

Anche per questi corpi il periodo di oscillazione è crescente insieme alla sua ampiezza, con oggetti che oscillano con periodo di 890 giorni per un'ampiezza di 1° fino a corpi che oscillano con periodo di 2373 giorni e ampiezza di 167° .

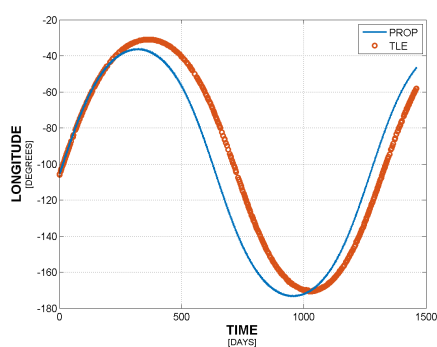
Di questa classe sono stati considerati 7 corpi per la validazione del propagatore, le cui sigle identificative sono presentate in TABELLA 3.2. Le TLE da cui sono stati ricavati i dati iniziali della propagazione sono riportate in SOTTOSOTTOSEZIONE A.1.1.2.

I dati che sono presentati in seguito sono l'andamento della longitudine nel tempo, la posizione relativa del satellite (come anticipato in SOTTOSEZIONE 3.1.2),

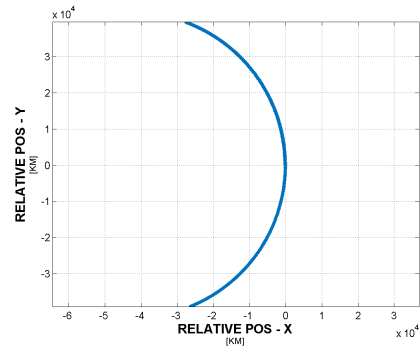
l'andamento dell'inclinazione e dell'eccentricità dell'orbita. Per quanto riguarda longitudine, inclinazione ed eccentricità sono anche presentati i valori che si ottengono da ogni set di TLE.

TABELLA 3.2: Validazione propagatore - Corpi di classe $L2$

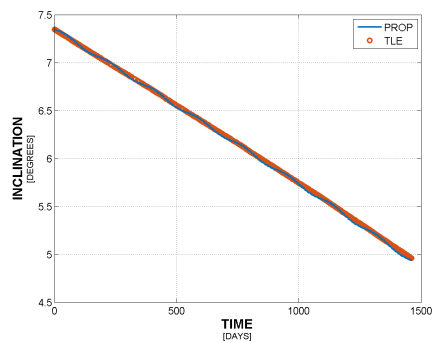
Nr.	NORAD	COSPAR	Durata [DAYS]	$\Delta\lambda$ [DEG]
1	02969	1967-094 A	1460	139.5
2	15144	1984-078 A	1483	137.8
3	15677	1985-035 A	1155	0.3
4	19483	1988-081 A	1166	0.3
5	20499	1990-016 A	1495	139.7
6	22796	1993-058 B	1170	1.2
7	23267	1994-060 A	2634	167.0



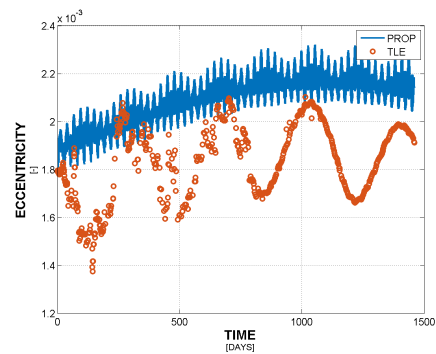
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa



(C) Inclinazione



(D) Eccentricità

FIGURA 3.13: Confronto TLE/PROP – Classe $L2$ – Corpo 1967-094 A

3.1.2.3 Classe $L3$

Alla classe L appartengono gli oggetti che librano in certe posizioni dell'anello GEO e, in particolare, alla classe $L3$ appartengono tutti quei corpi che nel loro moto libero oscillano attorno a entrambi i punti stabili del geopotenziale. Pochi elementi appartengono effettivamente a questa categoria, che può essere considerata

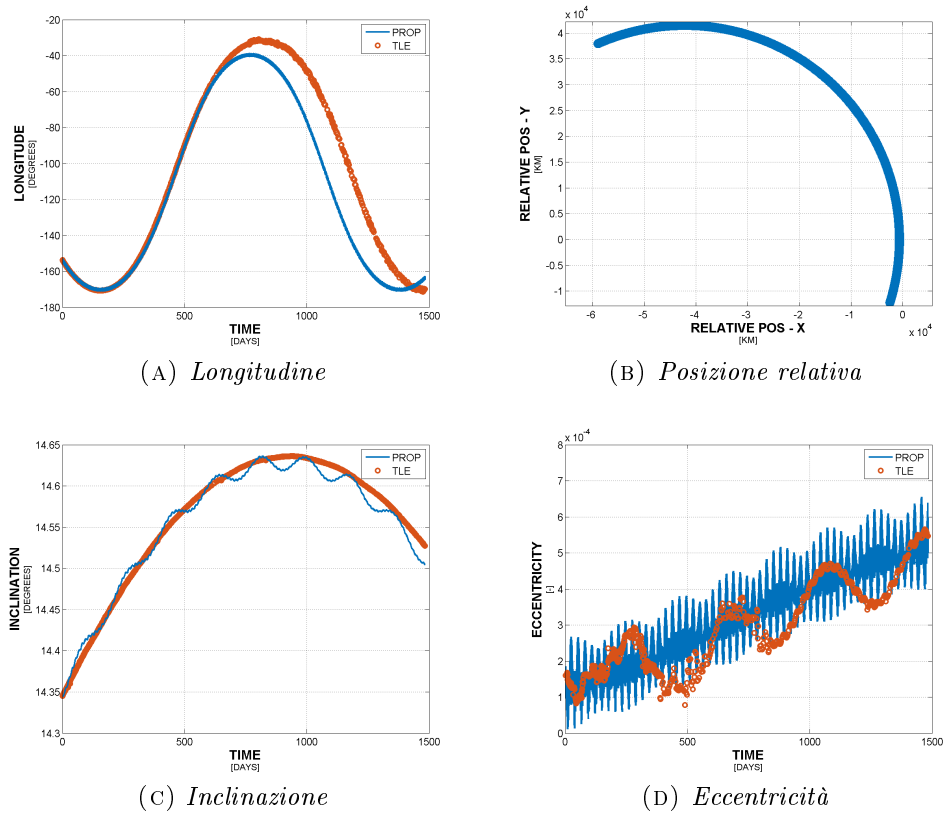


FIGURA 3.14: Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1984-078 A

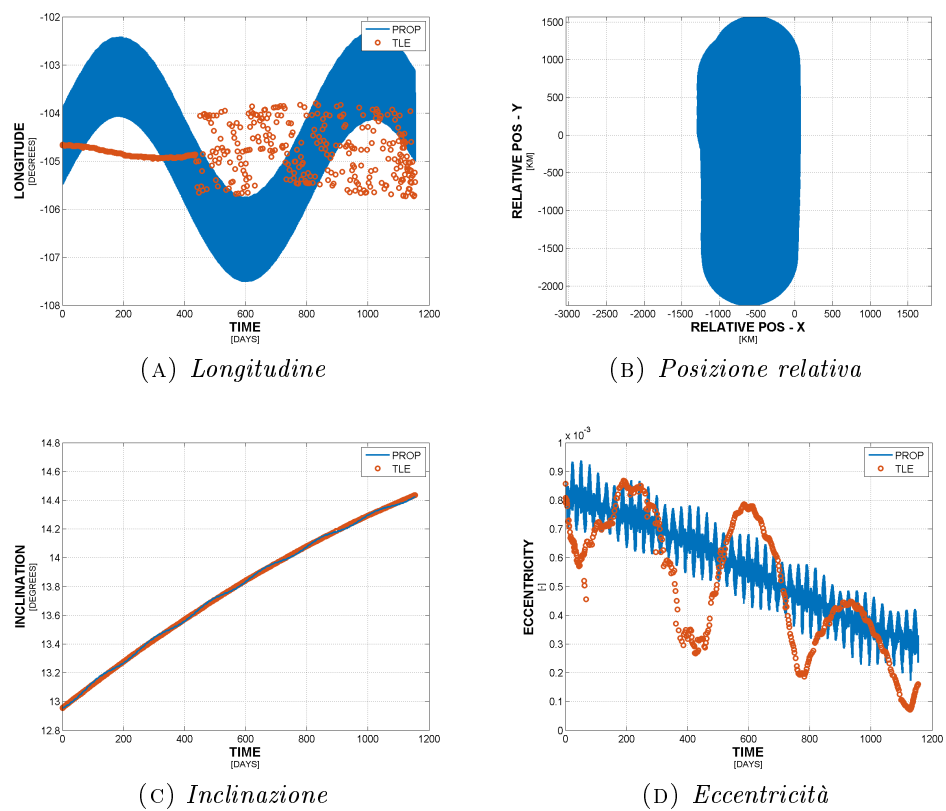
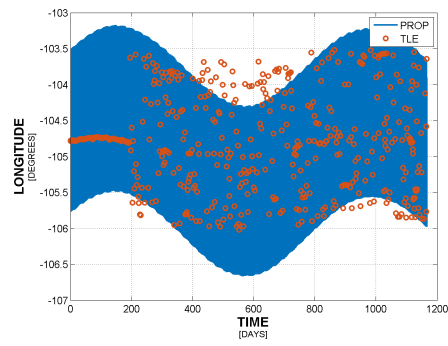
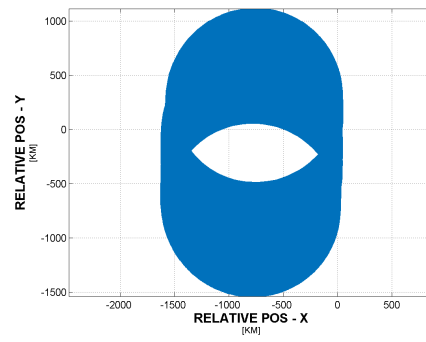


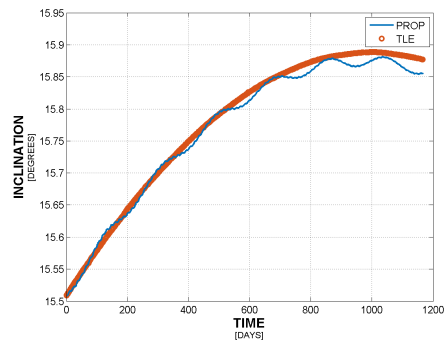
FIGURA 3.15: Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1985-035 A



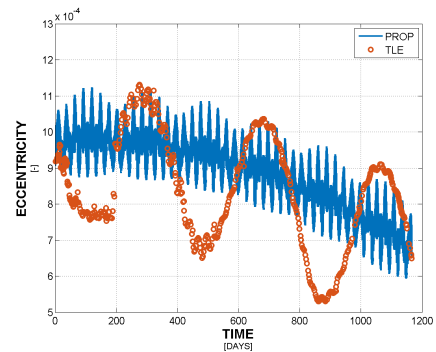
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

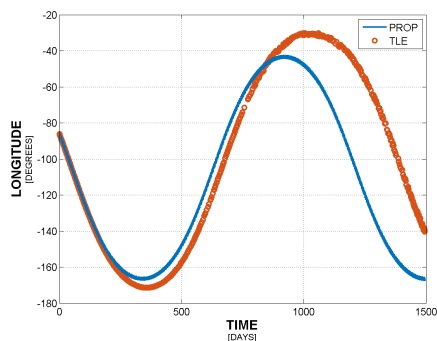


(C) Inclinazione

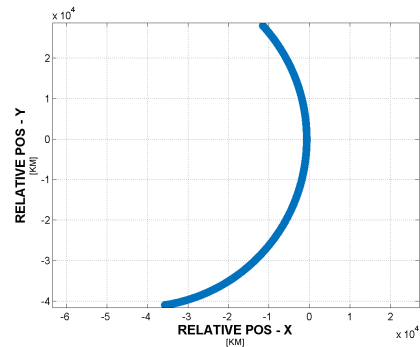


(D) Eccentricità

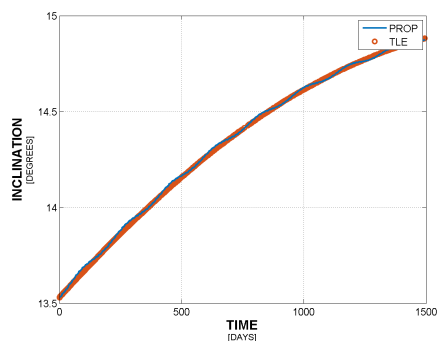
FIGURA 3.16: Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1988-081 A



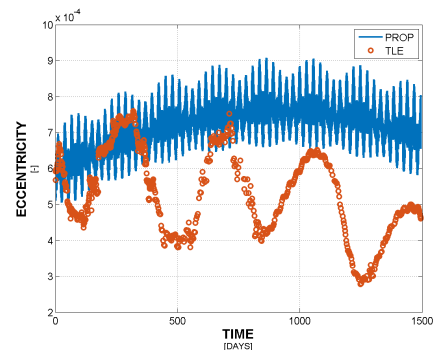
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

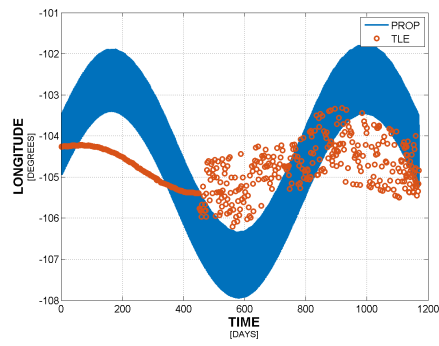


(C) Inclinazione

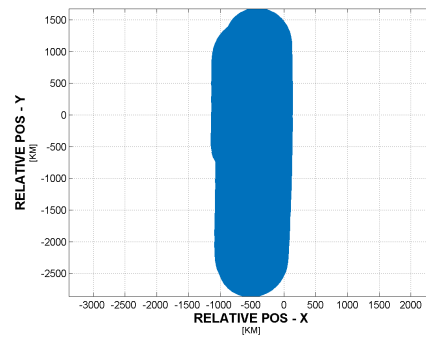


(D) Eccentricità

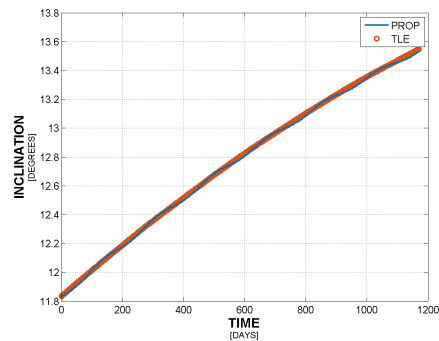
FIGURA 3.17: Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1990-016 A



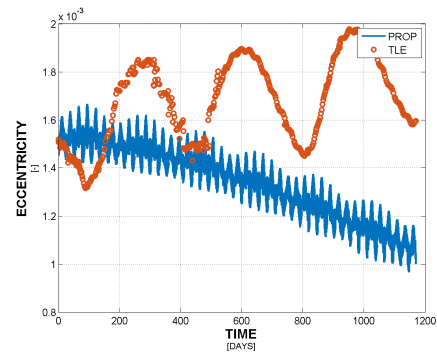
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

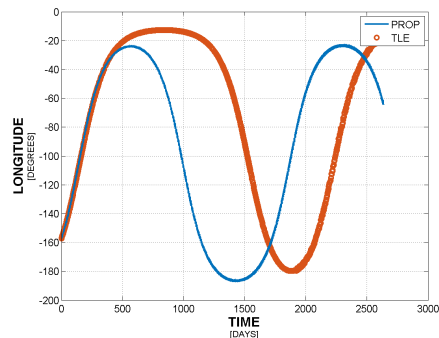


(C) Inclinazione

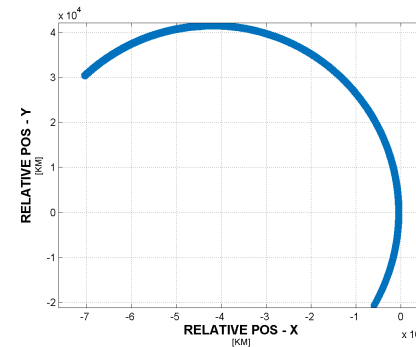


(D) Eccentricità

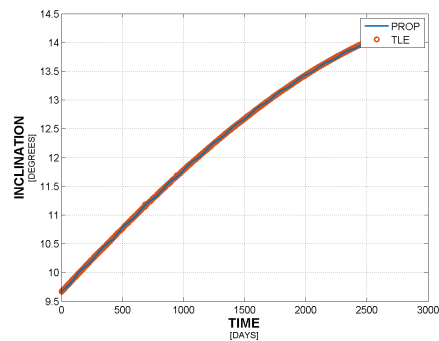
FIGURA 3.18: Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1993-058 B



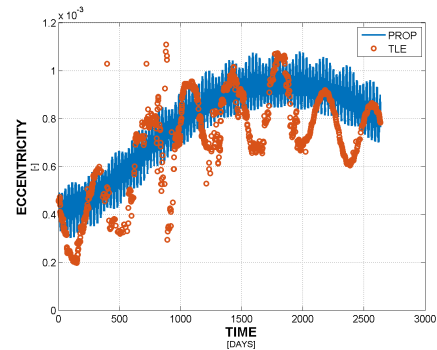
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa



(C) Inclinazione



(D) Eccentricità

FIGURA 3.19: Confronto TLE/PROP - Classe L2 - Corpo 1994-060 A

borderline tra un comportamento librante e uno di deriva. Questo comportamento è dato dal fatto che alcune perturbazioni che possono essere trascurate negli altri casi, non sono così ininfluenti per questi corpi. Ciò significa che sono anche molto più sensibili agli errori nelle misure, il che rende molto più complicata la loro propagazione.

Per i corpi appartenenti alla classe *L3* periodo e ampiezza di oscillazione non vanno più di pari passo, con periodi che vanno dai 2936 ai 3920 giorni e ampiezze che variano tra 322° e 343° .

Di questa classe sono stati considerati 3 corpi per la validazione del propagatore, le cui sigle identificative sono presentate in TABELLA 3.3. Le TLE da cui sono stati ricavati i dati iniziali della propagazione sono riportate in SOTTOSOTTOSEZIONE A.1.1.3.

TABELLA 3.3: Validazione propagatore - Corpi di classe *L3*

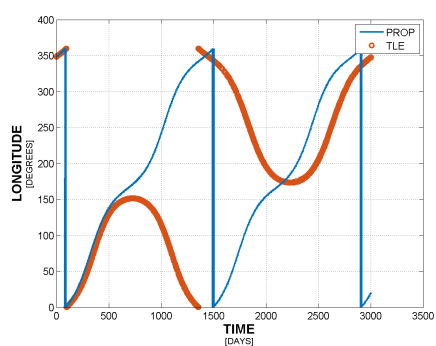
Nr.	NORAD	COSPAR	Durata [DAYS]	$\Delta\lambda$ [DEG]
1	05588	1971-095 B	2937	335.4
2	15484	1985-007 A	3585	232.0
3	16667	1986-027 A	3920	322.5

Come anticipato, in questo caso il propagatore non riflette esattamente il comportamento dei corpi analizzati. Ciò significa che le perturbazioni prese in considerazione non sono sufficientemente precise per una corretta propagazione dei corpi appartenenti alla classe *L3*. In SEZIONE 4.5 verranno proposte alcune alternative per il miglioramento.

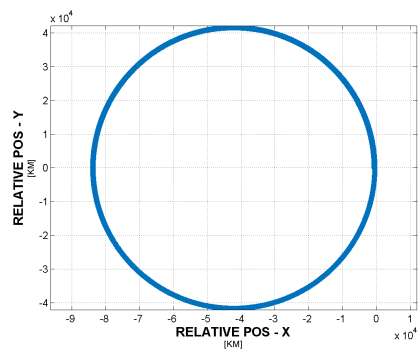
3.1.2.4 Classe D

Alla classe *D* appartengono i corpi che hanno un comportamento di deriva rispetto all'anello GEO. Questo comportamento fa sì che essi si muovano costantemente lungo l'orbita geostazionaria, attraversando tutte le longitudini. Intersecano quindi l'anello GEO in qualsiasi posizione. Le velocità angolari sono molto variabili e comprese circa tra -36.83° al giorno e 34.85° al giorno.

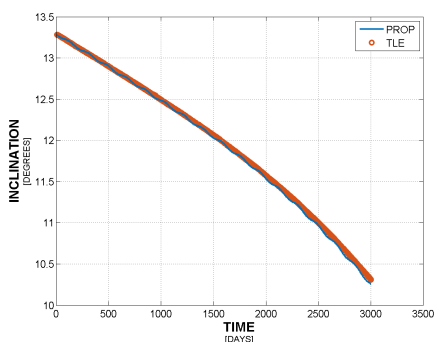
Di questa classe sono stati considerati 8 corpi per la validazione del propagatore, le cui sigle identificative sono presentate in TABELLA 3.4. Le TLE da cui sono stati ricavati i dati iniziali della propagazione sono riportate in SOTTOSOTTOSEZIONE A.1.1.4.



