

The background of the slide is a detailed illustration of a space debris field in Low Earth Orbit (LEO). It shows a dense collection of satellites, fragments, and other objects against the backdrop of the Earth's blue and white horizon. The debris is scattered across the right and top portions of the image.

# Superlotação em LEO: Síndrome de Kessler e "Crash Clock"

Da previsão de 1978 ao alarme de 2026

---

WALRO RUSSO  
UNION ENGENHARIA DE TELEMÁTICA

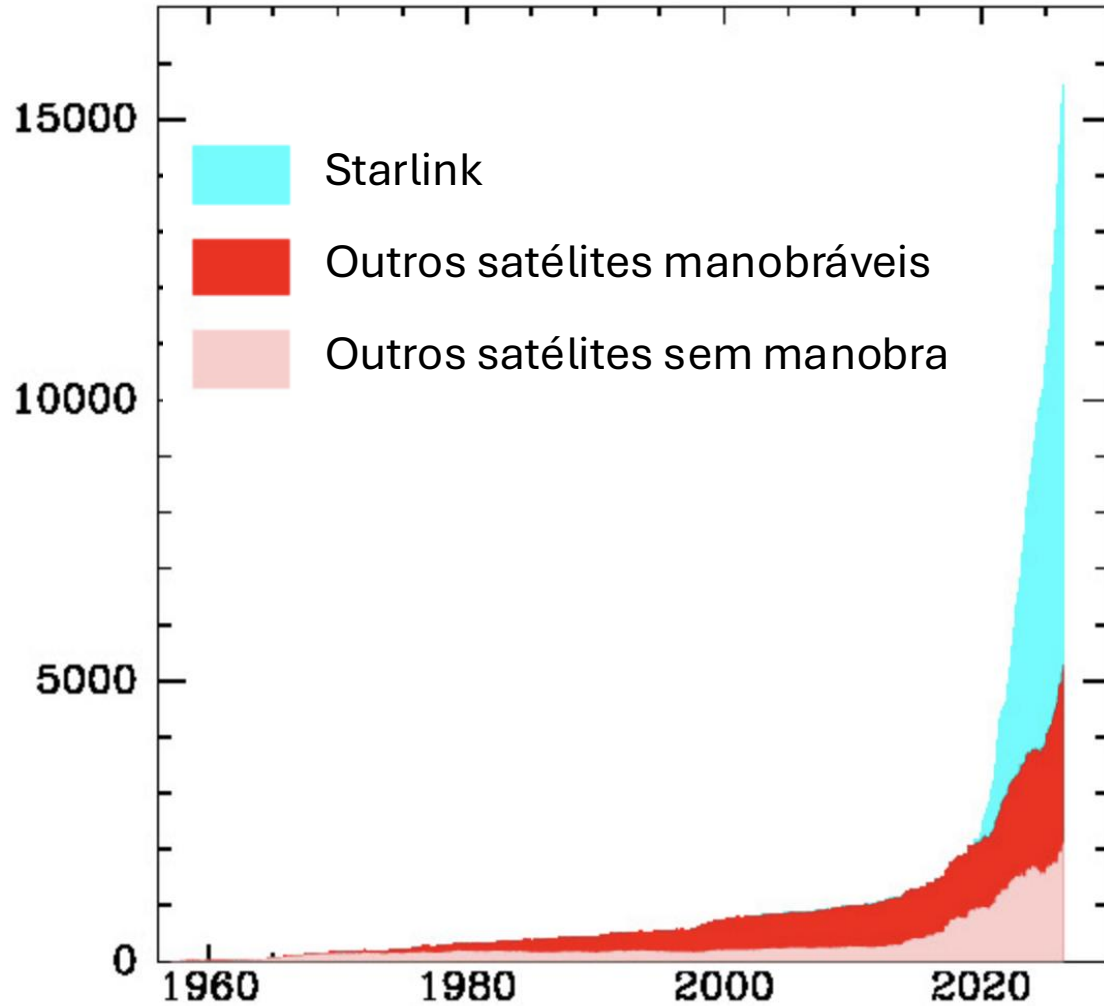
I SSPI DAY de 2026