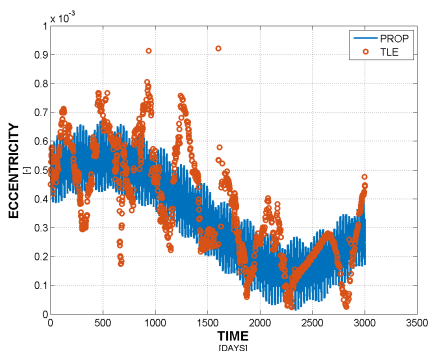
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

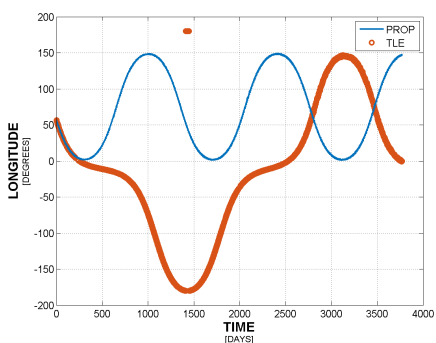


(C) Inclinazione

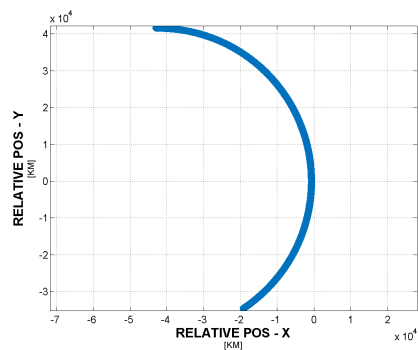


(D) Eccentricità

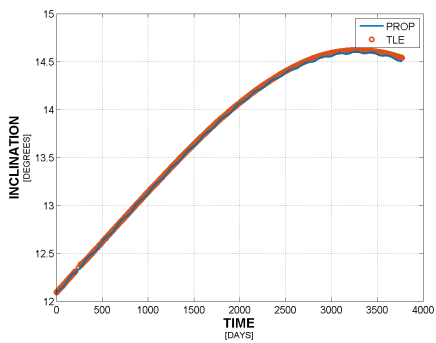
FIGURA 3.20: Confronto TLE/PROP - Classe L3 - Corpo 1971-095 B



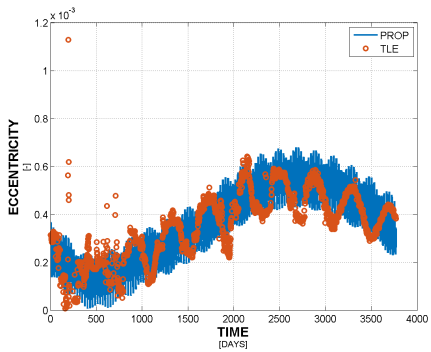
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

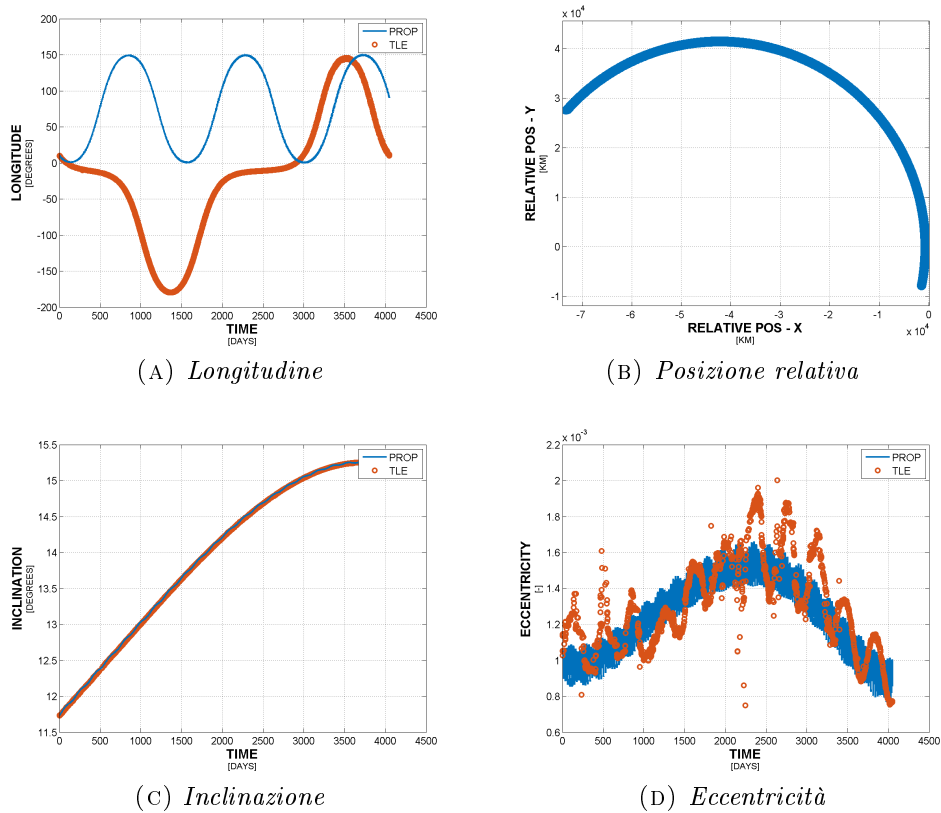


(C) Inclinazione



(D) Eccentricità

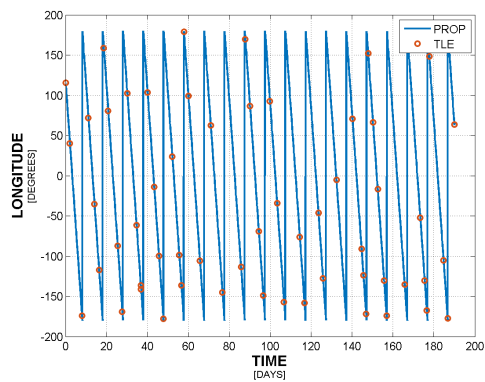
FIGURA 3.21: Confronto TLE/PROP - Classe L3 - Corpo 1985-007 A

FIGURA 3.22: Confronto TLE/PROP – Classe $L3$ – Corpo 1986-027 A

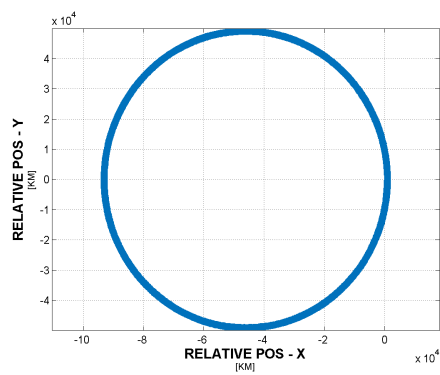
I dati che sono presentati in seguito sono l'andamento della longitudine nel tempo, la posizione relativa del satellite (come anticipato in SOTTOSEZIONE 3.1.2), l'andamento dell'inclinazione e dell'eccentricità dell'orbita. Per quanto riguarda longitudine, inclinazione ed eccentricità sono anche presentati i valori che si ottengono da ogni set di TLE.

TABELLA 3.4: Validazione propagatore - Corpi di classe D

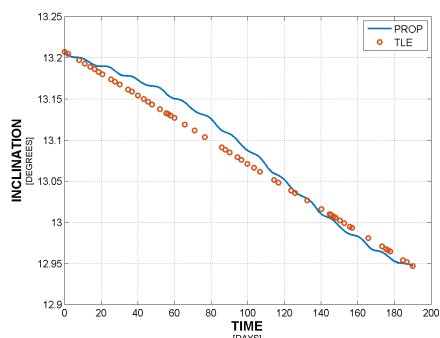
Nr.	NORAD	COSPAR	Durata [DAYS]	$\bar{\lambda}$ [DEG/DAY]
1	03623	1968-116 A	190	-36.29
2	03947	1969-045 A	217	-36.83
3	11144	1978-113 A	200	-22.47
4	11147	1978-113 D	191	-23.46
5	15626	1985-024 A	216	-19.72
6	24891	1997-040 A	205	-23.67
7	29516	2006-048 A	247	-26.69
8	37381	2008-006 C	240	-18.55



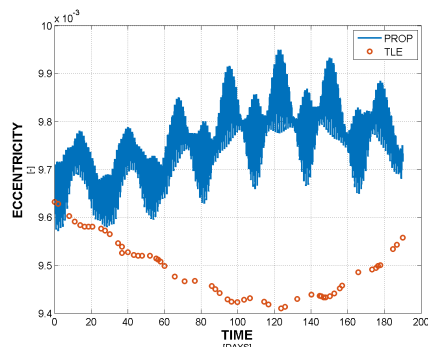
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

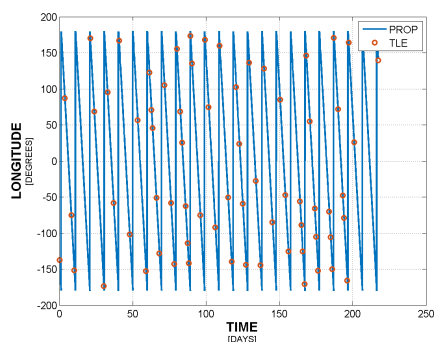


(C) Inclinazione

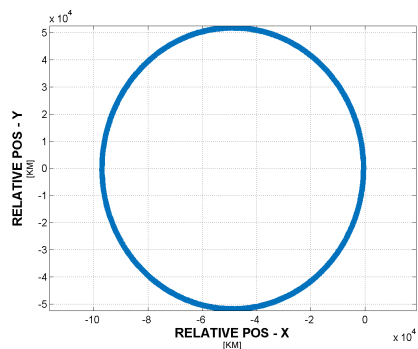


(D) Eccentricità

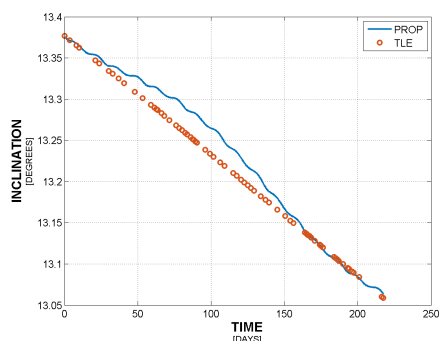
FIGURA 3.23: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 1968-116 A



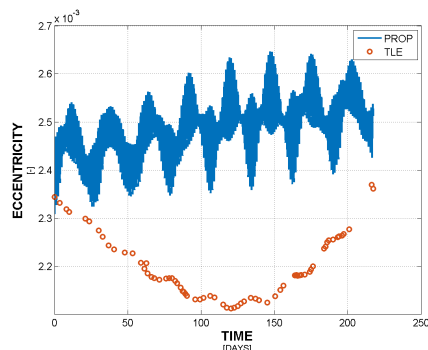
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

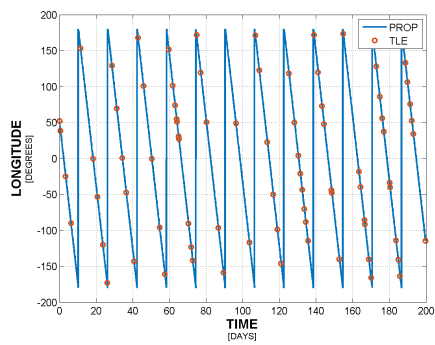


(C) Inclinazione

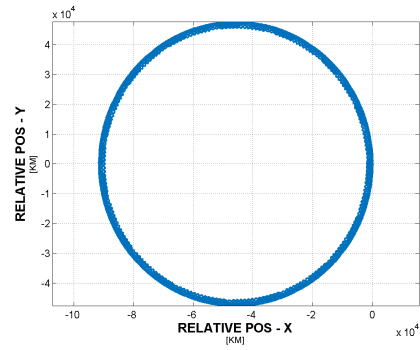


(D) Eccentricità

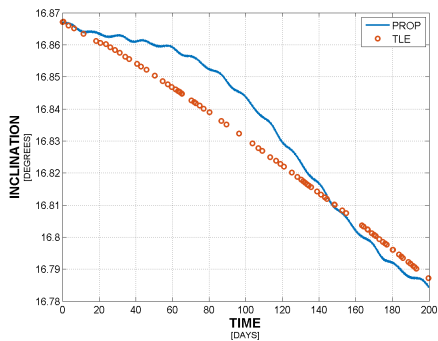
FIGURA 3.24: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 1969-045 A



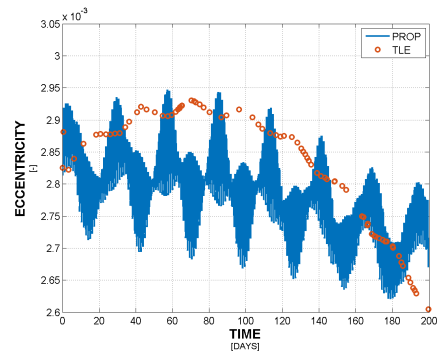
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

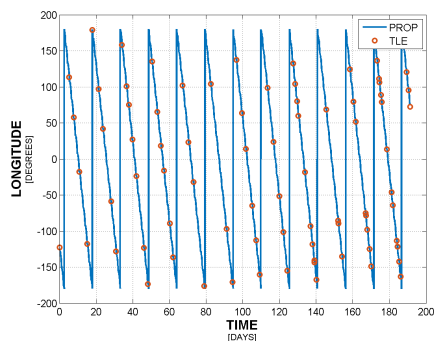


(C) Inclinazione

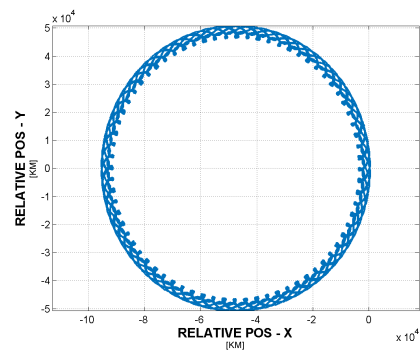


(D) Eccentricità

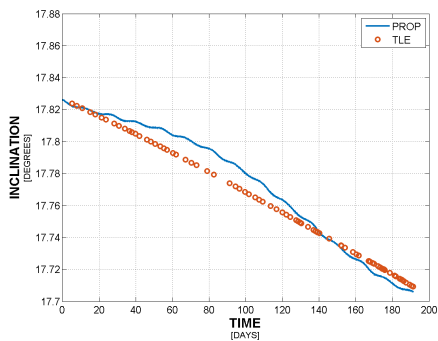
FIGURA 3.25: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 1978-113 A



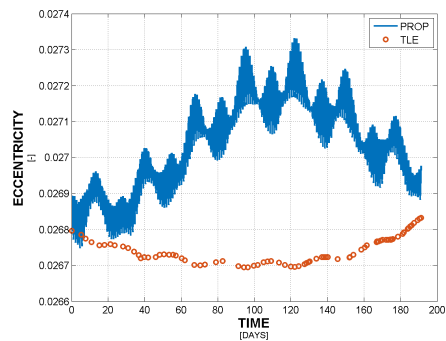
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

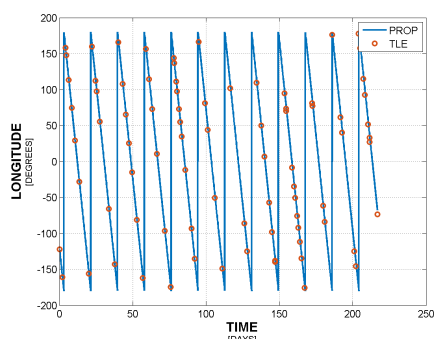


(C) Inclinazione

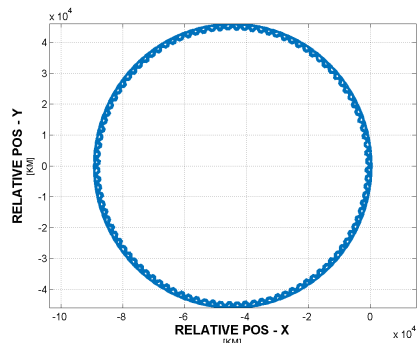


(D) Eccentricità

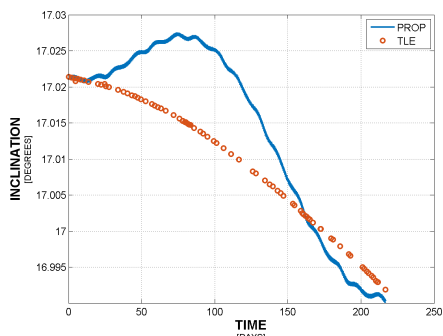
FIGURA 3.26: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 1978-113 D



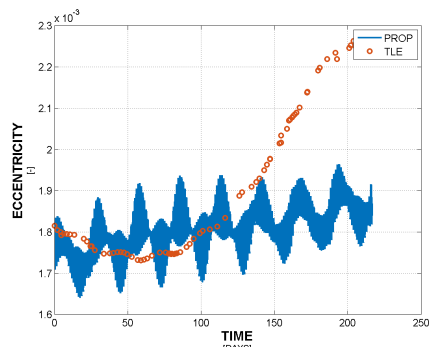
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

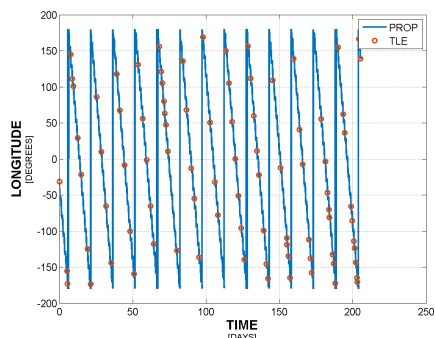


(C) Inclinatione

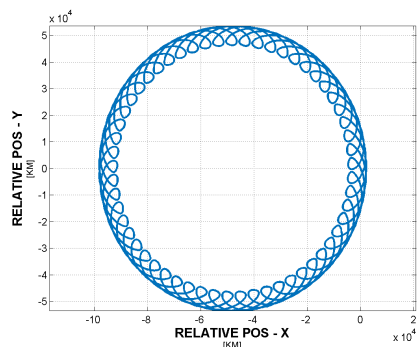


(D) Eccentricità

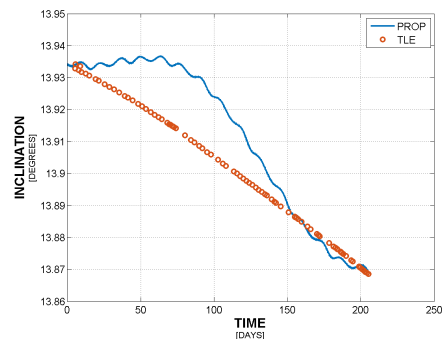
FIGURA 3.27: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 1985-024 A



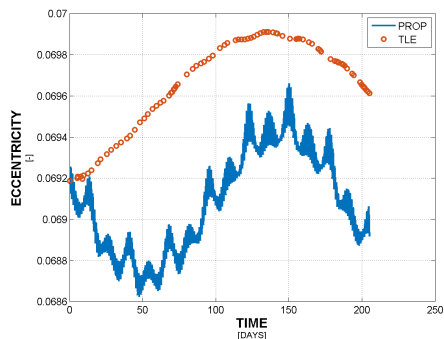
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

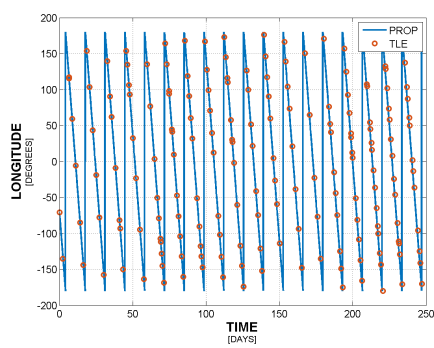


(C) Inclinatione

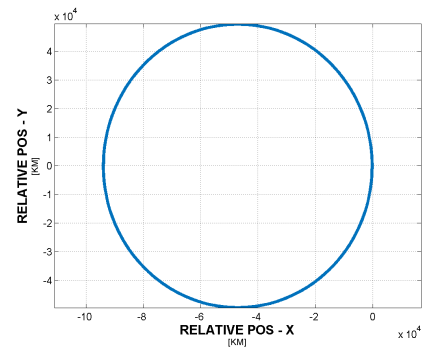


(D) Eccentricità

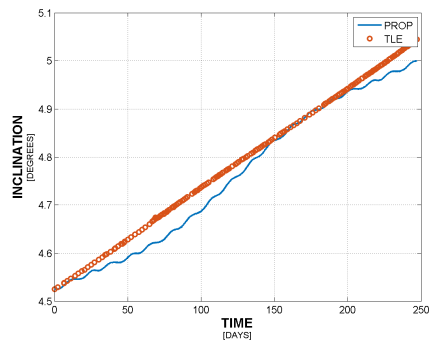
FIGURA 3.28: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 1997-040 A



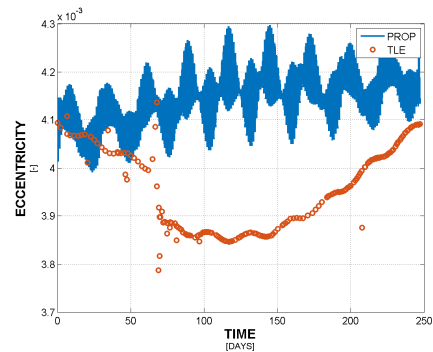
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa

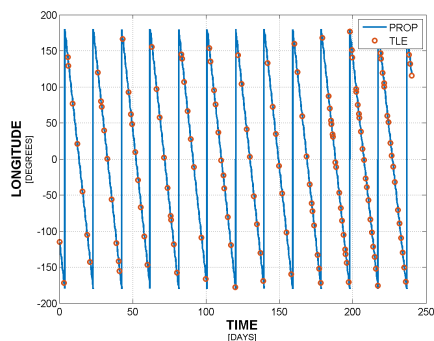


(C) Inclinazione

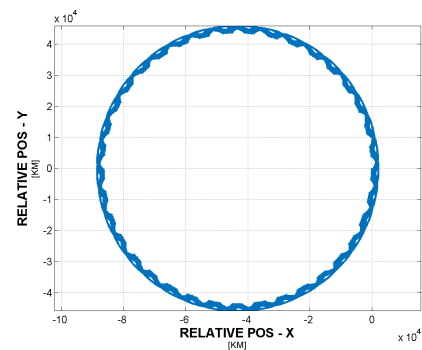


(D) Eccentricità

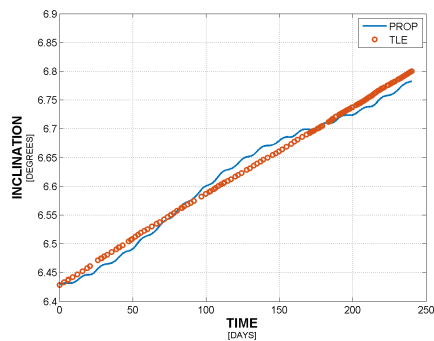
FIGURA 3.29: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 2006-048 A



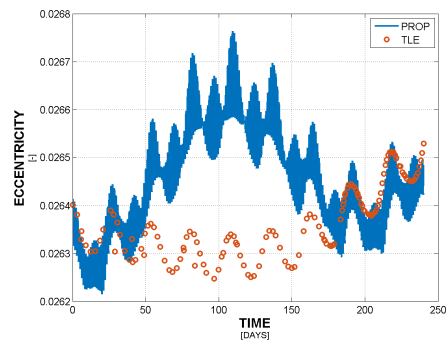
(A) Longitudine



(B) Posizione relativa



(C) Inclinazione



(D) Eccentricità

FIGURA 3.30: Confronto TLE/PROP – Classe D – Corpo 2008-006 C

3.1.2.5 Classe C1

Passiamo ora ad analizzare brevemente i corpi che vengono ancora controllati nelle loro manovre. L'analisi approfondita esula dallo scopo di questo lavoro, ma per completezza è bene esporli. Questi sono i corpi che appartengono alla classe *C* del rapporto di ESOC. In particolare, i corpi che appartengono alla classe *C1* sono corpi che dispongono di un controllo sia in direzione E-W (e quindi sulla longitudine), sia in direzione N-S (e quindi sulla latitudine). Il controllo su questi corpi permette loro di avere una longitudine circa costante e una inclinazione minore di 0.3° .

Di questa classe sono stati considerati 4 corpi per la validazione del propagatore, le cui sigle identificative sono presentate in TABELLA 3.5. Le TLE da cui sono stati ricavati i dati iniziali della propagazione sono riportate in SOTTOSOTTOSEZIONE A.1.1.5.

I dati che sono presentati in seguito sono l'andamento della longitudine nel tempo e l'andamento dell'inclinazione. Di questi sono anche presentati i valori che si ottengono da ogni set di TLE.

TABELLA 3.5: Validazione propagatore - Corpi di classe *C1*

Nr.	NORAD	COSPAR	Durata [DAYS]	$\bar{\lambda}$ [DEG]
1	28912	2005-049 B	70	0.10
2	31577	2007-021 A	161	3.03
3	33750	2009-008 B	175	3.10
4	36831	2010-037 B	193	2.89

Una cosa importante da fare presente è che i corpi appartenenti alla classe *C* sono stati propagati fino alla data a cui risale il rapporto di ESOC, ovvero la fine dell'anno 2012. Non sono stati propagati fino alla TLE più recente perché nei 3 anni successivi il controllo potrebbe essere cessato oppure potrebbero essere stati riposizionati su altri slot di longitudine dell'orbita GEO, non permettendo quindi di verificare la collimazione tra i dati delle TLE e quelli di ESOC.

3.1.2.6 Classe C2

I corpi che appartengono invece alla classe *C2* sono corpi che dispongono solamente di un controllo in direzione E-W. Il controllo su questi corpi permette

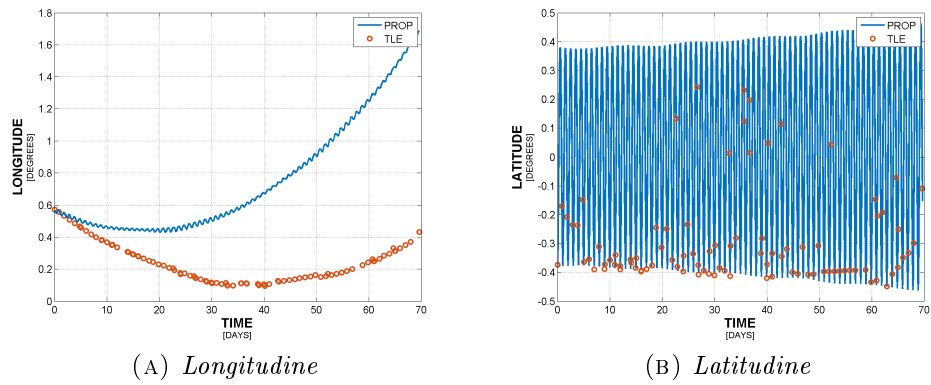


FIGURA 3.31: Confronto TLE/PROP – Classe C1 – Corpo 2005-049 B

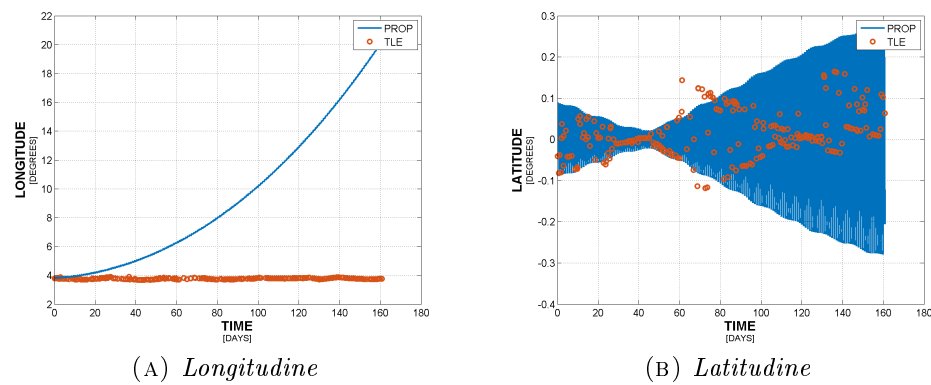


FIGURA 3.32: Confronto TLE/PROP – Classe C1 – Corpo 2007-021 A

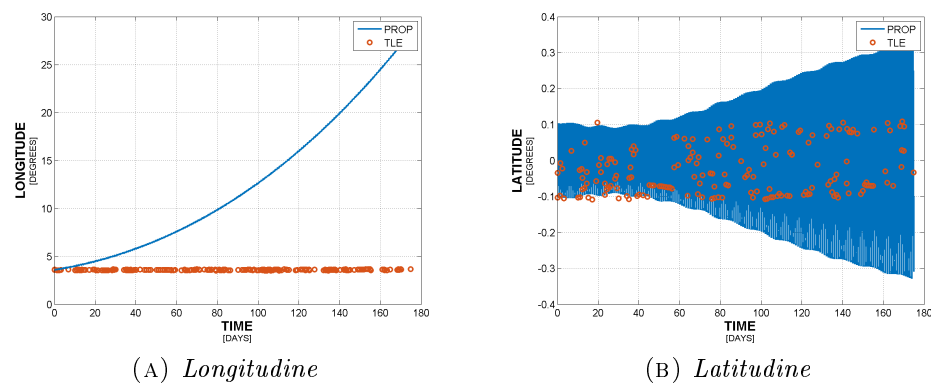


FIGURA 3.33: Confronto TLE/PROP – Classe C1 – Corpo 2009-008 B

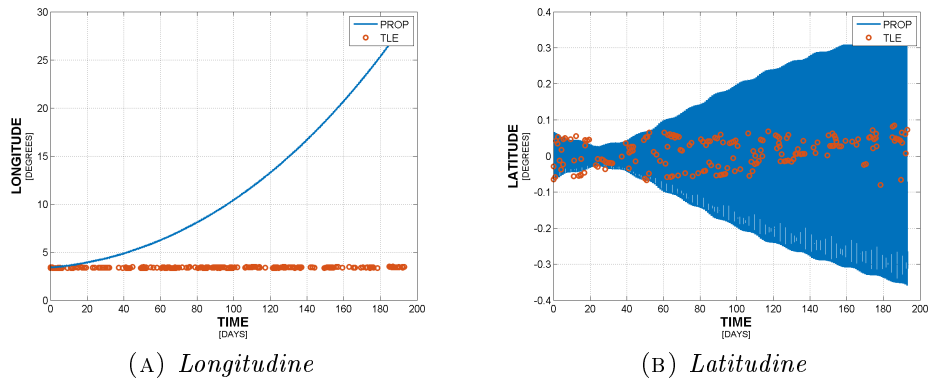


FIGURA 3.34: Confronto TLE/PROP – Classe C1 – Corpo 2010-037 B

loro di mantenere comunque una longitudine circa costante, ma l’inclinazione può risultare anche maggiore degli 0.3° considerati per la classe C1.

Di questa classe sono stati considerati 3 corpi per la validazione del propagatore, le cui sigle identificative sono presentate in TABELLA 3.6. Le TLE da cui sono stati ricavati i dati iniziali della propagazione sono riportate in SOTTOSOTTOSEZIONE A.1.1.6.

I dati che sono presentati in seguito sono l’andamento della longitudine nel tempo e l’andamento dell’inclinazione. Di questi sono anche presentati i valori che si ottengono da ogni set di TLE.

TABELLA 3.6: Validazione propagatore - Corpi di classe C2

Nr.	NORAD	COSPAR	Durata [DAYS]	$\bar{\lambda}$ [DEG]
1	28899	2005-044 A	152	25.09
3	32708	2008-011 A	303	34.48
4	34264	2009-101 A		11.80

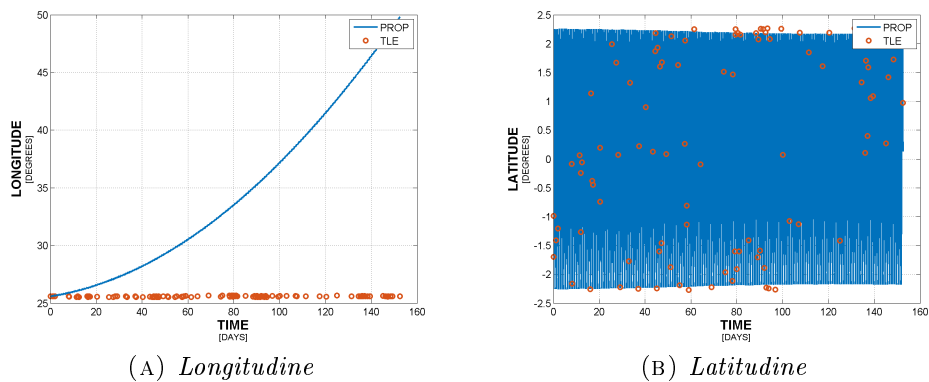


FIGURA 3.35: Confronto TLE/PROP – Classe C2 – Corpo 2005-044 A

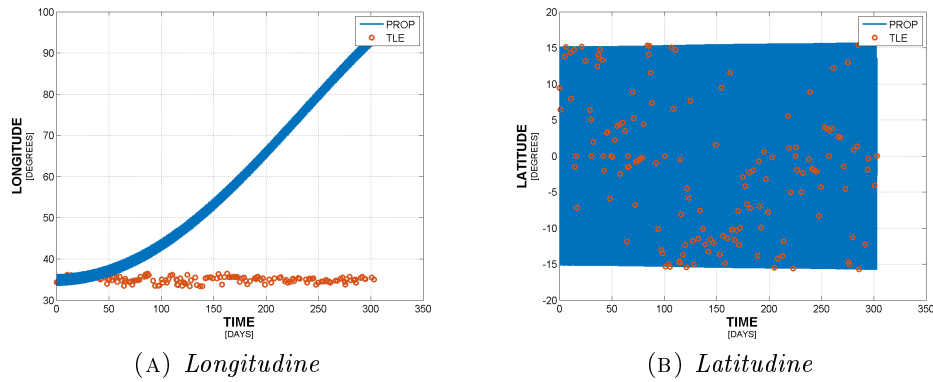


FIGURA 3.36: Confronto TLE/PROP – Classe C2 – Corpo 2008-011 A

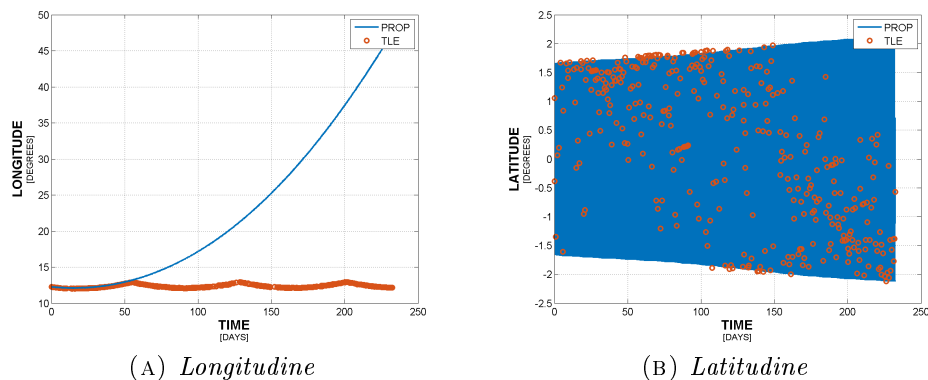


FIGURA 3.37: Confronto TLE/PROP – Classe C2 – Corpo 2009-101 A

3.2 Piano di Laplace

3.2.1 Definizione del piano e comportamento

Un particolare comportamento che si verifica per corpi in orbita geostazionaria è un'oscillazione dell'inclinazione attorno a un valore medio di circa 7.4° , come presentato in [11–13, 19]. Questa perturbazione è il risultato di una combinazione degli effetti di terzo corpo di Luna e Sole e della non perfetta sfericità della Terra, espressa in questo caso con il termine J_2 del potenziale gravitazionale. Questa dipendenza si può notare propagando delle condizioni iniziali senza uno o l'altro termine, in questo caso non si avrà questo comportamento.

Il piano di Laplace viene definito come il piano attorno al cui asse precede l'orbita di un qualsiasi corpo in posizione geostazionaria ed è appunto in piano inclinato di 7.4° circa rispetto all'equatore terrestre. Un corpo la cui orbita giace quindi su questo piano nelle sue condizioni iniziali non soffrirà delle oscillazioni attorno a esso, ma sarà più stabile nel tempo. Alcune proposte sono state appunto

fatte per sfruttare questo piano come disposal zone per detriti riguardanti l'orbita geostazionaria data la sua maggiore stabilità, [19].

Come già anticipato in precedenza, in seguito a questo fenomeno l'orbita di un corpo precede attorno all'asse del piano di Laplace, il che significa che se l'orbita è inizialmente geostazionaria, ovvero a inclinazione $i = 0^\circ$, essa subirà delle escursioni fino a $i = 15^\circ$, per poi tornare al suo valore iniziale. Computazionalmente si è verificato che questa oscillazione ha un periodo di circa 53 anni.

L'eccentricità dell'orbita non è interessata da questo fenomeno e rimane quindi circa costante. Ciò significa che il corpo continuerà comunque a rimanere ad altezza geostazionaria, ma la attraverserà in due punti invece che rimanerci costantemente. Come verrà poi verificato più avanti, SOTTOSEZIONE 4.4.1, la velocità relativa di un corpo con queste caratteristiche rispetto all'orbita geostazionaria è direttamente proporzionale all'inclinazione dell'orbita del corpo, con valori che arrivano anche a 800–1000 m/s per la maggior parte dei corpi, con picchi che arrivano anche a 3000 m/s per i corpi della classe *I*, ovvero quelli con orbite altamente inclinate.

3.2.2 Verifica del propagatore

In questo ambito, la presenza del piano di Laplace e l'oscillazione delle orbite attorno a esso sono state sfruttate per verificare il corretto funzionamento del propagatore orbitale sviluppato. Per fare ciò sono stati considerati 5 corpi ed è stata creata per ognuno di loro una TLE ad hoc. L'unica differenza tra questi, infatti, è solamente l'inclinazione iniziale dell'orbita su cui si trovano, come presentato in TABELLA 3.7, dove *JD* indica la julian date relativa all'inizio della propagazione. Per verificare la correttezza del periodo di oscillazione, la simulazione è stata effettuata su una durata di 55 anni.

TABELLA 3.7: Dati iniziali delle orbite

Nr.	i [DEG]	Ω [DEG]	e [-]	<i>JD</i>
1	7.4			
2	9.4			
3	5.4	0.0	0.0000	2457132.5
4	7.3			
5	7.5			

I set TLE che sono stati utilizzati per queste propagazioni sono riportati in SOTTOSEZIONE A.1.2.

Come si può vedere dalle figure, l'andamento che ci si aspettava viene rispettato, con anche il periodo di oscillazione atteso. In particolare, a conferma del fatto che le orbite precedono attorno a un vettore inclinato di circa 7.4° si può notare come il corpo che ha inclinazione iniziale pari a 7.4° è quello che subisce meno escursioni di inclinazione e di ascensione retta del nodo ascendente. Questo è visibile ancora più chiaramente nelle in FIGURA 3.39, FIGURA 3.41 e FIGURA 3.43.

In tutte queste figure si può inoltre notare come tutti i comportamenti finora elencati siano da considerarsi come comportamenti medi. Le due grandezze, infatti, hanno delle variazioni molto più repentine, ma di ampiezza molto più piccola rispetto alle due macrooscillazioni di inclinazione e ascensione retta del nodo ascendente. Riducendo il numero di dati che vengono salvati per ogni corpo, questi comportamenti possono non venire visualizzati. Non si vedranno, per esempio, se si prende un dato al mese o, addirittura, un dato all'anno.

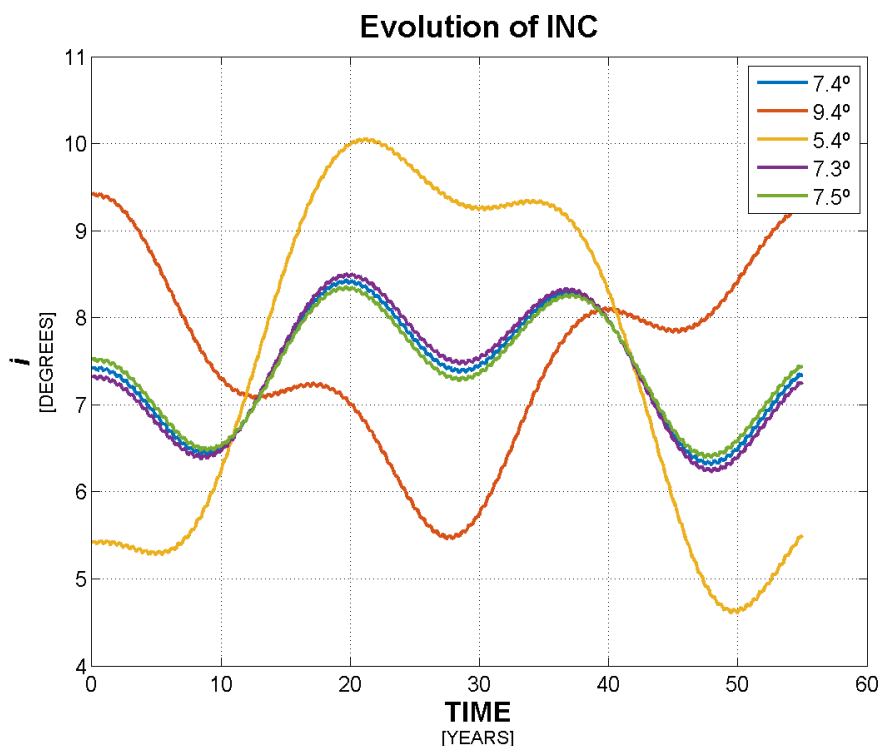


FIGURA 3.38: Variazione inclinazione nel tempo

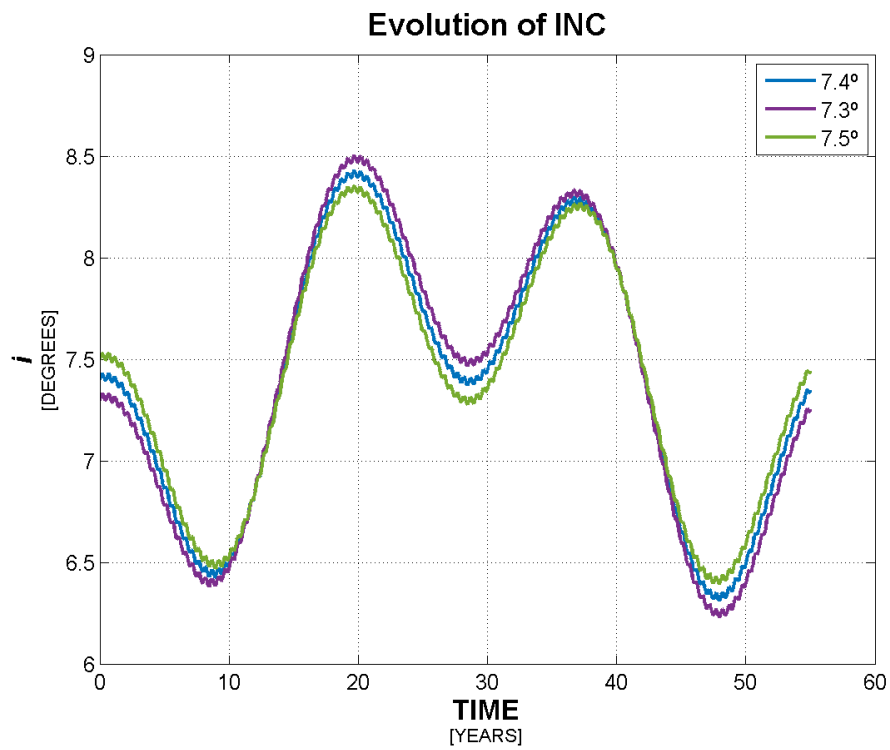


FIGURA 3.39: Variazione inclinazione nel tempo

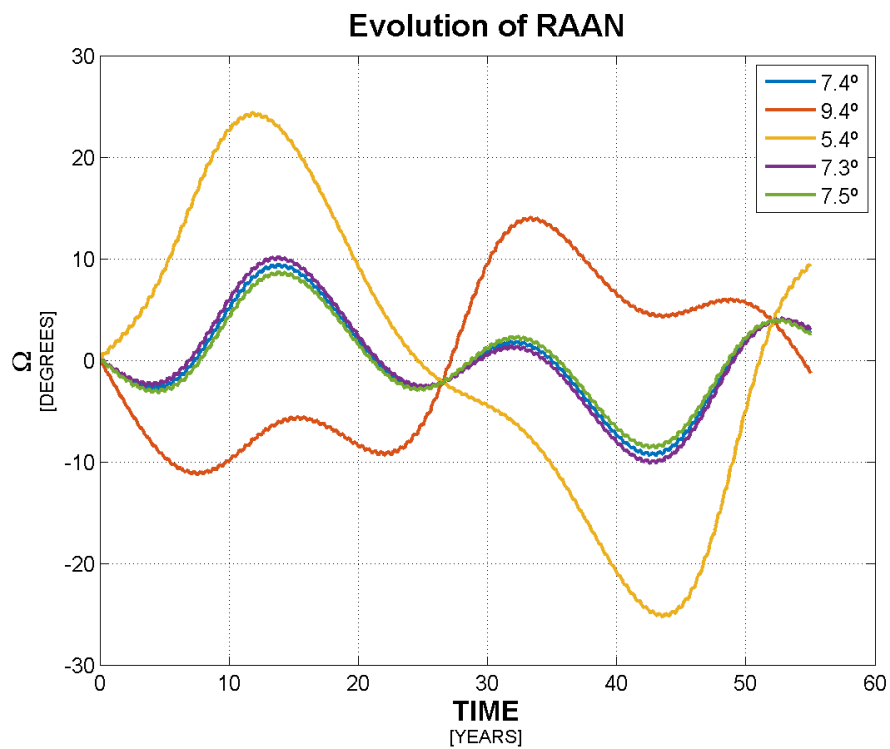


FIGURA 3.40: Variazione ascensione retta del nodo ascendente nel tempo

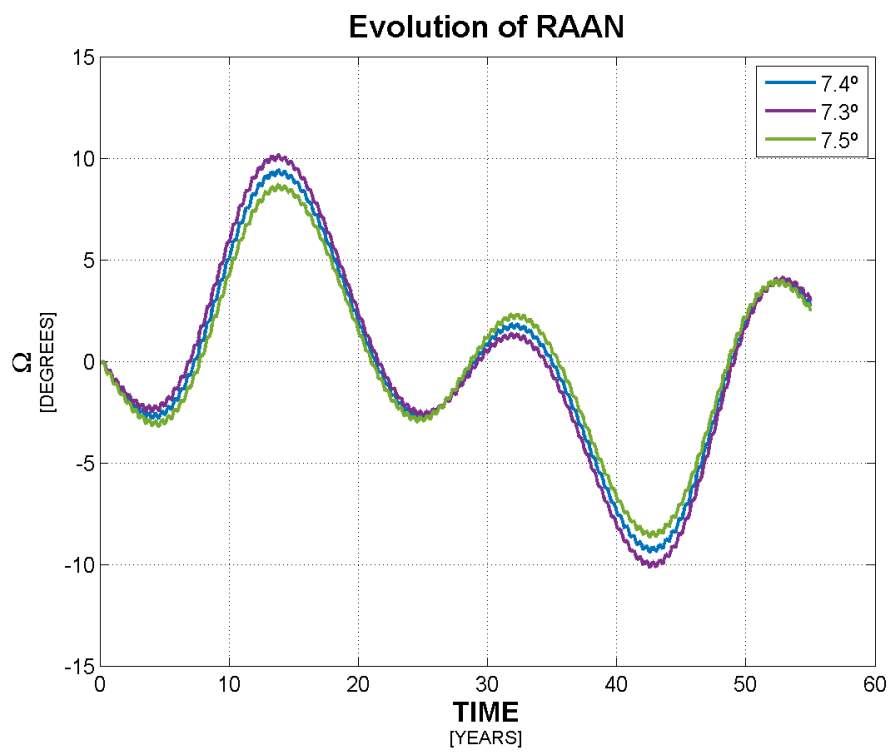


FIGURA 3.41: Variazione ascensione retta del nodo ascendente nel tempo

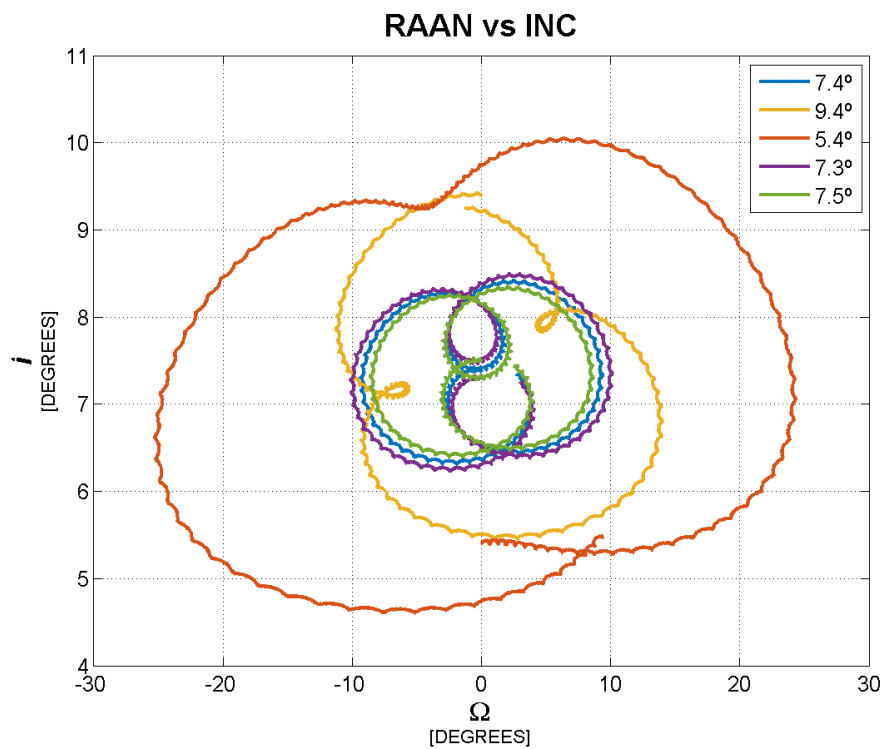


FIGURA 3.42: Puntamento del vettore ortogonale al piano orbitale

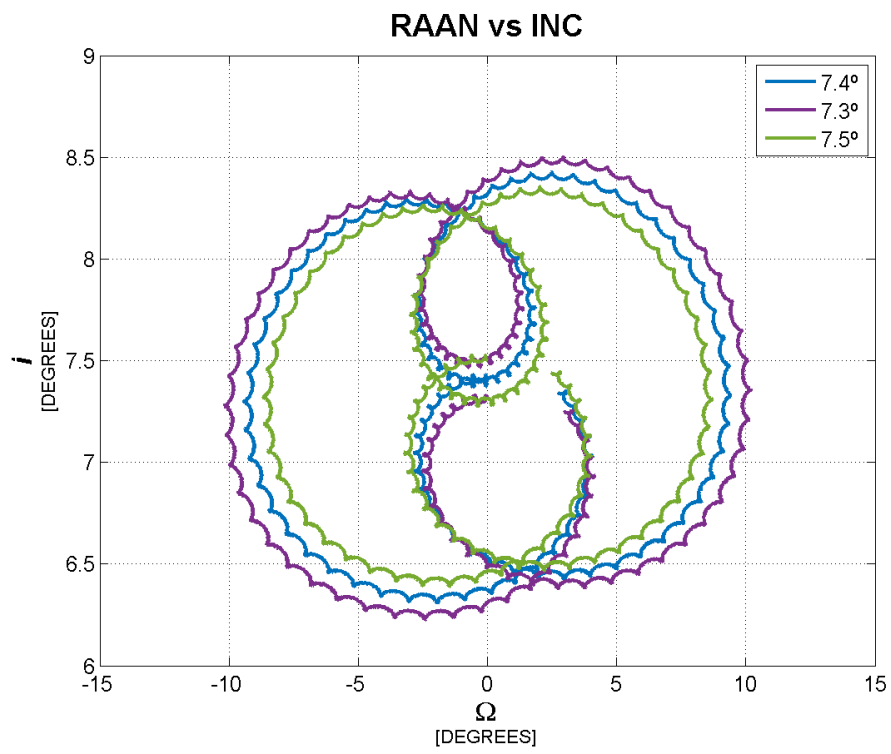


FIGURA 3.43: Puntamento del vettore ortogonale al piano orbitale

Capitolo 4

Analisi corpi non controllati

Verranno ora presentate le metodologie di lavoro che sono state sviluppate e le proposte che sono state fatte per la classificazione degli oggetti pericolosi in orbita geostazionaria. Si parlerà delle guidelines accettate a livello internazionale e dello sviluppo di un indice di danno ambientale per la valutazione di ogni singolo corpo non controllato. In seguito sono presentate delle possibili migliorie che si possono apportare al lavoro.

4.1 Disposal guidelines

Da [6, 7, 9] si ha una definizione operativa di detriti spaziali, che è

Space debris are all man made objects including fragments and elements thereof, in Earth orbit or re-entering the atmosphere, that are non functional.

Questi detriti possono andare a influenzare la vita operativa di satelliti ancora funzionanti e dei passi sono stati mossi dalla comunità internazionale per la mitigazione di questo problema.

Ciò che con queste guidelines si vuole evitare il più possibile sono i *break-up*, ovvero eventi che generano frammenti che rimangono in orbita. La causa maggiore di break-up su cui ci si focalizzerà sarà la collisione accidentale con altri corpi in orbita.

Il primo passo è stata la definizione di due regioni protette, una che riguarda le orbite LEO e una che riguarda le orbite GEO. La prima si estende sfericamente dalla superficie terrestre fino a un'altezza di 2,000km. La seconda si estende fino

a una distanza di 200km, sia verso l'interno che verso l'esterno dell'anello GEO, e ha una latitudine compresa tra -15° e $+15^\circ$ e sarà quella che verrà considerata.

Data la difficoltà di azione per quanto riguarda oggetti già in orbita, molto è stato detto riguardo al comportamento che si deve tenere con corpi che devono ancora essere lanciati, specialmente in fase di progettazione della missione. Deve essere infatti previsto un corretto *disposal*, ovvero il posizionamento del satellite non più operativo in orbite che non intersecano le zone protette, oltre alla minimizzazione del numero di oggetti rilasciati durante la fase operativa del satellite, come per esempio cover di telescopi.

Per quanto riguarda l'orbita geostazionaria, queste guidelines prevedono che i corpi alla fine della loro vita operativa siano mossi il più lontano possibile e che questi vengano posti in orbite che rimangono al di sopra della zona protetta. Con degli studi appositi si è arrivati a definire due condizioni che devono essere rispettate per fare sì che l'orbita di disposal su cui verrà posto il corpo non rientri in zona GEO. Queste sono:

- un incremento di altezza del perigeo di almeno

$$235 + (1000 \cdot C_R \cdot A/m)\text{km} \quad (4.1)$$

dove C_R è il coefficiente di pressione della radiazione solare e A/m è il rapporto tra area e massa del corpo, mentre il valore minimo di 235 km deriva dalla somma tra l'ampiezza della zona protetta (200 km) e la massima variazione in altitudine che un oggetto può subire dovuta alle perturbazioni orbitali (35 km);

- un'eccentricità $e \leq 0.003$ oppure un puntamento del vettore eccentricità verso il solstizio d'estate o d'inverno, ovvero

$$\Omega + \omega \approx 90, 270 \quad (4.2)$$

In FIGURA 4.1 sono mostrate delle combinazioni tra il puntamento e il modulo dell'eccentricità che causano un rientro nella zona protetta GEO in 40 anni. In FIGURA 4.2 invece è mostrato il ΔV necessario in base alla distanza del re-orbiting oltre l'anello GEO. Entrambe le figure da [7].

Per quanto riguarda, invece, i corpi già presenti in orbita e non più operativi, queste guidelines sono più difficilmente applicabili. Questi corpi, infatti, nella quasi totalità dei casi hanno esaurito il propellente che avevano a bordo e non c'è quindi

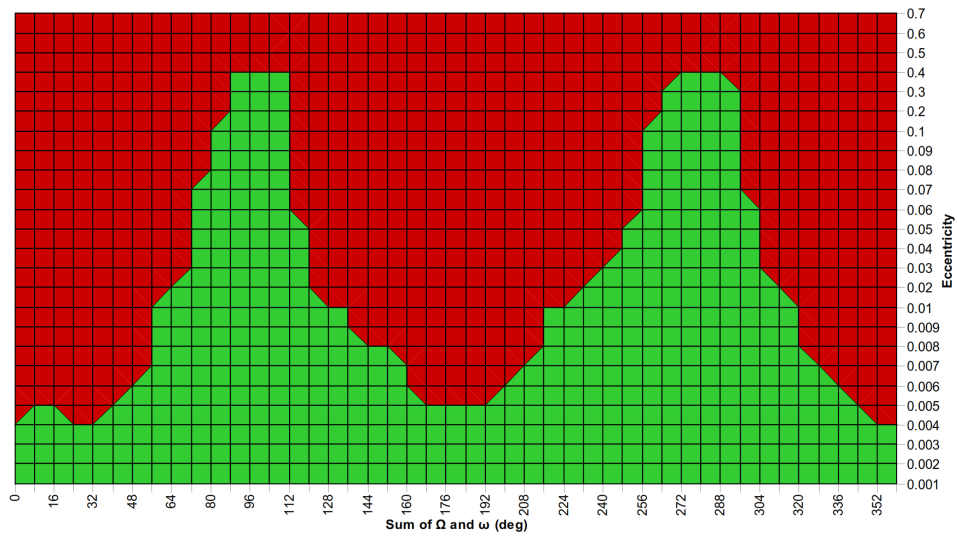


FIGURA 4.1: Combinazioni di puntamento e modulo del vettore eccentricità di un'orbita che causano un rientro del corpo orbitante nella zona protetta dell'orbita GEO in 40 anni

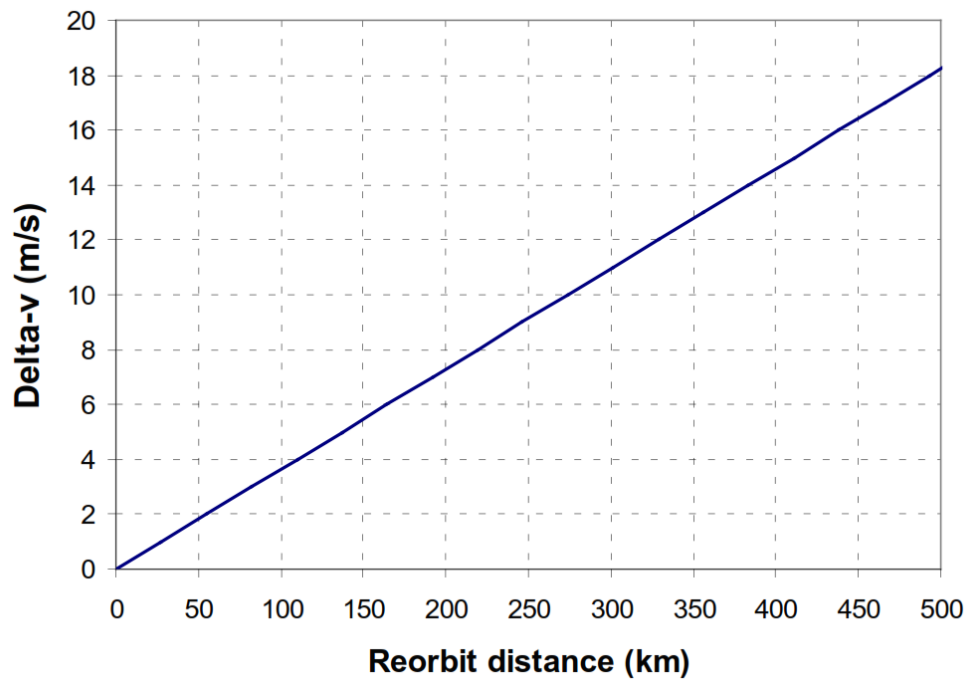


FIGURA 4.2: ΔV richiesto in funzione dell'altezza del re-orbit

possibilità di spostarli autonomamente. Si possono progettare e sviluppare degli strumenti e delle missioni per spostarli, per esempio con sistemi che non prevedono il contatto con essi [5], ma per il momento nulla è stato ancora applicato.

4.2 Database di partenza

Per la parte che seguirà è stato considerato un database ottenuto da SpaceTrack in data 20 Ottobre 2015. Questo contiene i set TLE dei corpi in orbita geostazionaria che, come detto precedentemente, sono i corpi che hanno:

- eccentricità minore di 0.2;
- moto medio compreso tra 0.9 e 1.1 rivoluzioni per giorno sidereo, il che corrisponde circa a un semiasse maggiore compreso tra 39,664 e 45,314 km;
- inclinazione minore di 70°.

Le masse sono state invece reperite da altre fonti, [8, 15, 22].

In TABELLA 4.1 sono presentati alcuni dati sulla composizione della popolazione dei detriti in questo tipo di orbita. Si può vedere il numero di oggetti in ogni classe, compresi quelli non presenti nel catalogo ESOC e quindi indicati con *NA*, la massa totale presente in ogni classe e la massa media per un corpo che vi appartiene.

In TABELLA 4.2 sono invece presentati i dati riguardanti le classi più in generale, ovvero dividendo solamente corpi controllati e corpi non controllati. I corpi di cui non si dispone la classe sono corpi lanciati dopo l'anno 2012. Data la loro giovinezza è quindi ragionevole supporre che siano ancora attivi e sono stati quindi considerati come corpi ancora controllati.

Un primo dato interessante emerge dalle masse totali. Si può infatti notare come i corpi tutt'ora controllati, classi *C1*, *C2* e *NA*, siano meno della metà in numero rispetto ai corpi non controllati, ma abbiano una massa totale quasi doppia, come mostrato in FIGURA 4.4, e una massa media quasi tripla rispetto a essi. Da questo si nota il costante aumento di massa lanciata in orbita negli anni, permesso da lanciatori di sempre maggiori dimensioni e capacità.

TABELLA 4.1: Composizione classi, dettaglio

Classe	L1	L2	L3	D
Corpi	103	40	16	566
Percentuale	9%	3%	1%	47%
Massa totale [kg]	167,118	64,103	28,685	627,688
Massa media [kg]	1,623	1,603	1,793	1,109
Classe	C1	C2	I	NA
Corpi	283	83	9	109
Percentuale	23%	7%	<1%	9%
Massa totale [kg]	1,016,137	213,177	19,011	359,478
Massa media [kg]	3,591	2,568	2,112	3,298

TABELLA 4.2: Composizione classi, generale

Classe	Controllati	Non controllati
Corpi	475	734
Percentuale	39%	61%
Massa totale [kg]	1,588,792	906,605
Massa media [kg]	3,345	1,235

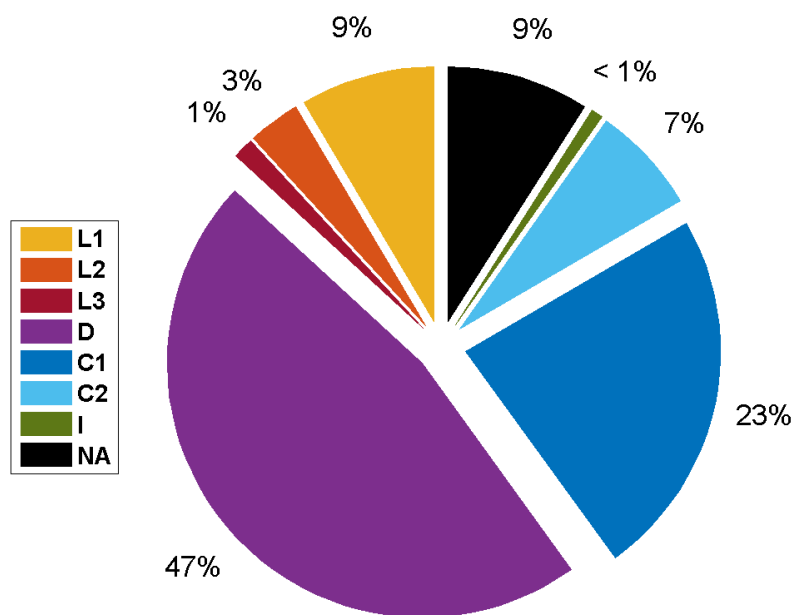


FIGURA 4.3: Percentuali di corpi nelle varie classi

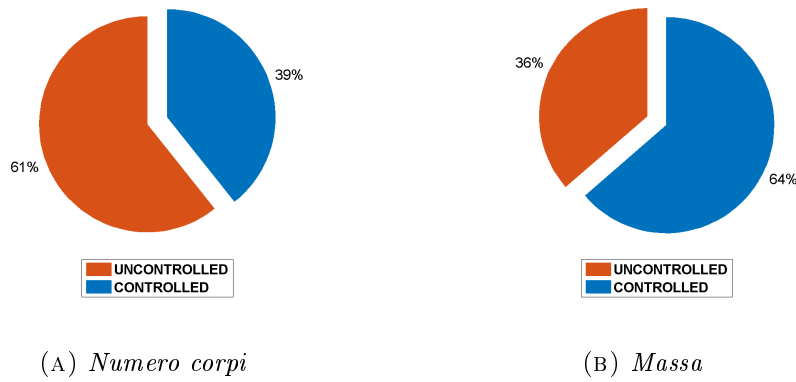


FIGURA 4.4: Confronto classi generali (controllati / non)

4.3 Calcolo percentuali

Un elemento che verrà utilizzato in seguito per proporre una stima della pericolosità dei corpi non controllati è la loro permanenza, in termini percentuali sul periodo orbitale, all'interno della zona protetta. Questa è stata suddivisa in tre zone, indicate in FIGURA 4.5, e la permanenza in ognuna di queste zone avrà un peso diverso in quello che sarà il calcolo dell'indice di danno ambientale legato a ogni singolo corpo.

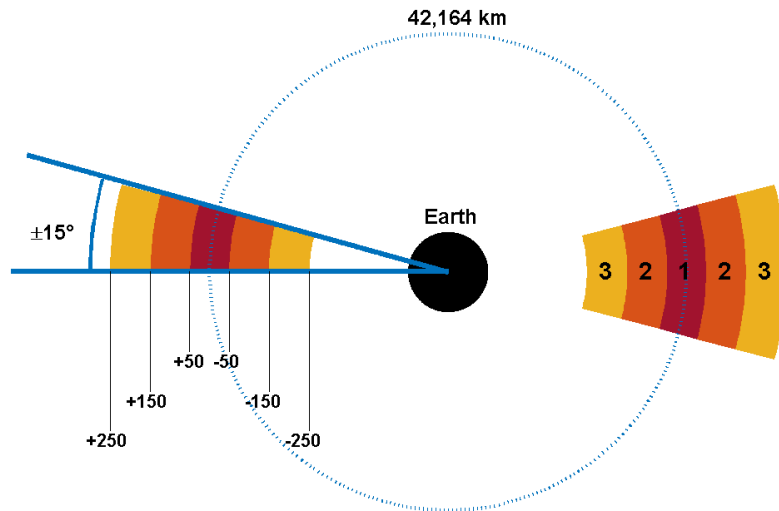


FIGURA 4.5: Suddivisione zone di pericolosità

Come si può vedere, la zona protetta è stata estesa di 50 km rispetto alle guidelines esposte in SEZIONE 4.1. Questo è dovuto al fatto che non è stato possibile

valutare efficacemente il rapporto tra area e massa di ogni corpo. Questo aumento è quindi da considerare come un fattore di sicurezza, dato che potrebbe portare alla considerazione di alcuni corpi correttamente spostati come ancora pericolosi. Il fatto invece che abbia un'estensione compresa tra i $\pm 15^\circ$ di latitudine fa sì che comportamenti come la precessione del piano orbitale non facciano comunque uscire i corpi dalla zona protetta.

Un altro punto su cui conviene soffermarsi è il calcolo della percentuale di tempo spesa nelle zone pericolose. I dati da cui si parte sono presi dai set di TLE ed è già stato verificato che questi non sono istantanei, ma mediati nel tempo. Partendo dai parametri orbitali sarebbe relativamente veloce e affidabile calcolare queste percentuali con analiticamente, ma si potrebbe incorrere in errori più o meno grandi dovuti a questa non istantaneità dei valori. Si è quindi scelto di propagare ogni corpo per un certo numero di giorni e di calcolare queste percentuali in base all'integrazione della sua orbita.

I dati salvati, però, potrebbero avere dei Δt molto ampi tra una posizione e la successiva, il che aumenterebbe il numero di giorni di propagazione necessari per raggiungere una convergenza dei risultati. Per valutare quanto possono valere questi due valori è stata considerata la propagazione di un oggetto creato ad hoc che intersecasse tutte e tre le zone pericolose. Di questo si sono calcolate le percentuali analiticamente, presentate in TABELLA 4.3, e poi sono state calcolate con la propagazione. Le percentuali ottenute sono le seguenti:

- **zona 0:** 59.50%
- **zona 3:** 17.28%
- **zona 2:** 15.56%
- **zona 1:** 7.66%

dove con zona 0 si è indicato il tempo passato all'esterno della zona protetta. L'orbita è schematizzata, con le zone protette, in FIGURA 4.6, ovviamente fuori scala per permettere una comprensione chiara e qualitativa.

In FIGURA 4.7 è possibile vedere l'andamento della percentuale di permanenza nelle zone protette rispetto alla durata dell'integrazione. Questi dati sono stati ricavati con un $\Delta t = 2000$ secondi tra un dato e l'altro e si può notare che già dopo 30 giorni i risultati sono pressoché costanti, con variazioni molto contenute. In TABELLA 4.4 sono presentate delle percentuali per alcune durate di integrazione.

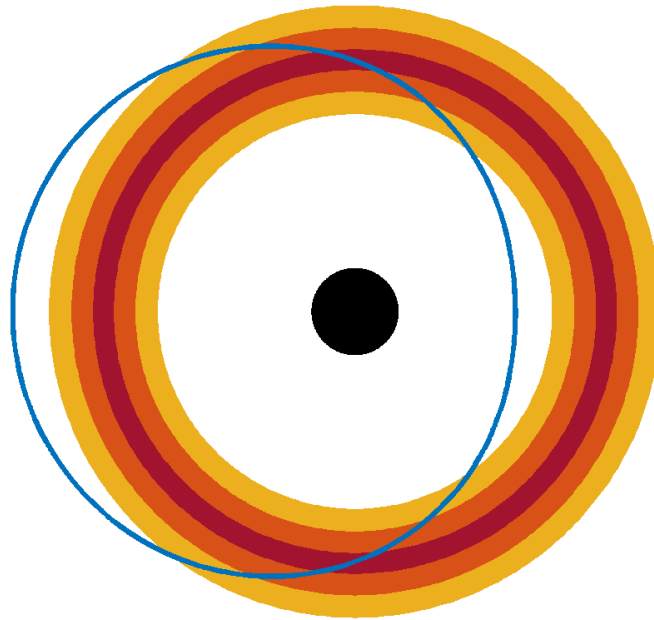


FIGURA 4.6: Orbita ad hoc per la verifica del calcolo delle percentuali

TABELLA 4.3: Dati orbitali dell'orbita di verifica

Parametro	Valore
a	42,164 km
e	0.01
i	0°
Ω	0°
ω	0°

In TABELLA 4.5 sono presentate le stesse percentuali, ma con un $\Delta t = 1000$ secondi tra un dato e l'altro, e in TABELLA 4.6 con un $\Delta t = 250$ secondi da cui si può notare che la differenza è molto bassa.

TABELLA 4.4: Percentuali di permanenza, $\Delta t = 2000s$

Zona	Analitiche	28gg	52gg	76gg	100gg
0	59.50%	59.90%	59.98%	59.91%	59.88%
3	17.28%	17.11%	17.00%	17.15%	17.10%
2	15.56%	15.29%	15.44%	15.39%	15.50%
1	7.66%	7.70%	7.58%	7.55%	7.52%

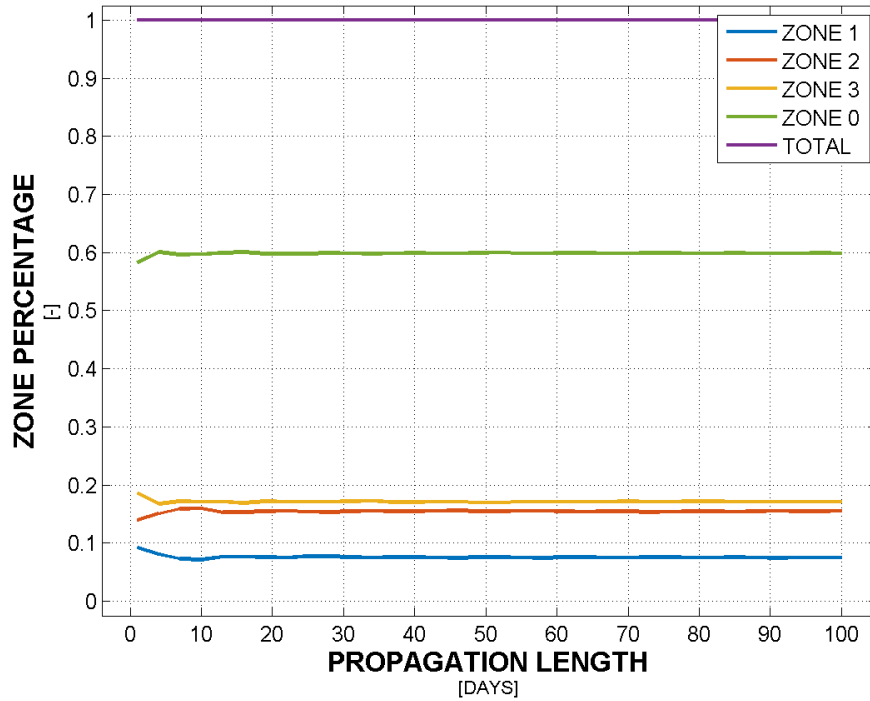


FIGURA 4.7: Percentuale di permanenza rispetto al tempo di integrazione

TABELLA 4.5: Percentuali di permanenza, $\Delta t = 1000s$

Zona	Analitiche	28gg	52gg	76gg	100gg
0	59.50%	59.86%	59.91%	59.88%	59.90%
3	17.28%	17.11%	17.12%	17.19%	17.12%
2	15.56%	15.46%	15.47%	15.43%	15.49%
1	7.66%	7.57%	7.50%	7.50%	7.49%

TABELLA 4.6: Percentuali di permanenza, $\Delta t = 250s$

Zona	Analitiche	28gg	52gg	76gg	100gg
0	59.50%	59.80%	59.88%	59.88%	59.88%
3	17.28%	17.18%	17.13%	17.16%	17.11%
2	15.56%	15.48%	15.46%	15.44%	15.47%
1	7.66%	7.54%	7.53%	7.52%	7.54%

4.4 Pericolosità oggetti

A questo punto si può introdurre un metodo di calcolo per quello che verrà chiamato *indice di danno ambientale* per ognuno degli oggetti non controllati in orbita. Questo valore indica il grado di pericolosità di ogni corpo, prendendo in considerazione sia la velocità relativa tra questo e l'anello GEO, sia la percentuale di tempo passata nelle zone protette, sia la massa catastroficamente frammentata (che verrà introdotta in SOTTOSEZIONE 4.4.3). Una volta calcolati tutti i

coefficienti sarà possibile stilare una classifica che vedrà alla sua cima i corpi più pericolosi.

Una prima analisi sulla pericolosità dei corpi in orbita geostazionaria è già stata effettuata da Anderson e Schaub, [1, 2] e il metodo da loro proposto prendeva in considerazione la minima distanza dall'anello GEO, considerando come zona protetta un toro con centro a 42,164km, e la velocità relativa a un oggetto geostazionario che i detriti avevano.

Si è voluto proporre un metodo alternativo, per alcuni aspetti, che prendesse in considerazione anche la massa di ogni corpo in orbita, parametro non valutato da Anderson e Schaub. È stato quindi introdotta la variabile della *massa catastroficamente frammentata*, che verrà approfondita in SOTTOSEZIONE 4.4.3 ed è stato cambiato il metodo per il calcolo del coefficiente dovuto alla posizione, come anticipato in SEZIONE 4.3 e definito in SOTTOSEZIONE 4.4.4. È stato invece mantenuto il coefficiente che riguarda la velocità relativa a un generico oggetto in orbita geostazionaria.

4.4.1 Velocità relativa

Per il calcolo della componente dell'indice di danno dovuta alla velocità relativa tra il corpo considerato e un generico oggetto in orbita geostazionaria (con velocità $v_{GEO} = 3.0747\text{km/s}$) è stata considerata la stessa funzione proposta da Anderson e Schaub ([2]), ovvero

$$R_v(v) = 1 - e^{-3v/\tilde{v}}, \quad v \geq 0 \quad (4.3)$$

dove v è la velocità relativa tra il corpo e l'anello geostazionario e \tilde{v} è un parametro che consente di scalare la velocità relativa, in modo da avere il valore unitario come valore massimo del coefficiente di rischio, come si può vedere in FIGURA 4.8. Il valore di \tilde{v} è stato ricavato sfruttando l'energia minima che il NASA Standard Breakup Model definisce come critica. Questa è $\tilde{E}_p^* \equiv 40\text{kJ/kg}$, diminuita a $\tilde{E}_p^* \equiv 35\text{kJ/kg}$ in favore di sicurezza e per sopperire leggermente alle approssimazioni del modello. Ne deriva quindi

$$\tilde{E}_p^* = \frac{1}{2}\tilde{v}^2 \quad \rightarrow \quad \tilde{v} = \sqrt{2\tilde{E}_p^*} \approx 0.26458\text{km/s}$$

Questo fattore è stato ricavato supponendo uguali le masse dei due corpi che impattano, approssimazione che in alcuni casi si può rivelare molto lontana dalla realtà. È stato comunque deciso di tenerlo perché fornisce un ulteriore elemento

di discriminazione tra i corpi più pericolosi e quelli meno pericolosi e non influenza la veridicità dei risultati, essendo la differenza di massa tra i due corpi valutata più nel dettaglio quando si parlerà della massa catastroficamente frammentata, in SOTTOSEZIONE 4.4.3.

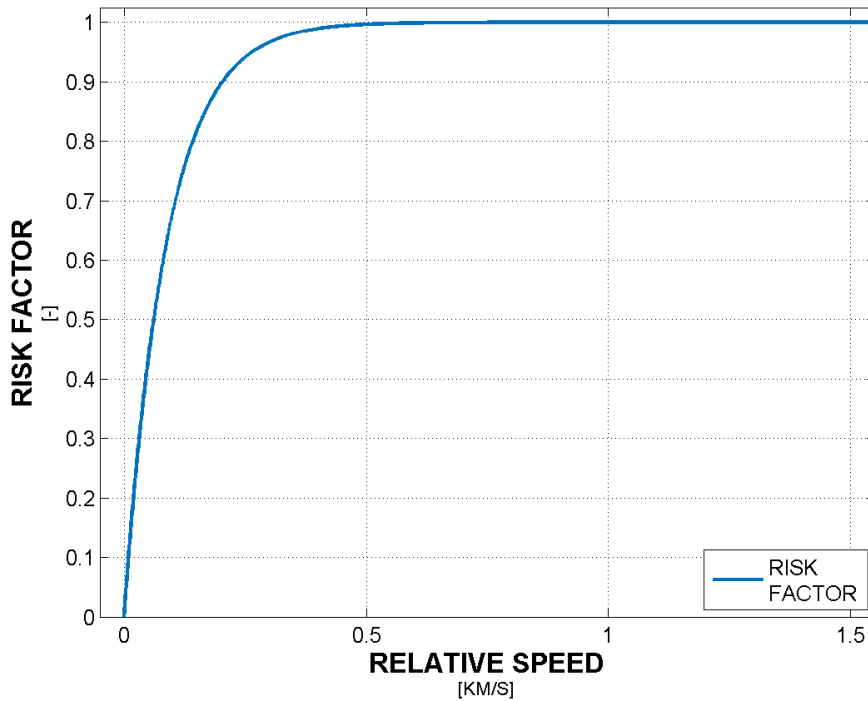


FIGURA 4.8: Fattore di rischio sulla velocità relativa

Un comportamento già accennato in SOTTOSEZIONE 3.2.1 è che la velocità relativa all'orbita geostazionaria è praticamente direttamente proporzionale all'inclinazione dell'orbita, come si può vedere in FIGURA 4.9. Questo mostra come si debbano tenere in considerazione i comportamenti come quello relativo al piano di Laplace, SEZIONE 3.2, che modificano l'inclinazione delle orbite dei corpi.

4.4.2 Coefficiente di rischio sul tempo

Come anticipato, rispetto al metodo di Anderson e Schaub è stato cambiato il metodo di calcolo del coefficiente dovuto alla posizione. Questo parte dalle percentuali di permanenza del corpo considerato in ognuna delle regioni protette, come esposto in SEZIONE 4.3, e queste vengono moltiplicate ognuna per un certo peso, ottenuto da una distribuzione gaussiana intorno all'altitudine dell'orbita geostazionaria. I pesi utilizzati sono indicati in FIGURA 4.10 e i valori sono indicati in TABELLA 4.7. Ovviamente il tempo trascorso fuori dalla zona protetta non viene considerato.

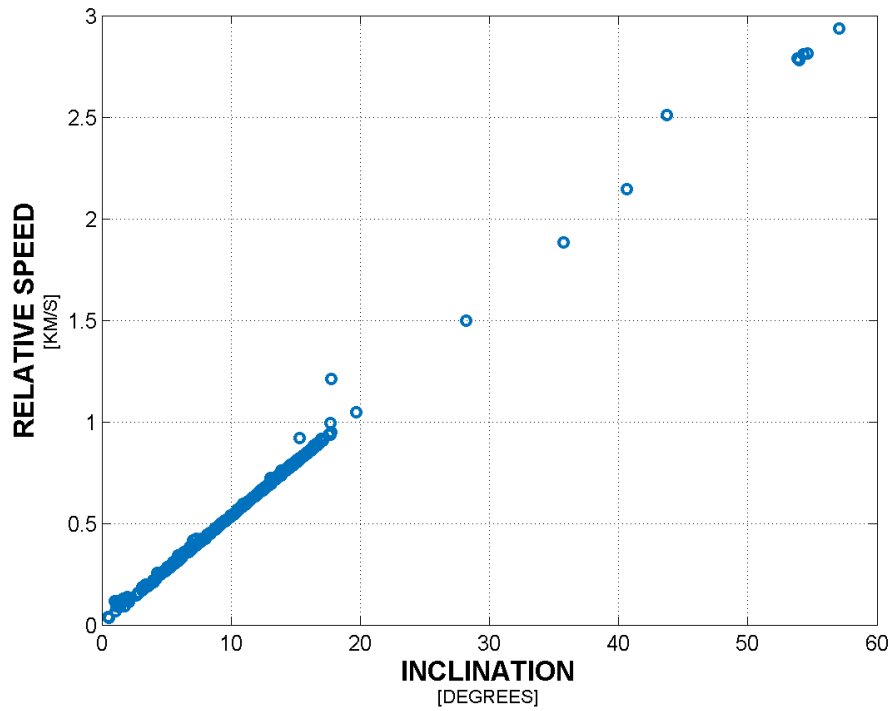


FIGURA 4.9: Andamento della velocità relativa rispetto all'inclinazione

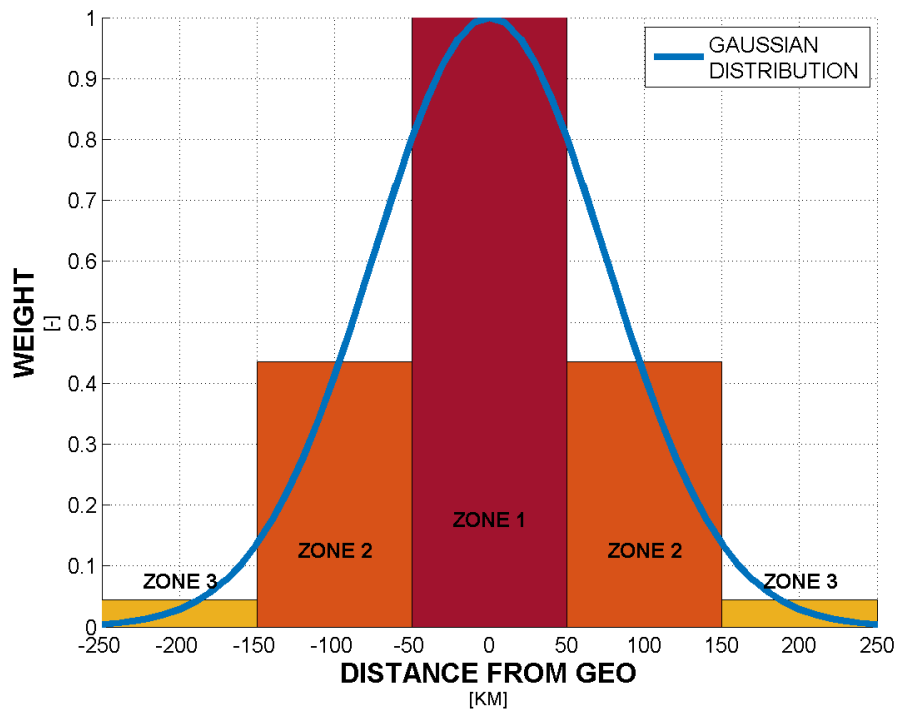


FIGURA 4.10: Distribuzione gaussiana dei pesi

TABELLA 4.7: Pesì delle percentuali di tempo

Zona	Simbolo	Peso
1	W_1	1.000000
2	W_2	0.435460
3	W_3	0.044736

Indicando con Δt_1 , Δt_2 e Δt_3 le percentuali di tempo trascorso rispettivamente nella zona 1, nella zona 2 e nella zona 3, il fattore di rischio così ottenuto vale

$$R_t = W_1\Delta t_1 + W_2\Delta t_2 + W_3\Delta t_3 \quad (4.4)$$

4.4.3 Massa catastroficamente frammentata

Introduciamo ora l'ultimo termine che interessa il calcolo dell'indice di danno ambientale legato a ogni corpo, ovvero la *massa catastroficamente frammentata*. Come anticipato in SOTTOSEZIONE 4.4.1, anche in questo caso verrà considerata come energia critica di impatto un valore di $E_p^* \equiv 35\text{kJ/kg}$.

Per ogni corpo vengono calcolate due energie specifiche di impatto:

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{UNC}}{M_{GEO}} \cdot \frac{v_{rel}^2}{1000} \quad E_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{GEO}}{M_{UNC}} \cdot \frac{v_{rel}^2}{1000} \quad (4.5)$$

dove v_{rel} è la velocità del corpo relativa all'anello geostazionario, M_{UNC} è la massa del corpo considerato e M_{GEO} è la massa media dei corpi controllati, e quindi ancora operativi, presenti in orbita geostazionaria, ovvero 3,344.82kg.

A questo punto si aprono quattro possibili casi:

1. $E_1 < E_p^*$ e $E_2 < E_p^*$: l'impatto è a velocità abbastanza ridotta da non causare dei breakup tra i due corpi, la massa criticamente frammentata vale

$$M_c = 0$$

2. $E_1 \geq E_p^*$ e $E_2 < E_p^*$: l'energia dell'impatto è tale da frammentare solamente il corpo operativo, la massa criticamente frammentata vale

$$M_c = M_{GEO}$$

3. $E_1 < E_p^*$ e $E_2 \geq E_p^*$: l'energia dell'impatto è tale da frammentare solamente il corpo incontrollato, la massa criticamente frammentata vale

$$M_c = M_{UNC}$$

4. $E_1 \geq E_p^*$ e $E_2 \geq E_p^*$: l'impatto è abbastanza energetico da frammentare entrambi i corpi, la massa criticamente frammentata vale

$$M_c = M_{GEO} + M_{UNC}$$

Una volta definita la massa criticamente frammentata si può definire il coefficiente basato su di essa, che semplicemente la scala sul doppio della massa massima in orbita, sia tra oggetti controllati che tra detriti, in modo da avere, anche in questo caso, un numero minore di uno

$$R_m = \frac{M_c}{2M_{MAX}} \quad (4.6)$$

con $M_{MAX} = 6910\text{kg}$. L'andamento del valore di R_m è visibile in FIGURA 4.11.

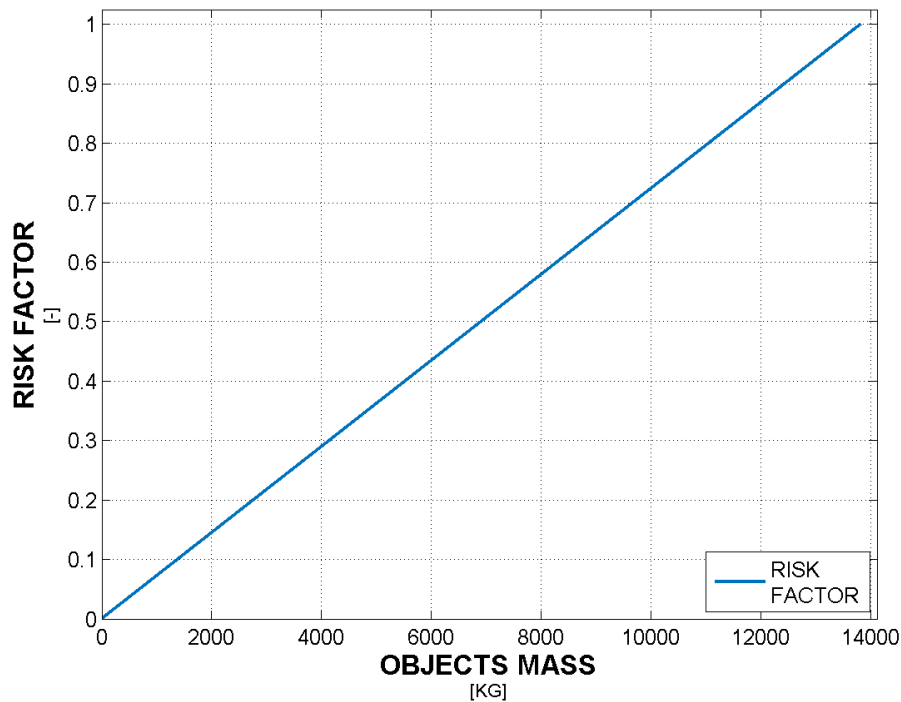


FIGURA 4.11: Coefficiente di rischio sulla massa

4.4.4 Indice di danno ambientale

A questo punto si hanno tutti gli elementi necessari per la definizione dell'indice di danno ambientale, ovvero

$$R_f = R_v \cdot R_t \cdot R_m \quad (4.7)$$

dove R_v è definito dalla EQUAZIONE 4.3, R_t è definito dalla EQUAZIONE 4.4 e infine R_m è definito dalla EQUAZIONE 4.6.

4.4.5 Classificazione

La classificazione per quanto riguarda i dieci corpi più pericolosi è presentata in TABELLA 4.8 per la classe $L1$, in TABELLA 4.9 per la classe $L2$, in TABELLA 4.10 per la classe $L3$, in TABELLA 4.11 per la classe D e in TABELLA 4.12 per la classe I . Per ottenere questi risultati sono state effettuate delle propagazioni orbitali della durata di 50 giorni e con un $\Delta t = 2000$ secondi tra un dato salvato e l'altro.

In TABELLA 4.13 sono presentate infine le prime posizioni della classifica che comprende tutti i corpi non controllati in orbita. Da questa si può notare che le prime trenta posizioni sono occupate interamente da corpi appartenenti alla classe L , mentre per trovare il primo corpo della classe D bisogna arrivare fino alla posizione numero 73, con un indice di danno $R_f = 0.34466$.

Dall'analisi dei coefficienti si può notare che le velocità relative degli oggetti in cima alla classifica sono maggiori di 300m/s, ma in molti casi comprese tra 500m/s e 700m/s. Per quanto riguarda le masse, invece, si hanno masse catastroficamente frammentate attorno ai 6000–7000kg e quindi non trascurabili. Si può poi notare come il coefficiente sulla permanenza nelle zone protette mostri che i corpi maggiormente pericolosi sono quasi costantemente all'interno di queste.

La classificazione completa di tutti i 734 corpi non controllati è presentata in APPENDICE B.

Questa classificazione può essere considerata come un punto di partenza per un approfondimento in vista della progettazione di una missione atta alla rimozione di alcuni dei corpi più pericolosi presenti in orbita geostazionaria.

TABELLA 4.8: Classifica corpi di classe L1

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	1987-096 A	1.00000	0.99988	0.43016	0.43011	L1
2	1985-102 A	1.00000	0.99987	0.43016	0.43010	L1
3	1991-010 A	1.00000	0.99985	0.43016	0.43010	L1
4	1995-054 A	1.00000	0.99971	0.43016	0.43003	L1
5	1998-025 A	1.00000	0.99921	0.43016	0.42982	L1
6	2001-037 A	1.00000	0.99705	0.43016	0.42889	L1
7	1994-069 A	0.95557	0.99985	0.44825	0.42827	L1
8	1997-070 A	1.00000	0.99976	0.42293	0.42282	L1
9	1996-058 A	0.98563	0.99976	0.42473	0.41853	L1
10	1975-097 A	1.00000	0.99878	0.41569	0.41518	L1

TABELLA 4.9: Classifica corpi di classe L2

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	1993-077 A	1.00000	0.99982	0.51518	0.51509	L2
2	1995-049 A	1.00000	0.99777	0.51518	0.51403	L2
3	1995-069 A	1.00000	0.99640	0.46410	0.46243	L2
4	1996-055 A	1.00000	0.97327	0.45078	0.43873	L2
5	1989-101 A	1.00000	0.99988	0.43016	0.43011	L2
6	1994-082 A	1.00000	0.99978	0.43016	0.43007	L2
7	1994-038 A	1.00000	0.99972	0.43016	0.43004	L2
8	1985-016 A	1.00000	0.99986	0.41569	0.41563	L2
9	1984-078 A	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L2
10	1994-060 A	1.00000	0.99981	0.40845	0.40838	L2

TABELLA 4.10: Classifica corpi di classe L3

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	1991-064 A	0.99713	0.99988	0.41569	0.41445	L3
2	1985-007 A	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L3
3	1994-030 A	1.00000	0.99983	0.41026	0.41019	L3
4	1997-083 A	0.85547	0.99550	0.47683	0.40608	L3
5	1991-079 A	1.00000	0.99988	0.39760	0.39755	L3
6	2000-029 A	0.95322	0.99887	0.41026	0.39063	L3
7	1987-084 A	0.98014	0.99987	0.38675	0.37901	L3
8	1990-094 A	0.86069	0.99989	0.41026	0.35307	L3
9	1986-027 A	0.88750	0.99990	0.38675	0.34320	L3
10	1995-045 A	0.80764	0.99978	0.40845	0.32981	L3

TABELLA 4.11: Classifica corpi di classe *D*

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	1999-009 A	0.81104	0.97031	0.43798	0.34467	D
2	1996-034 A	0.83926	0.99973	0.41026	0.34422	D
3	1992-041 A	0.90513	0.99981	0.37994	0.34383	D
4	1992-082 A	0.83404	0.99987	0.41026	0.34213	D
5	1983-059 C	1.00000	0.99989	0.32886	0.32882	D
6	1983-098 A	1.00000	0.99988	0.32886	0.32882	D
7	1978-073 A	0.84919	0.99963	0.38675	0.32830	D
8	1993-072 A	0.75380	0.99984	0.41026	0.30921	D
9	1985-107 A	0.77079	0.99986	0.38675	0.29806	D
10	2000-032 C	0.65788	0.99920	0.44463	0.29228	D

TABELLA 4.12: Classifica corpi di classe *I*

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	2010-005 A	0.37083	1.00000	0.47358	0.17562	I
2	2011-038 A	0.08696	1.00000	0.40122	0.03489	I
3	2011-013 A	0.08669	1.00000	0.40122	0.03478	I
4	2011-073 A	0.05920	1.00000	0.40122	0.02375	I
5	2010-036 A	0.05731	1.00000	0.40122	0.02299	I
6	2010-068 A	0.05133	1.00000	0.40122	0.02059	I
7	2010-045 A	0.01977	1.00000	0.53870	0.01065	I
8	1963-031 A	0.29352	1.00000	0.00282	0.00083	I
9	1978-012 A	0.00000	1.00000	0.29065	0.00000	I

4.5 Proposte di miglioramento

Nel CAPITOLO 3 è stata verificata l'affidabilità del propagatore, capace di restituire risultati molto precisi, pur con qualche limite dettato principalmente dalla sua costruzione. Si può quindi migliorare il tutto in svariati modi.

La cosa più importante è aggiungere una stima molto più precisa della pressione di radiazione solare, che in questo caso è stata solo blandamente considerata. Il modello previsto e implementato è quello della palla di cannone, che considera un rapporto area su massa costante. Dato però che il puntamento dei corpi potrebbe non essere rivolto verso il sole, questo parametro non è in quei casi costante. Si può quindi cercare di valutare al meglio questo rapporto, che influenza anche l'altezza di reorbiting prevista dalle guidelines internazionali. Essendo questi parametri molto difficili da modellare, e quindi da implementare, si è cercato di sopperire a questa mancanza con una maggiore altezza di reorbiting richiesta.

Altro punto molto importante è la stima delle condizioni iniziali tramite TLE.

TABELLA 4.13: Classifica generale

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	1993-077 A	1.00000	0.99982	0.51518	0.51509	L2
2	1995-049 A	1.00000	0.99777	0.51518	0.51403	L2
3	1995-069 A	1.00000	0.99640	0.46410	0.46243	L2
4	1996-055 A	1.00000	0.97327	0.45078	0.43873	L2
5	1989-101 A	1.00000	0.99988	0.43016	0.43011	L2
6	1987-096 A	1.00000	0.99988	0.43016	0.43011	L1
7	1985-102 A	1.00000	0.99987	0.43016	0.43010	L1
8	1991-010 A	1.00000	0.99985	0.43016	0.43010	L1
9	1994-082 A	1.00000	0.99978	0.43016	0.43007	L2
10	1994-038 A	1.00000	0.99972	0.43016	0.43004	L2
11	1995-054 A	1.00000	0.99971	0.43016	0.43003	L1
12	1998-025 A	1.00000	0.99921	0.43016	0.42982	L1
13	2001-037 A	1.00000	0.99705	0.43016	0.42889	L1
14	1994-069 A	0.95557	0.99985	0.44825	0.42827	L1
15	1997-070 A	1.00000	0.99976	0.42293	0.42282	L1
16	1996-058 A	0.98563	0.99976	0.42473	0.41853	L1
17	1985-016 A	1.00000	0.99986	0.41569	0.41563	L2
18	1975-097 A	1.00000	0.99878	0.41569	0.41518	L1
19	1991-064 A	0.99713	0.99988	0.41569	0.41445	L3
20	1985-007 A	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L3
21	1984-078 A	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L2
22	1984-041 A	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L1
23	1994-030 A	1.00000	0.99983	0.41026	0.41019	L3
24	1979-062 A	1.00000	0.99974	0.41026	0.41016	L1
25	1990-116 A	1.00000	0.99988	0.40845	0.40841	L1
26	1994-008 A	1.00000	0.99984	0.40845	0.40839	L1
27	1994-060 A	1.00000	0.99981	0.40845	0.40838	L2
28	2000-049 A	1.00000	0.99879	0.40845	0.40796	L1
29	1986-044 A	0.99216	0.99987	0.41026	0.40699	L1
30	1993-073 A	1.00000	0.99945	0.40672	0.40649	L2

È stato mostrato che queste sono composte di elementi mediati e come questo influenzi le posizioni e velocità calcolate a partire da essi. Si possono implementare dei metodi che verificano più set di TLE in ingresso e calcolino una condizione iniziale ottimale sfruttando dei sistemi di minimizzazione degli errori come i minimi quadrati.

Secondariamente si passa poi alla natura stessa del propagatore orbitale. Esso si basa infatti sulla risoluzione del problema dei due corpi, introducendo la presenza degli altri corpi come perturbazioni aggiuntive. Il primo passo che si potrebbe fare per migliorare questo aspetto è la costruzione di un propagatore più preciso, come avviene per esempio con il DROMO sviluppato dalla Universidad Politecnica

de Madrid, [4], anch'esso sviluppato a partire dal problema dei due corpi, oppure prevedendo un propagatore orbitale basato direttamente sul problema degli n corpi.

Si possono poi introdurre molte più armoniche per quanto riguarda il geopotenziale. In questo ambito ci si è infatti limitati ai termini J_2 , J_3 , J_4 e C_{22} perché gli effetti delle armoniche superiori erano di svariati ordini di grandezza inferiori. Tuttavia, queste hanno comunque un effetto sulla dinamica dei corpi e considerarlo può aumentare la precisione dei risultati.

Due aspetti prettamente tecnici su cui si può agire può essere semplicemente il Δt preso tra un dato e l'altro durante la propagazione e la durata di questa. È superfluo ribadire come questi due passi aumenterebbero la precisione dei dati mediati che sono considerati.

Un altro modo in cui si può migliorare la stima dell'indice di danno ambientale e, in particolare, la sua componente relativa alla massa è la stima della massa catastroficamente frammentata. Essa, infatti, considera la massa di un satellite come catastroficamente frammentata se l'impatto ha energia sufficiente per disintegrare completamente il corpo considerato e prendendo come nulla la massa in caso contrario. Ciò però non è per forza vero e si possono avere infatti delle rotture parziali, con conseguente influenza nella massa catastroficamente frammentata di solo una parte della massa dei due corpi considerati.

4.6 Conclusioni

In questo studio è stato sviluppato un propagatore orbitale che permettesse uno studio preliminare della pericolosità dei corpi non controllati in ambiente geostazionario, rispetto ai veicoli ancora operativi. Per l'integrazione delle orbite si è preso come base il problema dei due corpi perturbato, aggiungendo alcune armoniche del geopotenziale (J_2 , J_3 , J_4 , C_{22}), perturbazioni di terzo corpo generate da Sole e Luna e una superficiale valutazione della pressione di radiazione solare. Di questa si rende necessaria una modellazione molto più accurata di quella introdotta, ma la mancanza di dati fisici su materiali e geometrie rende questo miglioramento di molto difficile attuazione.

È stata ricavata una base di dati dal database Space-Track della NASA, raccogliendo i set di TLE che rispettavano certi parametri. Questa è stata poi integrata con le masse dei singoli corpi, reperite da diverse fonti. Questa base comprendeva

la totalità dei satelliti in ambiente geostazionario, cioè corpi controllati e non. Il lavoro di propagazione si è poi concentrato sui soli oggetti non più controllati, già suddivisi in alcune sottoclassi. Queste sono: corpi libranti attorno ai due punti stabili risultanti dal geopotenziale ($L1$ oscillanti attorno a 75°E , $L2$ oscillanti attorno 105°W e $L3$ oscillanti attorno a entrambi), corpi con un comportamento di deriva lungo l'orbita (classe D , non oscillano attorno a punti precisi, ma si spostano lungo tutto l'anello GEO) e corpi con orbite altamente inclinate (classe I). I corpi considerati sono 734 di cui 159 di classe L , 566 di classe D e 9 di classe I .

Sono state individuate delle zone protette, in accordo con le guidelines internazionali che riguardano la problematica dei detriti spaziali e si è proposto un indice di danno ambientale con cui classificare i corpi non controllati presenti nell'ambiente geostazionario. Questo prende spunto dal fattore di rischio proposto da Anderson e Schaub nel loro studio *Methodology For Characterizing High-Risk Orbital Debris In The GeoSynchronous Orbit Regime*, enfatizzando caratteristiche diverse degli oggetti considerati. Si prende in esame una percentuale di tempo trascorsa nelle zone protette (e non il numero di volte che queste vengono intersecate), la velocità relativa all'orbita GEO e viene considerato un coefficiente aggiuntivo che permette di valutare anche le diverse masse dei corpi considerati.

Quello che si può notare è che vengono parzialmente verificati i dati ottenuti anche dallo studio di Anderson e Schaub, che ottenevano come corpi di maggiore interesse quelli appartenenti alle classi $L1$ e $L2$. La differenza con il loro studio sta nel fatto non si considera un indice sul numero di intersezioni che i detriti possono avere con la zona protetta, ma si considera il loro comportamento come globale nella loro dinamica con il calcolo delle percentuali di tempo trascorse nelle varie zone. Inoltre nel loro caso tutti i corpi vengono considerati come aventi uguale massa, mentre in questo studio è stato aggiunto un coefficiente all'indice di danno ambientale che valuta le differenze tra masse, particolarizzato per ogni corpo non controllato e che considera la massa media dei corpi ancora controllati per il confronto. A causa di queste differenze tra i due metodi la classificazione finale ottenuta in questo studio è diversa da quella di Anderson e Schaub, ma più precisa sotto alcuni aspetti.

La classificazione può essere un punto di partenza per uno studio più di dettaglio volto all'identificazione di particolari corpi per una missione mirata di Active Debris Removal. L'indice di danno ambientale si presta poi a miglioramenti per incrementarne la precisione e l'affidabilità, come una più precisa valutazione della

massa catastroficamente frammentata oppure l'aggiunta di altri coefficienti che valutino parametri non considerati in questo studio (per esempio considerazioni sulla geometria dei corpi, che sono stati considerati in questo caso come puntuali).

Appendice A

TLE simulazione

In questa appendice sono contenute tutte le TLE che sono state utilizzate per le varie simulazioni.

A.1 Validazione propagatore

A.1.1 Confronto TLE/PROP

A.1.1.1 Classe L1

```
1
1 15057U 84063A 12248.99321517 +.00000074 +00000-0 +10000-3 0 9998
2 15057 014.5815 000.1094 0007635 067.4407 292.6726 01.00254742090634

2
1 15678U 85035B 11002.78340063 -.00000110 00000-0 10000-3 0 9990
2 15678 013.9579 014.1969 0005971 295.0612 064.8824 01.00274486 80596

3
1 17125U 86090D 12269.70658793 .00000000 00000-0 10000-3 0 9998
2 17125 014.4033 009.3709 0013215 045.1090 315.0163 01.00197206 94640

4
1 20693U 90061A 13310.48194058 -.00000090 00000-0 10000-3 0 9997
2 20693 014.4368 019.0175 0005238 115.2639 158.2106 01.00261828 85314

5
1 21132U 91014A 12251.75242881 .00000000 00000-0 10000-3 0 9996
2 21132 014.3590 025.9277 0003687 037.8907 322.1783 01.00250911 78878

6
1 22269U 92088A 11012.73143975 +.00000143 +00000-0 +10000-3 0 9994
2 22269 011.5690 041.4333 0001267 165.8312 194.1996 01.00346851065676
```

7

1	22694U	93039A	13316.07109990	-.00000124	00000-0	10000-3	0	9998
2	22694	012.6906	037.8448	0011123	175.2791	300.5180	01.00266688	72871

8

1	23680U	95054A	13317.02631896	-.00000112	00000-0	10000-3	0	9991
2	23680	012.3021	042.8137	0007448	038.0657	056.5565	01.00266808	66282

9

1	26394U	00036A	13233.00943903	-.00000120	00000-0	10000-3	0	9991
2	26394	009.9104	047.9567	0005560	046.8695	313.3006	01.00261106	48084

A.1.1.2 Classe L2

1

1	02969U	67094A	13322.38760049	.00000000	00000-0	10000-3	0	9994
2	02969	006.1430	306.0271	0019695	199.6623	292.4726	01.00167407	70732

2

1	15144U	84078A	13327.17579730	-.00000246	00000-0	10000-3	0	9994
2	15144	014.6289	356.7902	0003188	150.2353	305.7085	01.00283260	108591

3

1	15677U	85035A	13326.29128307	-.00000101	00000-0	00000+0	0	9996
2	15677	013.6458	031.9679	0002921	335.9819	052.9461	01.00272972	79218

4

1	19483U	88081A	13147.42733676	-.00000126	00000-0	00000+0	0	9993
2	19483	015.6924	006.3832	0010889	067.1673	220.0954	01.00272915	86791

5

1	20499U	90016A	13322.29716875	-.00000306	00000-0	10000-3	0	9990
2	20499	014.4447	017.1122	0005320	110.3756	335.2689	01.00350094	86885

6

1	22796U	93058B	13360.48546056	-.00000091	00000-0	00000+0	0	9992
2	22796	012.6784	037.8488	0016522	351.1357	134.9957	01.00271919	81215

7

1	23267U	94060A	13310.48093947	.00000035	00000-0	10000-3	0	9993
2	23267	013.3212	032.5979	0007291	088.7417	278.1385	01.00282962	70048

A.1.1.3 Classe L3

1

1	05588U	71095B	06259.21693911	-.00000224	+00000-0	+10000-3	0	9995
2	05588	013.5605	343.1890	0003841	202.0730	157.9402	01.00387944	126346

2

1	15484U	85007A	05197.09421140	+.00000078	+00000-0	+00000-0	0	9990
2	15484	012.0927	024.1315	0003135	057.3883	302.6825	01.00158200	076014

3

```

1 16667U 86027A 04285.00525430 .00000049 00000-0 00000+0 0 9999
2 16667 011.7326 031.5236 0010539 277.4341 082.4920 01.00228986 67941

```

A.1.1.4 Classe D

```

1
1 03623U 68116A 15103.74857259 -.00000134 00000-0 00000+0 0 9991
2 03623 013.2075 324.6938 0096327 354.6177 268.2804 00.90194080 89221

2
1 03947U 69045A 15078.25300626 -.00000131 00000-0 00000+0 0 9997
2 03947 013.3766 321.9140 0023442 343.6752 183.8743 00.90044204122198

3
1 11144U 78113A 15097.76145565 -.00000103 00000-0 00000+0 0 9996
2 11144 016.8671 350.1796 0028251 104.0912 066.5869 00.94032407 73074

4
1 11147U 78113D 15103.27322369 -.00000150 00000-0 00000+0 0 9994
2 11147 017.8264 344.9253 0267965 323.0607 231.2302 00.93756829 76061

5
1 15626U 85024A 15081.41069200 -.00000118 00000-0 00000+0 0 9996
2 15626 017.0214 356.7365 0018153 258.0149 311.4054 00.94797014 83357

6
1 24891U 97040A 15091.35492741 -.00000229 00000-0 00000+0 0 9998
2 24891 013.9340 352.3915 0691874 156.6963 129.4816 00.93698979 60822

7
1 29516U 06048A 15051.08477083 .00000000 00000-0 10000-3 0 9994
2 29516 004.5247 108.7974 0040941 162.4019 197.8795 00.92862167 28999

8
1 37381U 08006C 15057.51560984 -.00000165 00000-0 00000+0 0 9994
2 37381 006.4284 043.5118 0264016 216.2766 327.8360 00.95121326 23709

```

A.1.1.5 Classe C1

```

1
1 28912U 05049B 12077.24228561 -.00000033 00000-0 10000-3 0 9998
2 28912 000.3878 012.0757 0000836 083.7974 166.6286 01.00264377 22916

2
1 31577U 07021A 12090.11430339 .00000014 00000-0 00000+0 0 9993
2 31577 000.0267 230.9201 0002954 119.4174 242.0214 01.00269941 17717

3
1 33750U 09008B 12079.90715313 -.00000005 00000-0 00000+0 0 9998
2 33750 000.0652 348.2087 0003126 026.0515 133.2330 01.00274010 11435

4
1 36831U 10037B 12098.90257123 .00000005 00000-0 00000+0 0 9995

```

2 36831 000.0022 138.9488 0004117 235.1005 150.3280 01.00272388 6317

A.1.1.6 Classe C2

1
 1 28899U 05044A 12151.75240613 +.00000136 +00000-0 +10000-3 0 9991
 2 28899 002.2277 340.2069 0002570 089.5544 114.8415 01.00272798024074

2
 1 32708U 08011A 12044.88257685 .00000144 00000-0 10000-3 0 9993
 2 32708 015.2451 096.9766 0046787 354.0975 044.4101 01.00271557 15657

3
 1 34264U 09010A 12044.82709855 .00000068 00000-0 10000-3 0 9992
 2 34264 001.7283 105.5842 0001391 337.5924 009.5983 01.00263765 10829

A.1.2 Piano di Laplace

1 00000X 00000X 15110.00000000 -.00000135 00000-0 00000+0 0 9992
 2 00000 007.4000 000.0000 0000013 000.0000 000.0000 01.00253128187491

1 00000X 00000X 15110.00000000 -.00000135 00000-0 00000+0 0 9992
 2 00000 009.4000 000.0000 0000013 000.0000 000.0000 01.00253128187491

1 00000X 00000X 15110.00000000 -.00000135 00000-0 00000+0 0 9992
 2 00000 005.4000 000.0000 0000013 000.0000 000.0000 01.00253128187491

1 00000X 00000X 15110.00000000 -.00000135 00000-0 00000+0 0 9992
 2 00000 007.3000 000.0000 0000013 000.0000 000.0000 01.00253128187491

1 00000X 00000X 15110.00000000 -.00000135 00000-0 00000+0 0 9992
 2 00000 007.5000 000.0000 0000013 000.0000 000.0000 01.00253128187491

A.2 Controllo precisione calcolo zone

1 00001U 50001A 15001.00000000 -.00000047 00000-0 00000+0 0 9991
 2 00001 000.0000 000.0000 0100000 000.0000 000.0000 01.00273800000000

Appendice B

Classificazione generale

In questa appendice è presentata la classifica completa dei corpi non controllati in orbita geostazionaria, ordinata per fattore di rischio decrescente.

TABELLA B.1: Classifica generale completa, 1-25

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
1	<i>1993-077 A</i>	1.00000	0.99982	0.51518	0.51509	L2
2	<i>1995-049 A</i>	1.00000	0.99777	0.51518	0.51403	L2
3	<i>1995-069 A</i>	1.00000	0.99640	0.46410	0.46243	L2
4	<i>1996-055 A</i>	1.00000	0.97327	0.45078	0.43873	L2
5	<i>1989-101 A</i>	1.00000	0.99988	0.43016	0.43011	L2
6	<i>1987-096 A</i>	1.00000	0.99988	0.43016	0.43011	L1
7	<i>1985-102 A</i>	1.00000	0.99987	0.43016	0.43010	L1
8	<i>1991-010 A</i>	1.00000	0.99985	0.43016	0.43010	L1
9	<i>1994-082 A</i>	1.00000	0.99978	0.43016	0.43007	L2
10	<i>1994-038 A</i>	1.00000	0.99972	0.43016	0.43004	L2
11	<i>1995-054 A</i>	1.00000	0.99971	0.43016	0.43003	L1
12	<i>1998-025 A</i>	1.00000	0.99921	0.43016	0.42982	L1
13	<i>2001-037 A</i>	1.00000	0.99705	0.43016	0.42889	L1
14	<i>1994-069 A</i>	0.95557	0.99985	0.44825	0.42827	L1
15	<i>1997-070 A</i>	1.00000	0.99976	0.42293	0.42282	L1
16	<i>1996-058 A</i>	0.98563	0.99976	0.42473	0.41853	L1
17	<i>1985-016 A</i>	1.00000	0.99986	0.41569	0.41563	L2
18	<i>1975-097 A</i>	1.00000	0.99878	0.41569	0.41518	L1
19	<i>1991-064 A</i>	0.99713	0.99988	0.41569	0.41445	L3
20	<i>1985-007 A</i>	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L3
21	<i>1984-078 A</i>	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L2
22	<i>1984-041 A</i>	1.00000	0.99985	0.41026	0.41020	L1
23	<i>1994-030 A</i>	1.00000	0.99983	0.41026	0.41019	L3
24	<i>1979-062 A</i>	1.00000	0.99974	0.41026	0.41016	L1
25	<i>1990-116 A</i>	1.00000	0.99988	0.40845	0.40841	L1

TABELLA B.2: Classifica generale completa, 26-70

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
26	1994-008 A	1.00000	0.99984	0.40845	0.40839	L1
27	1994-060 A	1.00000	0.99981	0.40845	0.40838	L2
28	2000-049 A	1.00000	0.99879	0.40845	0.40796	L1
29	1986-044 A	0.99216	0.99987	0.41026	0.40699	L1
30	1993-073 A	1.00000	0.99945	0.40672	0.40649	L2
31	1997-083 A	0.85547	0.99550	0.47683	0.40608	L3
32	2004-010 A	0.99791	0.99538	0.40845	0.40572	L1
33	1990-054 A	0.97381	0.99989	0.41026	0.39947	L1
34	1990-061 A	1.00000	0.99989	0.39760	0.39755	L1
35	1991-079 A	1.00000	0.99988	0.39760	0.39755	L3
36	1982-103 A	0.96890	0.99981	0.41026	0.39743	L2
37	2000-036 A	1.00000	0.99888	0.39760	0.39716	L1
38	1983-041 A	1.00000	0.99988	0.39434	0.39429	L2
39	2000-029 A	0.95322	0.99887	0.41026	0.39063	L3
40	1990-102 A	0.95165	0.99988	0.41026	0.39038	L1
41	1990-016 A	1.00000	0.99988	0.38675	0.38670	L2
42	1990-112 A	1.00000	0.99988	0.38675	0.38670	L1
43	1988-095 A	1.00000	0.99988	0.38675	0.38670	L1
44	1988-066 A	1.00000	0.99988	0.38675	0.38670	L1
45	1991-087 A	1.00000	0.99988	0.38675	0.38670	L1
46	1992-074 A	1.00000	0.99986	0.38675	0.38669	L1
47	1993-013 A	1.00000	0.99986	0.38675	0.38669	L1
48	1983-028 A	1.00000	0.99985	0.38675	0.38669	L1
49	1984-063 A	1.00000	0.99985	0.38675	0.38669	L1
50	1984-016 A	1.00000	0.99985	0.38675	0.38669	L1
51	1993-062 A	1.00000	0.99985	0.38675	0.38669	L1
52	1994-012 A	1.00000	0.99984	0.38675	0.38668	L1
53	1981-102 A	1.00000	0.99980	0.38675	0.38667	L1
54	1981-069 A	1.00000	0.99980	0.38675	0.38667	L1
55	1980-016 A	1.00000	0.99973	0.38675	0.38664	L1
56	1979-035 A	1.00000	0.99970	0.38675	0.38663	L1
57	1975-123 A	1.00000	0.99905	0.38675	0.38638	L1
58	1983-100 A	1.00000	0.99983	0.38457	0.38451	L1
59	1981-061 A	1.00000	0.99979	0.38457	0.38450	L1
60	1980-104 A	1.00000	0.99978	0.38457	0.38449	L1
61	1979-087 A	1.00000	0.99973	0.38457	0.38447	L1
62	1997-021 A	0.95870	0.99739	0.40122	0.38364	L1
63	1994-087 A	0.99059	0.99981	0.38675	0.38303	L1
64	1987-084 A	0.98014	0.99987	0.38675	0.37901	L3
65	1989-081 A	0.87794	0.99988	0.41026	0.36014	L1
66	1999-010 A	0.88030	0.99971	0.40845	0.35946	L1
67	1987-091 A	0.85651	0.99987	0.41569	0.35600	L2
68	1990-094 A	0.86069	0.99989	0.41026	0.35307	L3
69	1981-018 A	1.00000	0.99986	0.35172	0.35167	L1
70	1989-098 A	0.90833	0.99990	0.38675	0.35126	L1

TABELLA B.3: Classifica generale completa, 71-115

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
71	1985-070 A	0.90016	0.99986	0.38675	0.34808	L2
72	1994-002 A	0.81548	0.99977	0.42293	0.34481	L1
73	1999-009 A	0.81104	0.97031	0.43798	0.34467	D
74	1996-034 A	0.83926	0.99973	0.41026	0.34422	D
75	1992-059 A	0.82802	0.99987	0.41569	0.34416	L2
76	1992-041 A	0.90513	0.99981	0.37994	0.34383	D
77	1986-027 A	0.88750	0.99990	0.38675	0.34320	L3
78	1992-082 A	0.83404	0.99987	0.41026	0.34213	D
79	1987-100 A	0.88333	0.99991	0.38675	0.34159	L2
80	1997-071 B	1.00000	0.99392	0.33971	0.33765	L1
81	1982-044 A	0.86852	0.99991	0.38675	0.33586	L1
82	1979-105 A	0.80921	0.99976	0.41026	0.33191	L1
83	1991-014 A	0.85463	0.99991	0.38675	0.33050	L1
84	1995-045 A	0.80764	0.99978	0.40845	0.32981	L3
85	1983-059 C	1.00000	0.99989	0.32886	0.32882	D
86	1983-098 A	1.00000	0.99988	0.32886	0.32882	D
87	1978-073 A	0.84919	0.99963	0.38675	0.32830	D
88	1988-063 A	1.00000	0.99989	0.32813	0.32810	L1
89	1993-039 A	0.71276	0.99975	0.45831	0.32658	L1
90	1985-076 C	1.00000	0.99988	0.32524	0.32520	L2
91	1974-060 A	0.87716	0.99791	0.36866	0.32269	L1
92	1977-071 A	0.82358	0.99951	0.38675	0.31836	L1
93	1982-105 A	0.98102	0.99989	0.32307	0.31690	L2
94	1993-072 A	0.75380	0.99984	0.41026	0.30921	D
95	1988-014 A	1.00000	0.99989	0.30715	0.30712	L1
96	1986-010 A	1.00000	0.99988	0.30715	0.30711	L1
97	1988-111 A	1.00000	0.99987	0.30715	0.30711	L1
98	1993-058 B	0.75066	0.99974	0.40411	0.30327	L2
99	1980-081 A	0.77654	0.99974	0.38675	0.30025	L2
100	1985-107 A	0.77079	0.99986	0.38675	0.29806	D
101	1985-035 A	1.00000	0.99984	0.29695	0.29690	L2
102	1984-022 A	0.76763	0.99993	0.38675	0.29685	L1
103	2000-032 C	0.65788	0.99920	0.44463	0.29228	D
104	1985-035 B	1.00000	0.99987	0.29196	0.29192	L1
105	1981-049 A	1.00000	0.99987	0.28978	0.28975	L2
106	1975-100 A	1.00000	0.99960	0.28769	0.28757	L2
107	1990-011 A	1.00000	0.99987	0.27394	0.27390	L1
108	1978-035 A	0.90356	0.99986	0.30172	0.27259	L1
109	1994-067 D	1.00000	0.99987	0.27097	0.27094	L3
110	1993-062 D	1.00000	0.99984	0.27097	0.27093	L1
111	1983-089 B	0.80215	0.99989	0.32539	0.26098	L1
112	1985-015 A	0.79797	0.99989	0.32669	0.26066	D
113	1984-031 A	0.61789	0.99985	0.41569	0.25681	L1
114	1989-030 A	0.66232	0.99988	0.38675	0.25612	L1
115	1982-031 A	0.78542	0.99982	0.32539	0.25552	L1

TABELLA B.4: Classifica generale completa, 116-160

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
116	1983-065 A	0.77575	0.99989	0.32886	0.25508	D
117	1985-048 C	0.75651	0.99989	0.33392	0.25259	D
118	1984-035 A	0.80921	0.99986	0.30715	0.24851	L1
119	1990-051 A	0.74230	0.99978	0.32813	0.24352	L1
120	2000-032 A	0.71146	0.99616	0.34188	0.24230	D
121	2007-018 A	1.00000	0.96916	0.24203	0.23456	L1
122	1988-081 A	0.78889	0.99993	0.29695	0.23424	L2
123	1981-096 A	0.82071	0.99988	0.28183	0.23127	D
124	1986-090 D	0.85129	0.99987	0.27097	0.23064	L1
125	1977-108 A	0.79588	0.99967	0.28732	0.22860	L1
126	1980-004 A	0.60221	0.99960	0.37828	0.22771	L2
127	1982-093 A	0.59071	0.99981	0.38457	0.22713	L1
128	1976-092 A	0.58444	0.99931	0.38675	0.22587	L1
129	1988-071 A	0.54392	0.99988	0.41026	0.22313	D
130	1981-114 A	0.67241	0.99989	0.32307	0.21721	D
131	1993-048 B	0.56837	0.99945	0.37994	0.21583	D
132	1972-041 A	0.71459	0.99974	0.29485	0.21064	D
133	1985-055 A	0.65212	0.99989	0.32148	0.20962	D
134	1991-003 A	0.55359	0.99982	0.37589	0.20806	D
135	1997-086 A	0.42964	0.98354	0.48805	0.20623	L2
136	1982-044 F	0.75846	0.99990	0.27097	0.20550	L3
137	1976-023 A	0.74753	0.99987	0.27488	0.20545	L2
138	1982-082 A	0.69093	0.99989	0.29485	0.20370	D
139	1994-069 D	0.73132	0.99985	0.27097	0.19814	D
140	1976-004 A	0.67879	0.99946	0.29123	0.19758	L2
141	1991-010 F	0.72688	0.99985	0.27097	0.19693	D
142	1982-009 A	0.50927	0.99983	0.38457	0.19582	D
143	1988-034 D	0.71538	0.99989	0.27097	0.19383	D
144	1988-091 D	0.59196	0.99990	0.32669	0.19337	D
145	1996-005 A	0.46288	0.99974	0.41026	0.18985	D
146	1988-034 A	0.45637	0.99988	0.41569	0.18968	D
147	1995-063 A	0.43546	0.99946	0.42293	0.18407	D
148	1990-054 D	0.66781	0.99988	0.27097	0.18094	D
149	2003-015 A	0.42271	0.99303	0.43016	0.18057	D
150	1993-069 D	0.66128	0.99984	0.27097	0.17916	D
151	1975-038 A	0.62887	0.99984	0.28255	0.17766	D
152	2010-005 A	0.37083	1.00000	0.47358	0.17562	I
153	1976-023 B	0.63409	0.99986	0.27488	0.17427	L2
154	2000-020 A	0.34646	0.99062	0.50744	0.17416	D
155	1984-078 F	0.64220	0.99986	0.27097	0.17399	L1
156	1992-017 A	0.42165	0.99987	0.41026	0.17296	D
157	1983-028 F	0.62641	0.99986	0.27097	0.16972	D
158	1987-022 A	0.43042	0.99989	0.39434	0.16971	D
159	1989-021 D	0.51736	0.99975	0.32669	0.16897	D
160	1987-091 D	0.61894	0.99987	0.27097	0.16769	D

TABELLA B.5: Classifica generale completa, 161-205

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
161	1990-112 D	0.60394	0.99988	0.27097	0.16363	D
162	1974-017 A	0.41819	0.99703	0.38675	0.16125	D
163	1984-049 A	0.53452	0.99985	0.29210	0.15611	D
164	1988-071 D	0.57310	0.99987	0.27097	0.15527	D
165	1979-015 A	0.40337	0.99968	0.38457	0.15508	L1
166	1976-073 A	0.43546	0.99984	0.35172	0.15314	D
167	1978-002 A	0.43546	0.99987	0.35136	0.15298	D
168	1990-061 D	0.55448	0.99989	0.27097	0.15023	D
169	1985-109 C	0.44535	0.99989	0.33313	0.14834	D
170	1977-092 A	0.38544	0.99953	0.38457	0.14816	L1
171	1999-047 B	0.43546	0.99789	0.34044	0.14793	D
172	1987-096 D	0.54498	0.99987	0.27097	0.14765	D
173	1992-027 A	0.43546	0.99594	0.33277	0.14432	D
174	1995-035 D	0.44062	0.99996	0.32669	0.14394	D
175	1994-067 A	0.33507	0.99949	0.42473	0.14224	D
176	1989-081 D	0.51682	0.99987	0.27097	0.14002	D
177	1984-101 A	0.42569	0.99988	0.32886	0.13998	D
178	1987-084 D	0.50163	0.99988	0.27097	0.13591	D
179	1989-041 B	0.44565	0.99985	0.30353	0.13525	D
180	1989-062 A	0.33380	0.99975	0.39659	0.13235	D
181	1982-110 C	0.40078	0.99990	0.32886	0.13179	D
182	1975-091 A	0.43546	0.99984	0.30172	0.13137	D
183	1983-030 A	0.40220	0.99990	0.32307	0.12992	D
184	1986-026 A	0.43546	0.99988	0.29695	0.12929	D
185	1984-016 F	0.47581	0.99985	0.27097	0.12891	L1
186	1972-003 A	0.43546	0.99981	0.29485	0.12837	D
187	1978-116 A	0.41468	0.99988	0.30860	0.12795	D
188	1985-102 D	0.47081	0.99985	0.27097	0.12756	D
189	1984-080 A	0.43546	0.99988	0.29130	0.12684	D
190	1985-048 D	0.43546	0.99987	0.28928	0.12595	D
191	1987-029 A	0.43546	0.99986	0.28921	0.12592	D
192	1995-067 B	0.31897	0.99898	0.39442	0.12568	D
193	1991-054 D	0.38103	0.99995	0.32669	0.12447	L3
194	1979-072 A	0.43546	0.99988	0.28356	0.12347	D
195	1974-075 A	0.43546	0.99983	0.28356	0.12346	D
196	1974-022 A	0.43546	0.99982	0.28356	0.12346	D
197	2000-082 A	0.29890	0.98691	0.40122	0.11835	D
198	1981-057 F	0.30577	0.99987	0.38675	0.11824	D
199	1976-042 A	0.33561	0.99985	0.35172	0.11802	D
200	1991-064 B	0.43324	0.99989	0.27097	0.11738	D
201	1974-093 A	0.39675	0.99985	0.29485	0.11696	D
202	1982-110 B	0.40159	0.99990	0.28183	0.11317	D
203	1980-091 A	0.39198	0.99989	0.28183	0.11046	D
204	1990-016 D	0.40599	0.99988	0.27097	0.11000	D
205	1995-063 D	0.40184	0.99984	0.27097	0.10887	L1

TABELLA B.6: Classifica generale completa, 206-250

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
206	1976-107 A	0.27960	0.99936	0.38457	0.10746	L1
207	1993-073 E	0.27558	0.99986	0.38675	0.10656	D
208	1996-040 B	0.85024	0.97776	0.12612	0.10485	L1
209	1989-041 A	0.23122	0.99990	0.44463	0.10280	D
210	1984-093 D	0.35044	0.99988	0.28928	0.10136	D
211	1996-044 A	0.26062	0.99883	0.38552	0.10036	D
212	1993-069 A	0.24426	0.99984	0.41026	0.10019	D
213	1992-072 A	0.20645	0.99944	0.45976	0.09486	D
214	1987-028 D	0.34873	0.99993	0.27097	0.09449	D
215	1984-022 F	0.34835	0.99993	0.27097	0.09439	D
216	1988-081 B	0.28044	0.99956	0.33168	0.09297	D
217	1983-118 F	0.34285	0.99984	0.27097	0.09289	D
218	1993-048 A	0.23051	0.99786	0.40078	0.09219	D
219	1990-091 B	0.26795	0.99858	0.34311	0.09181	D
220	1984-114 A	0.30178	0.99982	0.29210	0.08813	D
221	1973-023 A	0.29165	0.99982	0.28255	0.08239	D
222	1993-003 D	0.25214	0.99966	0.32669	0.08234	D
223	1990-094 D	0.30375	0.99987	0.27097	0.08230	D
224	1987-109 D	0.29813	0.99986	0.27097	0.08077	D
225	1997-049 E	0.20658	0.99954	0.38675	0.07986	D
226	1982-014 A	0.24287	0.99990	0.31960	0.07761	D
227	1997-078 A	0.15472	0.99863	0.49796	0.07694	D
228	1994-080 A	0.18660	0.99985	0.40122	0.07485	D
229	1992-059 D	0.27501	0.99988	0.27097	0.07451	D
230	1985-076 B	0.25164	0.99990	0.28942	0.07282	D
231	2001-014 C	0.16954	0.99890	0.42293	0.07162	D
232	1992-066 A	0.22852	0.99905	0.30353	0.06930	D
233	1999-047 A	0.20350	0.99964	0.34044	0.06925	D
234	1981-027 A	0.17177	0.99980	0.38675	0.06642	D
235	1988-109 A	0.18880	0.99990	0.33248	0.06277	D
236	1997-029 C	0.14022	0.99970	0.44463	0.06233	D
237	1978-062 D	0.15886	0.99983	0.38675	0.06143	D
238	1985-028 B	0.18475	0.99983	0.33161	0.06125	D
239	1976-010 A	0.19723	0.99985	0.30172	0.05950	D
240	2001-015 A	0.15969	0.99831	0.35346	0.05635	D
241	1969-069 C	0.14313	0.99689	0.38675	0.05518	D
242	2003-018 A	0.43546	0.90542	0.13205	0.05207	D
243	1989-052 A	0.12594	0.99989	0.41026	0.05166	D
244	1985-109 D	0.16183	0.99983	0.31591	0.05111	D
245	2001-014 A	0.17160	0.99863	0.29688	0.05087	D
246	1997-027 B	0.12959	0.99965	0.39246	0.05084	D
247	2004-011 A	0.10782	0.99619	0.46634	0.05009	D
248	1991-046 D	0.18240	0.99987	0.27097	0.04942	D
249	1975-117 A	0.17787	0.99986	0.27567	0.04903	D
250	1984-080 E	0.12428	0.99987	0.38675	0.04806	D

TABELLA B.7: Classifica generale completa, 251-295

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
251	1991-074 D	0.17570	0.99988	0.27097	0.04760	D
252	1988-018 A	0.15237	0.99965	0.29210	0.04449	D
253	1989-020 E	0.11300	0.99984	0.38675	0.04369	D
254	1994-002 D	0.15912	0.99988	0.27097	0.04311	D
255	1981-119 A	0.13205	0.99990	0.31526	0.04162	D
256	2006-053 C	0.21353	0.95143	0.20260	0.04116	D
257	1982-106 D	0.11947	0.99991	0.32669	0.03903	D
258	2003-021 A	0.26398	0.91713	0.15919	0.03854	D
259	1971-095 A	1.00000	0.99819	0.03763	0.03756	L2
260	1971-095 B	1.00000	0.99808	0.03763	0.03755	L3
261	1969-013 A	0.71668	0.97507	0.05282	0.03691	D
262	1997-041 A	0.08794	0.99967	0.41569	0.03654	L3
263	1991-015 E	0.09401	0.99983	0.38675	0.03635	D
264	1983-077 A	0.12424	0.99990	0.28928	0.03594	D
265	2011-038 A	0.08696	1.00000	0.40122	0.03489	I
266	2011-013 A	0.08669	1.00000	0.40122	0.03478	I
267	1986-026 B	0.10208	0.99984	0.32850	0.03353	D
268	1975-011 F	0.08417	0.99944	0.38675	0.03253	D
269	1981-076 A	0.11132	0.99986	0.28928	0.03220	D
270	1997-016 A	0.08616	0.99103	0.35491	0.03030	D
271	1992-043 A	0.07230	0.99987	0.41026	0.02966	D
272	1983-105 A	0.09382	0.99990	0.31526	0.02957	D
273	1996-058 D	1.00000	0.99981	0.02894	0.02894	L1
274	1985-016 F	0.10628	0.99989	0.27097	0.02880	D
275	2003-015 F	1.00000	0.99332	0.02894	0.02875	L1
276	1992-088 A	0.96001	0.99980	0.02894	0.02778	L1
277	2009-007 D	0.15755	0.96736	0.18090	0.02757	D
278	1981-102 F	0.92133	0.99979	0.02894	0.02666	D
279	1989-070 C	0.06805	0.99988	0.38675	0.02632	D
280	1995-011 D	0.06743	0.99979	0.38675	0.02607	D
281	1977-048 G	0.06670	0.99945	0.38675	0.02578	D
282	1982-103 E	0.87167	0.99981	0.02894	0.02522	D
283	1976-092 F	0.86461	0.99932	0.02894	0.02501	L1
284	1971-116 A	0.08272	0.99980	0.29485	0.02439	D
285	2009-018 A	0.16429	0.92827	0.15919	0.02428	L1
286	2000-002 A	0.05016	0.97611	0.49348	0.02416	D
287	2000-036 D	0.82724	0.99886	0.02894	0.02392	D
288	2011-073 A	0.05920	1.00000	0.40122	0.02375	I
289	1974-060 F	0.80032	0.99793	0.02894	0.02312	L1
290	2010-036 A	0.05731	1.00000	0.40122	0.02299	I
291	2000-029 B	0.05409	0.99886	0.42293	0.02285	D
292	1995-045 D	0.78307	0.99978	0.02894	0.02266	D
293	1967-111 A	0.87899	0.97085	0.02641	0.02254	L2
294	1995-054 D	0.77497	0.99969	0.02894	0.02242	L1
295	2004-043 D	0.76582	0.99618	0.02894	0.02208	D

TABELLA B.8: Classifica generale completa, 296-340

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
296	1975-100 F	0.05571	0.99867	0.38675	0.02152	D
297	1978-062 A	1.00000	0.99980	0.02127	0.02127	L2
298	1986-007 A	0.05493	0.99990	0.38675	0.02124	D
299	1982-004 A	0.06528	0.99990	0.32307	0.02109	D
300	2001-037 D	0.72792	0.99696	0.02894	0.02100	L1
301	1975-097 F	0.72008	0.99881	0.02894	0.02082	D
302	2010-068 A	0.05133	1.00000	0.40122	0.02059	I
303	1994-087 D	0.70910	0.99981	0.02894	0.02052	D
304	1966-110 A	0.86827	0.91077	0.02547	0.02014	D
305	2003-060 D	0.69029	0.99745	0.02894	0.01993	L1
306	1992-088 D	0.68532	0.99980	0.02894	0.01983	D
307	1975-123 F	0.68140	0.99889	0.02894	0.01970	D
308	1994-060 D	0.67356	0.99982	0.02894	0.01949	D
309	1992-021 A	0.04474	0.99942	0.40122	0.01794	D
310	2001-045 D	0.61345	0.99820	0.02894	0.01772	L1
311	2005-010 F	0.61057	0.99529	0.02894	0.01759	L1
312	1971-009 A	1.00000	0.99761	0.01758	0.01754	L2
313	1970-021 A	1.00000	0.99571	0.01758	0.01751	L2
314	1991-075 A	0.04474	0.99641	0.38023	0.01695	D
315	2004-010 F	0.58001	0.99518	0.02894	0.01671	D
316	1977-080 A	1.00000	0.99982	0.01592	0.01592	L1
317	1974-094 A	1.00000	0.99925	0.01585	0.01583	L1
318	1979-035 E	0.54104	0.99969	0.02894	0.01565	D
319	1998-025 D	0.53737	0.99921	0.02894	0.01554	D
320	1981-057 B	0.60408	0.99982	0.02533	0.01530	D
321	1989-020 A	0.04474	0.99982	0.33942	0.01518	D
322	1991-028 A	0.04474	0.99776	0.33971	0.01516	D
323	1976-066 A	0.70231	0.99984	0.02149	0.01509	D
324	1978-039 A	0.63279	0.99972	0.02352	0.01488	L1
325	1995-041 A	0.05071	0.99968	0.29348	0.01488	D
326	1985-015 B	0.04474	0.99989	0.32850	0.01469	D
327	2008-033 D	0.56902	0.88701	0.02894	0.01461	L1
328	2008-022 B	0.03386	0.99122	0.42293	0.01420	D
329	1986-003 B	0.04474	0.99984	0.31591	0.01413	D
330	1990-063 B	0.04474	0.99942	0.30353	0.01357	D
331	1992-017 D	0.04961	0.99986	0.27097	0.01344	D
332	1990-034 A	0.04474	0.99952	0.28906	0.01293	D
333	1985-109 B	0.04474	0.99974	0.28870	0.01291	D
334	1980-081 F	0.43729	0.99978	0.02894	0.01265	D
335	1997-040 A	0.02545	0.99982	0.48950	0.01246	D
336	2009-010 B	0.43677	0.93969	0.02894	0.01188	D
337	1985-048 B	0.04163	0.99989	0.27908	0.01162	D
338	1979-087 C	0.39390	0.99970	0.02894	0.01140	D
339	2004-015 D	0.38128	0.99699	0.02894	0.01100	D
340	2010-045 A	0.01977	1.00000	0.53870	0.01065	I

TABELLA B.9: Classifica generale completa, 341-385

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
341	1968-081 D	0.90800	0.98903	0.01179	0.01059	D
342	1969-101 A	0.60351	0.99391	0.01758	0.01055	L2
343	1983-047 A	0.03187	0.99991	0.31526	0.01005	D
344	1976-035 A	0.44514	0.99947	0.02243	0.00998	D
345	1970-032 A	0.92656	0.98307	0.01093	0.00995	L1
346	2000-013 D	0.34321	0.99949	0.02894	0.00993	D
347	1994-082 D	0.32587	0.99976	0.02894	0.00943	D
348	1977-018 A	0.43781	0.99986	0.02149	0.00941	D
349	1974-017 F	0.31854	0.99683	0.02894	0.00919	D
350	1975-077 A	0.55229	0.99948	0.01664	0.00919	D
351	2006-022 D	0.30634	0.99025	0.02894	0.00878	D
352	1997-002 B	0.02289	0.98394	0.37155	0.00837	D
353	1983-094 A	0.02533	0.99989	0.32307	0.00818	D
354	1988-036 E	0.02925	0.99985	0.27097	0.00793	D
355	1977-041 A	0.02574	0.99988	0.30172	0.00777	D
356	1988-051 C	0.02342	0.99938	0.33031	0.00773	D
357	1974-101 A	0.43546	0.99960	0.01664	0.00724	D
358	2011-001 B	0.07526	0.88046	0.10854	0.00719	D
359	2004-042 C	0.01570	0.99352	0.44463	0.00694	D
360	1990-079 B	0.01831	0.99973	0.37792	0.00692	D
361	2005-023 H	0.23630	0.99427	0.02894	0.00680	D
362	1984-031 F	0.02475	0.99988	0.27097	0.00671	D
363	1992-060 A	0.01618	0.99874	0.40078	0.00647	D
364	1992-074 D	0.02380	0.99984	0.27097	0.00645	D
365	1982-009 F	0.19305	0.99977	0.02894	0.00559	D
366	1997-019 A	0.01415	0.99419	0.39434	0.00555	D
367	1997-011 A	0.01058	0.99287	0.50541	0.00531	D
368	1977-014 A	0.56248	0.99970	0.00941	0.00529	D
369	1987-022 F	0.01363	0.99997	0.38675	0.00527	D
370	1987-095 A	0.01315	0.99989	0.39659	0.00522	D
371	1997-070 D	0.17172	0.99979	0.02894	0.00497	D
372	1980-074 A	0.01707	0.99987	0.28978	0.00494	D
373	1982-017 A	0.01564	0.99990	0.31526	0.00493	D
374	1978-068 A	0.01379	0.99989	0.35172	0.00485	D
375	1989-053 A	0.01108	0.99988	0.42980	0.00476	D
376	1991-055 A	0.01245	0.99655	0.38023	0.00472	D
377	1999-047 E	0.15775	0.99962	0.02894	0.00456	D
378	1996-007 A	0.01282	0.98921	0.35903	0.00455	D
379	1967-001 A	0.75301	0.97027	0.00622	0.00455	D
380	1982-058 A	0.01417	0.99991	0.31960	0.00453	D
381	1983-059 B	0.01357	0.99991	0.33161	0.00450	D
382	1996-033 A	0.04474	0.97155	0.10109	0.00439	D
383	1977-065 A	0.01485	0.99981	0.28884	0.00429	D
384	1975-042 A	0.01423	0.99987	0.29485	0.00419	D
385	1986-016 A	0.01441	0.99991	0.29101	0.00419	D

TABELLA B.10: Classifica generale completa, 386-430

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
386	1967-094 A	0.69787	0.94956	0.00622	0.00412	L2
387	2000-019 D	0.13929	0.99955	0.02894	0.00403	D
388	1992-013 A	0.01168	0.99607	0.34311	0.00399	D
389	1998-075 A	0.00810	0.97949	0.49311	0.00391	D
390	1967-026 A	0.61057	0.94689	0.00622	0.00360	L1
391	1968-081 A	0.24528	0.98379	0.01476	0.00356	D
392	1988-098 A	0.00833	0.99986	0.39659	0.00330	D
393	1997-065 C	0.14785	0.99976	0.02171	0.00321	D
394	1987-070 A	0.00992	0.99991	0.28183	0.00280	D
395	1990-001 B	0.00671	0.99942	0.40701	0.00273	D
396	1991-083 A	0.00717	0.99958	0.37792	0.00271	D
397	2007-058 C	0.00625	0.97860	0.42293	0.00259	D
398	1969-069 A	0.04074	0.99547	0.05941	0.00241	D
399	1997-071 A	0.02593	0.96699	0.09045	0.00227	D
400	1976-029 A	0.00725	0.99989	0.27567	0.00200	D
401	1968-081 G	0.13835	0.98552	0.01447	0.00197	D
402	1994-065 B	0.04474	0.93987	0.04551	0.00191	D
403	1965-028 A	1.00000	0.65562	0.00282	0.00185	L2
404	2003-053 E	0.06401	0.99771	0.02894	0.00185	D
405	1994-038 D	0.06023	0.99975	0.02894	0.00174	D
406	1974-039 C	0.46781	0.99903	0.00326	0.00152	D
407	2010-002 B	0.00847	0.94537	0.18090	0.00145	D
408	1981-061 F	0.04474	0.99973	0.02894	0.00129	D
409	1964-047 A	0.62521	0.72298	0.00282	0.00128	D
410	1997-041 D	0.04074	0.99972	0.02894	0.00118	D
411	2008-003 B	0.00230	0.97370	0.42293	0.00095	D
412	1983-100 F	0.03047	0.99979	0.02894	0.00088	D
413	1968-081 P	0.24440	0.98342	0.00362	0.00087	D
414	2000-031 D	0.02918	0.99945	0.02894	0.00084	D
415	1963-031 A	0.29352	1.00000	0.00282	0.00083	I
416	1983-016 F	0.02620	0.99976	0.02894	0.00076	D
417	1968-081 E	0.23611	0.98396	0.00326	0.00076	L2
418	1995-011 B	0.02574	0.99932	0.02496	0.00064	D
419	1976-023 F	0.19382	0.99972	0.00326	0.00063	D
420	1977-092 H	0.86461	0.99950	0.00072	0.00063	L1
421	1976-023 J	0.18544	0.99972	0.00326	0.00060	D
422	1983-006 A	0.02218	0.99989	0.02533	0.00056	D
423	1968-081 Z	0.15624	0.98615	0.00362	0.00056	D
424	1975-011 A	0.03111	0.99973	0.01758	0.00055	D
425	1985-024 D	0.01889	0.99982	0.02894	0.00055	D
426	1988-018 B	0.00172	0.99990	0.29196	0.00050	D
427	1977-092 K	0.67330	0.99951	0.00072	0.00049	D
428	1977-048 A	0.02276	0.99979	0.02127	0.00048	D
429	1977-092 J	0.66235	0.99956	0.00072	0.00048	D
430	1980-104 E	0.01644	0.99968	0.02894	0.00048	D

TABELLA B.11: Classifica generale completa, 431-475

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
431	1970-055 A	0.04732	0.89373	0.01093	0.00046	D
432	1993-015 A	0.00097	0.99998	0.44941	0.00044	D
433	1968-081 J	0.12042	0.98570	0.00362	0.00043	D
434	1984-090 F	0.01475	0.99980	0.02894	0.00043	D
435	1978-071 A	0.02133	0.99973	0.01983	0.00042	D
436	2004-015 A	0.00097	0.99209	0.42596	0.00041	D
437	1982-093 F	0.01363	0.99974	0.02894	0.00039	D
438	1968-081 M	0.10097	0.98797	0.00362	0.00036	D
439	1968-081 AE	0.09918	0.94293	0.00362	0.00034	D
440	2002-029 D	0.01054	0.99871	0.02894	0.00030	D
441	1986-038 D	0.01036	0.99982	0.02894	0.00030	D
442	1968-081 H	0.07594	0.98376	0.00362	0.00027	D
443	1968-081 R	0.07574	0.98173	0.00362	0.00027	D
444	1968-081 X	0.07519	0.95984	0.00362	0.00026	D
445	1968-081 N	0.07219	0.98581	0.00362	0.00026	D
446	1984-028 F	0.00880	0.99977	0.02894	0.00025	D
447	1968-081 AF	0.06998	0.96957	0.00362	0.00025	D
448	1968-081 W	0.06670	0.98855	0.00362	0.00024	D
449	1979-015 D	0.00737	0.99953	0.02894	0.00021	D
450	1968-081 Q	0.05544	0.99118	0.00362	0.00020	D
451	1969-013 B	0.05336	0.99176	0.00326	0.00017	D
452	1968-081 S	0.04586	0.99176	0.00362	0.00016	D
453	2006-053 D	0.22112	0.94945	0.00072	0.00015	L1
454	1977-034 C	0.04253	0.99996	0.00326	0.00014	D
455	1979-098 C	0.04023	0.99997	0.00326	0.00013	D
456	1990-063 A	0.00381	0.99976	0.02894	0.00011	D
457	1968-081 V	0.02845	0.99178	0.00362	0.00010	D
458	1968-081 L	0.01582	0.98277	0.00362	0.00006	D
459	2005-049 E	0.05627	0.98692	0.00072	0.00004	D
460	1968-081 AA	0.00760	0.98026	0.00362	0.00003	D
461	1995-016 B	0.00002	0.99274	0.37083	0.00001	D
462	1971-095 C	0.00174	0.99936	0.00326	0.00001	D
463	1968-081 T	0.00118	0.96788	0.00362	0.00000	D
464	1998-024 B	0.00000	0.89595	0.05232	0.00000	L1
465	2008-033 A	1.00000	0.89262	0.00000	0.00000	L1
466	2012-012 D	0.82802	0.31737	0.00000	0.00000	L3
467	1966-053 A	0.00000	0.78524	0.00340	0.00000	D
468	1966-053 B	0.00000	0.75934	0.00326	0.00000	D
469	1966-053 C	0.00000	0.77824	0.00326	0.00000	D
470	1966-053 D	0.00000	0.77249	0.00326	0.00000	D
471	1966-053 E	0.00000	0.74281	0.00326	0.00000	D
472	1966-053 F	0.00000	0.73842	0.00326	0.00000	D
473	1966-053 G	0.00000	0.72614	0.00326	0.00000	D
474	1966-053 H	0.00000	0.70282	0.00326	0.00000	D
475	1966-053 J	0.00000	0.72295	0.00492	0.00000	D

TABELLA B.12: Classifica generale completa, 476-520

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
476	1967-003 A	0.00000	0.73263	0.00326	0.00000	D
477	1967-003 B	0.00000	0.76583	0.00326	0.00000	D
478	1967-003 C	0.00000	0.76773	0.00326	0.00000	D
479	1967-003 D	0.00000	0.71772	0.00326	0.00000	D
480	1967-003 E	0.00000	0.70347	0.00326	0.00000	D
481	1967-003 F	0.00000	0.74386	0.00326	0.00000	D
482	1967-003 G	0.00000	0.65312	0.00326	0.00000	D
483	1967-003 H	0.00000	0.72306	0.00326	0.00000	D
484	1967-066 A	0.00000	0.97903	0.00326	0.00000	D
485	1967-066 B	0.00000	0.97604	0.00326	0.00000	D
486	1967-066 C	0.00000	0.97743	0.00326	0.00000	D
487	1967-066 D	0.00000	0.97955	0.00326	0.00000	D
488	1967-066 E	0.00000	0.97927	0.01404	0.00000	D
489	1967-066 F	0.00000	0.98141	0.00738	0.00000	D
490	1967-066 G	0.00000	0.98308	0.00492	0.00000	D
491	1968-050 A	0.00000	0.68084	0.00326	0.00000	D
492	1968-050 B	0.00000	0.65630	0.00326	0.00000	D
493	1968-050 C	0.00000	0.67956	0.00326	0.00000	D
494	1968-050 D	0.00000	0.64558	0.00326	0.00000	D
495	1968-050 E	0.00000	0.64450	0.00326	0.00000	D
496	1968-050 F	0.00000	0.69486	0.00326	0.00000	D
497	1968-050 G	0.00000	0.63357	0.00326	0.00000	D
498	1968-050 H	0.00000	0.62803	0.00326	0.00000	D
499	1968-050 J	0.00000	0.73493	0.00326	0.00000	D
500	1968-116 A	0.00000	0.99959	0.01093	0.00000	D
501	1969-045 A	0.00000	0.99962	0.01093	0.00000	D
502	1970-003 A	0.00000	0.99203	0.01093	0.00000	D
503	1971-006 A	0.00000	0.99958	0.29485	0.00000	D
504	1972-090 A	0.00000	0.99978	0.28255	0.00000	D
505	1973-058 A	0.00000	0.99985	0.34405	0.00000	D
506	1973-100 A	0.00000	0.99975	0.28298	0.00000	D
507	1973-100 B	0.00000	0.99965	0.28298	0.00000	D
508	1973-100 D	0.00000	0.99989	0.00326	0.00000	D
509	1974-033 A	0.00000	0.99963	0.01643	0.00000	D
510	1974-039 A	0.00000	0.99842	0.30932	0.00000	D
511	1976-017 A	0.00000	0.99970	0.02619	0.00000	D
512	1976-053 A	0.00000	0.99989	0.02619	0.00000	D
513	1976-101 A	0.00000	0.99954	0.02619	0.00000	D
514	1977-005 A	0.00000	0.99987	0.29275	0.00000	D
515	1977-034 A	0.00000	0.99993	0.28298	0.00000	D
516	1977-034 B	0.00000	0.99994	0.28298	0.00000	D
517	1977-118 A	0.00000	0.99986	0.02533	0.00000	D
518	1978-044 A	0.00000	0.99987	0.27423	0.00000	D
519	1978-106 A	0.00000	0.99987	0.29413	0.00000	D
520	1978-113 A	0.00000	0.99996	0.28183	0.00000	D

TABELLA B.13: Classifica generale completa, 521-565

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
521	1978-113 B	0.00000	0.99989	0.28183	0.00000	D
522	1978-113 D	0.00000	0.99998	0.00326	0.00000	D
523	1979-007 A	0.00000	1.00000	0.26685	0.00000	D
524	1979-038 A	0.00000	0.99986	0.37828	0.00000	D
525	1976-107 F	0.00000	0.99898	0.02894	0.00000	D
526	1977-071 F	0.00000	0.99979	0.02894	0.00000	D
527	1977-092 G	0.00000	0.99931	0.02894	0.00000	D
528	1979-098 A	0.00000	0.99995	0.28624	0.00000	D
529	1979-098 B	0.00000	0.99989	0.28624	0.00000	D
530	1979-105 E	0.00000	0.99985	0.27097	0.00000	D
531	1980-016 D	0.00000	0.99988	0.27097	0.00000	D
532	1980-049 A	0.00000	0.99986	0.41026	0.00000	D
533	1980-049 F	0.00000	0.99989	0.27097	0.00000	D
534	1978-073 F	0.00000	0.99985	0.27097	0.00000	D
535	1980-098 A	0.00000	0.99990	0.31526	0.00000	D
536	1981-050 A	0.00000	0.99990	0.31526	0.00000	D
537	1981-057 A	0.00000	0.99990	0.28732	0.00000	D
538	1981-073 A	0.00000	0.99999	0.37828	0.00000	D
539	1981-069 F	0.00000	0.99990	0.27097	0.00000	D
540	1981-122 A	0.00000	0.99993	0.31873	0.00000	D
541	1982-020 A	0.00000	0.99990	0.41026	0.00000	D
542	1982-097 A	0.00000	0.99991	0.31526	0.00000	D
543	1982-106 A	0.00000	0.99995	0.28624	0.00000	D
544	1982-113 A	0.00000	0.99990	0.38675	0.00000	D
545	1976-023 K	0.00000	0.99960	0.31439	0.00000	D
546	1983-016 A	0.00000	0.99996	0.38457	0.00000	D
547	1982-020 F	0.00000	0.99991	0.27097	0.00000	D
548	1977-108 D	0.00000	0.99986	0.38675	0.00000	D
549	1982-113 F	0.00000	0.99991	0.27097	0.00000	D
550	1983-026 B	0.00000	0.99978	0.40614	0.00000	D
551	1979-062 D	0.00000	0.99988	0.27097	0.00000	D
552	1983-058 A	0.00000	0.99991	0.32582	0.00000	D
553	1983-066 A	0.00000	0.99990	0.41026	0.00000	D
554	1980-060 F	0.00000	0.99964	0.02894	0.00000	D
555	1981-027 F	0.00000	0.99991	0.27097	0.00000	D
556	1983-081 A	0.00000	0.99991	0.26735	0.00000	D
557	1983-088 A	0.00000	0.99991	0.38675	0.00000	D
558	1983-088 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
559	1983-118 A	0.00000	0.99990	0.41026	0.00000	D
560	1984-005 A	0.00000	0.99991	0.29051	0.00000	D
561	1984-023 A	0.00000	0.99993	0.31526	0.00000	D
562	1984-028 A	0.00000	0.99995	0.38457	0.00000	D
563	1984-041 D	0.00000	0.99990	0.27097	0.00000	D
564	1983-066 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
565	1984-081 A	0.00000	0.99991	0.32582	0.00000	D

TABELLA B.14: Classifica generale completa, 566-610

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
566	1984-081 B	0.00000	0.99992	0.29196	0.00000	D
567	1984-090 A	0.00000	0.99995	0.38457	0.00000	D
568	1984-093 B	0.00000	0.99989	0.32285	0.00000	D
569	1984-093 C	0.00000	0.99996	0.34246	0.00000	D
570	1984-113 B	0.00000	0.99989	0.32162	0.00000	D
571	1984-113 C	0.00000	0.99979	0.34246	0.00000	D
572	1984-114 B	0.00000	0.99996	0.31873	0.00000	D
573	1984-115 A	0.00000	0.99977	0.02315	0.00000	D
574	1985-007 D	0.00000	0.99972	0.02894	0.00000	D
575	1985-024 A	0.00000	0.99996	0.38457	0.00000	D
576	1985-025 A	0.00000	0.99991	0.32148	0.00000	D
577	1985-028 C	0.00000	0.99998	0.34246	0.00000	D
578	1984-063 F	0.00000	0.99969	0.02894	0.00000	D
579	1985-070 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
580	1985-076 D	0.00000	0.99979	0.34246	0.00000	D
581	1985-087 A	0.00000	0.99990	0.32148	0.00000	D
582	1985-107 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
583	1986-027 F	0.00000	0.99995	0.27097	0.00000	D
584	1986-038 A	0.00000	0.99994	0.38457	0.00000	D
585	1986-044 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
586	1986-007 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
587	1986-082 A	0.00000	0.99991	0.38675	0.00000	D
588	1986-082 F	0.00000	0.99993	0.27097	0.00000	D
589	1986-090 A	0.00000	0.99994	0.41026	0.00000	D
590	1987-028 A	0.00000	0.99997	0.38675	0.00000	D
591	1987-040 A	0.00000	0.99993	0.41026	0.00000	D
592	1987-040 D	0.00000	0.99976	0.02894	0.00000	D
593	1987-073 A	0.00000	0.99994	0.38457	0.00000	D
594	1987-073 D	0.00000	0.99984	0.27097	0.00000	D
595	1987-078 A	0.00000	0.99982	0.32850	0.00000	D
596	1987-078 B	0.00000	0.99990	0.32582	0.00000	D
597	1987-100 D	0.00000	0.99983	0.02894	0.00000	D
598	1987-109 A	0.00000	0.99995	0.38675	0.00000	D
599	1988-012 A	0.00000	0.99988	0.28183	0.00000	D
600	1988-028 A	0.00000	0.99994	0.41026	0.00000	D
601	1988-028 D	0.00000	0.99994	0.27097	0.00000	D
602	1988-036 A	0.00000	0.99996	0.38457	0.00000	D
603	1988-040 A	0.00000	0.99988	0.32148	0.00000	D
604	1988-051 A	0.00000	0.99993	0.28725	0.00000	D
605	1988-063 B	0.00000	0.99991	0.32582	0.00000	D
606	1988-066 D	0.00000	0.99991	0.27097	0.00000	D
607	1988-086 A	0.00000	0.99982	0.28183	0.00000	D
608	1988-108 A	0.00000	0.99994	0.38675	0.00000	D
609	1988-108 D	0.00000	0.99987	0.27097	0.00000	D
610	1988-109 B	0.00000	0.99939	0.37350	0.00000	D

TABELLA B.15: Classifica generale completa, 611-655

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
611	1989-004 A	0.00000	0.99990	0.41026	0.00000	D
612	1989-006 A	0.00000	0.99981	0.32148	0.00000	D
613	1989-004 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
614	1988-095 F	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
615	1989-020 B	0.00000	0.99992	0.02287	0.00000	D
616	1989-021 B	0.00000	0.99948	0.40614	0.00000	D
617	1989-027 A	0.00000	0.99984	0.31800	0.00000	D
618	1989-030 D	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
619	1989-048 A	0.00000	0.99991	0.40845	0.00000	D
620	1989-048 D	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
621	1989-052 D	0.00000	0.99981	0.02894	0.00000	D
622	1989-067 A	0.00000	0.99963	0.28978	0.00000	D
623	1989-070 A	0.00000	0.99991	0.02381	0.00000	D
624	1989-087 A	0.00000	0.99909	0.38023	0.00000	D
625	1989-098 D	0.00000	0.99993	0.27097	0.00000	D
626	1989-101 D	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
627	1990-001 A	0.00000	0.99963	0.33248	0.00000	D
628	1990-030 A	0.00000	0.99970	0.34637	0.00000	D
629	1990-056 A	0.00000	0.99898	0.38023	0.00000	D
630	1990-074 A	0.00000	0.99923	0.29116	0.00000	D
631	1990-077 A	0.00000	0.99982	0.28183	0.00000	D
632	1990-091 A	0.00000	0.98406	0.10854	0.00000	D
633	1990-100 A	0.00000	0.99698	0.04935	0.00000	D
634	1990-100 B	0.00000	0.99879	0.29695	0.00000	D
635	1990-116 D	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
636	1990-102 D	0.00000	0.99992	0.27097	0.00000	D
637	1991-001 A	0.00000	0.99955	0.34579	0.00000	D
638	1991-003 B	0.00000	0.99961	0.37792	0.00000	D
639	1991-014 D	0.00000	0.99986	0.27097	0.00000	D
640	1991-015 A	0.00000	0.99423	0.43139	0.00000	D
641	1991-015 B	0.00000	0.99986	0.02287	0.00000	D
642	1991-026 A	0.00000	0.99830	0.45744	0.00000	D
643	1991-037 A	0.00000	0.99938	0.29138	0.00000	D
644	1991-046 A	0.00000	0.99990	0.41026	0.00000	D
645	1989-101 G	0.00000	0.99992	0.00724	0.00000	D
646	1991-060 A	0.00000	0.99951	0.28183	0.00000	D
647	1991-067 A	0.00000	0.99836	0.45744	0.00000	D
648	1991-074 A	0.00000	0.99990	0.41026	0.00000	D
649	1991-079 D	0.00000	0.99990	0.27097	0.00000	D
650	1991-084 A	0.00000	0.99927	0.34188	0.00000	D
651	1991-084 B	0.00000	0.99839	0.33682	0.00000	D
652	1991-087 D	0.00000	0.99991	0.27097	0.00000	D
653	1992-010 A	0.00000	0.99927	0.44463	0.00000	D
654	1992-010 B	0.00000	0.99865	0.34044	0.00000	D
655	1992-021 B	0.00000	0.99507	0.33682	0.00000	D

TABELLA B.16: Classifica generale completa, 656-700

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
656	1992-032 A	0.00000	0.99898	0.44724	0.00000	D
657	1992-041 B	0.00000	0.99940	0.37792	0.00000	D
658	1992-043 D	0.00000	0.99990	0.27097	0.00000	D
659	1992-054 A	0.00000	0.99136	0.36207	0.00000	D
660	1992-057 A	0.00000	0.99716	0.04935	0.00000	D
661	1992-060 B	0.00000	0.99650	0.04935	0.00000	D
662	1992-082 D	0.00000	0.99990	0.27097	0.00000	D
663	1992-084 A	0.00000	0.99161	0.44463	0.00000	D
664	1993-013 D	0.00000	0.99990	0.27097	0.00000	D
665	1993-072 D	0.00000	0.99977	0.02894	0.00000	D
666	1993-073 B	0.00000	0.99955	0.29297	0.00000	D
667	1993-078 A	0.00000	0.96990	0.12496	0.00000	D
668	1993-078 B	0.00000	0.96272	0.04551	0.00000	D
669	1994-008 D	0.00000	0.99988	0.27097	0.00000	D
670	1994-012 D	0.00000	0.99987	0.27097	0.00000	D
671	1994-013 A	0.00000	0.99240	0.34311	0.00000	D
672	1994-022 A	0.00000	0.99836	0.39434	0.00000	D
673	1994-030 D	0.00000	0.99974	0.02894	0.00000	D
674	1994-040 A	0.00000	0.96901	0.45332	0.00000	D
675	1994-040 B	0.00000	0.99506	0.32958	0.00000	D
676	1994-047 A	0.00000	0.98899	0.36699	0.00000	D
677	1994-049 A	0.00000	0.98769	0.07612	0.00000	D
678	1994-049 B	0.00000	0.99710	0.36815	0.00000	D
679	1994-079 A	0.00000	0.99719	0.41287	0.00000	D
680	1995-001 A	0.00000	0.95838	0.50939	0.00000	D
681	1995-013 A	0.00000	0.94983	0.24203	0.00000	D
682	1995-025 A	0.00000	0.99785	0.39434	0.00000	D
683	1995-029 A	0.00000	0.96296	0.12496	0.00000	D
684	1995-040 A	0.00000	0.94456	0.21129	0.00000	D
685	1995-043 A	0.00000	0.99550	0.37524	0.00000	D
686	1995-044 A	0.00000	0.99399	0.35903	0.00000	D
687	1995-064 A	0.01543	0.91533	0.00000	0.00000	D
688	1995-067 A	0.00000	0.99777	0.40722	0.00000	D
689	1996-002 A	0.00000	0.95357	0.21129	0.00000	D
690	1996-005 D	0.00000	0.99981	0.02894	0.00000	D
691	1996-006 A	0.04926	0.85276	0.00000	0.00000	D
692	1996-030 B	0.00000	0.97516	0.06954	0.00000	D
693	1996-034 D	0.00000	0.99979	0.02894	0.00000	D
694	1996-040 A	0.00000	0.99891	0.42293	0.00000	D
695	1996-044 B	0.00000	0.99174	0.40122	0.00000	D
696	1997-016 B	0.00000	0.91660	0.05232	0.00000	D
697	1997-029 A	0.00000	0.99962	0.34188	0.00000	D
698	1997-031 A	0.00000	0.90722	0.00000	0.00000	D
699	1997-049 A	0.00000	0.96219	0.45187	0.00000	D
700	1997-062 A	0.00963	0.81657	0.00000	0.00000	D

TABELLA B.17: Classifica generale completa, 701-734

RANK	COSPAR	R_t	R_v	R_m	R_f	CLASSE
701	1998-002 A	0.00000	0.99749	0.35057	0.00000	D
702	1998-028 A	0.00000	0.97298	0.49369	0.00000	D
703	1996-053 D	0.00000	0.99961	0.02894	0.00000	D
704	1998-056 A	0.00000	0.94409	0.13097	0.00000	D
705	1999-010 D	0.00000	0.99976	0.02894	0.00000	D
706	1999-016 A	0.17136	0.92306	0.00000	0.00000	D
707	1999-050 A	0.00000	0.96019	0.50266	0.00000	D
708	2000-003 A	0.00000	0.97732	0.40918	0.00000	D
709	2000-016 B	0.13717	0.85781	0.00000	0.00000	D
710	2000-022 A	0.00000	0.89647	0.00000	0.00000	D
711	2000-031 A	0.00000	0.97616	0.42293	0.00000	D
712	2000-049 D	0.00000	0.99898	0.02894	0.00000	D
713	2000-052 A	0.00000	0.88439	0.00000	0.00000	D
714	2000-066 A	0.00000	0.97931	0.61164	0.00000	D
715	2000-069 A	0.00000	0.97594	0.40122	0.00000	D
716	2001-011 B	0.00000	0.82930	0.00000	0.00000	D
717	2001-045 A	0.00000	0.99842	0.40845	0.00000	D
718	2004-001 A	0.00000	0.88031	0.00000	0.00000	D
719	2004-036 A	0.00000	0.91649	0.05933	0.00000	D
720	1979-007 C	0.00000	0.99999	0.38675	0.00000	D
721	2006-022 A	0.00000	0.95798	0.07902	0.00000	D
722	2006-048 A	0.00000	0.96019	0.24203	0.00000	D
723	2005-049 F	0.00000	0.98425	0.00072	0.00000	D
724	2007-003 A	0.18245	0.53259	0.00000	0.00000	D
725	2007-063 A	0.00000	0.91460	0.00000	0.00000	D
726	2008-066 C	0.00000	0.80999	0.00000	0.00000	D
727	1968-081 K	0.00000	0.98394	0.00362	0.00000	D
728	2008-006 C	0.00000	0.98683	0.42293	0.00000	D
729	2011-048 B	0.04045	0.83433	0.00000	0.00000	D
730	2012-002 C	0.28910	0.35821	0.00000	0.00000	D
731	1968-081 U	0.00000	0.98348	0.00362	0.00000	D
732	1968-081 Y	0.00000	0.95878	0.14110	0.00000	D
733	1968-081 AD	0.00000	0.97021	0.00362	0.00000	D
734	1978-012 A	0.00000	1.00000	0.29065	0.00000	I

Bibliografia

- [1] Paul V. Anderson e Hanspeter Schaub. “Conjunctions Challenges of Low-Thrust Geosynchronous Debris Removal Maneuvers”. 2015.
- [2] Paul V. Anderson e Hanspeter Schaub. “Methodology For Characterizing High-Risk Orbital Debris In The Geosynchronous Orbit Regime”. 2015.
- [3] B. A. Archinal et al. “Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009”. 2010.
- [4] G. Baù, C. Bombardelli e J. Pelàez. “A new set of integrals of motion to propagate the perturbed two-body problem”. In: *Celest Mech Dyn Astr* (2013).
- [5] C. Bombardelli e J. Pelàez. “Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal”. In: *Journal of Guidance, Control and Dynamics* (2011).
- [6] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. *IADC Space Debris Mitigation Guidelines*. 2007.
- [7] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. *Support to the IADC Space Debris Mitigation Guidelines*. 2014.
- [8] *Encyclopedia Astronautica*. 2015. URL: <http://www.astronautix.com>.
- [9] ESA. *European Code of Conduct for Space Debris Mitigation*. 2004.
- [10] ESOC. *Classification of Geosynchronous Objects*. 2013.
- [11] Larry J. Friesen, Donald J. Kessler e Herbert A. Zook. “Reduced Debris Hazard Resulting from a Stable Inclined Geosynchronous Orbit”. In: *Adv. Space Res.* 13.8 (1993), pp. 231–241.
- [12] Larry J. Friesen et al. “Analysis of Orbital Perturbations Acting on Objects in Orbits Near Geosynchronous Earth Orbit”. In: *Journal of Geophysical Research* 97.E3 (1992), pp. 3845–3863.
- [13] Otis S. Jr Graf. “Lunar and Solar Perturbations on the Orbit of a Geosynchronous Satellite”. 1975.

-
- [14] Heiner Klinkgrad. *Space Debris, Models and Risk Analysis*. 2006.
- [15] Gunter Dirk Krebs. *Gunter's Space Page*. 2015. URL: <http://space.skyrocket.de/>.
- [16] Oliver Montenbruck e Eberhard Gill. *Satellite Orbits, Models Methods Applications*. 2000.
- [17] NASA. *Definition of Two-line Element Set Coordinate System*. 2011. URL: http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/tle_def.html.
- [18] NASA. *Space-Track*. 2011. URL: <https://www.space-track.org/>.
- [19] Aaron J. Rosengren, Daniel J. Scheeres e Jay W. McMahon. "The Classical Laplace Plane and its use as a Stable Disposal Orbit for GEO". In: (2013).
- [20] A. E. Roy. *Orbital Motion*. 2005.
- [21] *Satellite Tracking, Prediction and Informations about Objects in the Sky*. 2010. URL: <http://www.infosatellites.com>.
- [22] *Union of Concerned Scientists*. 2015. URL: <http://www.ucsusa.org/>.
- [23] David A. Vallado. *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*. 2001.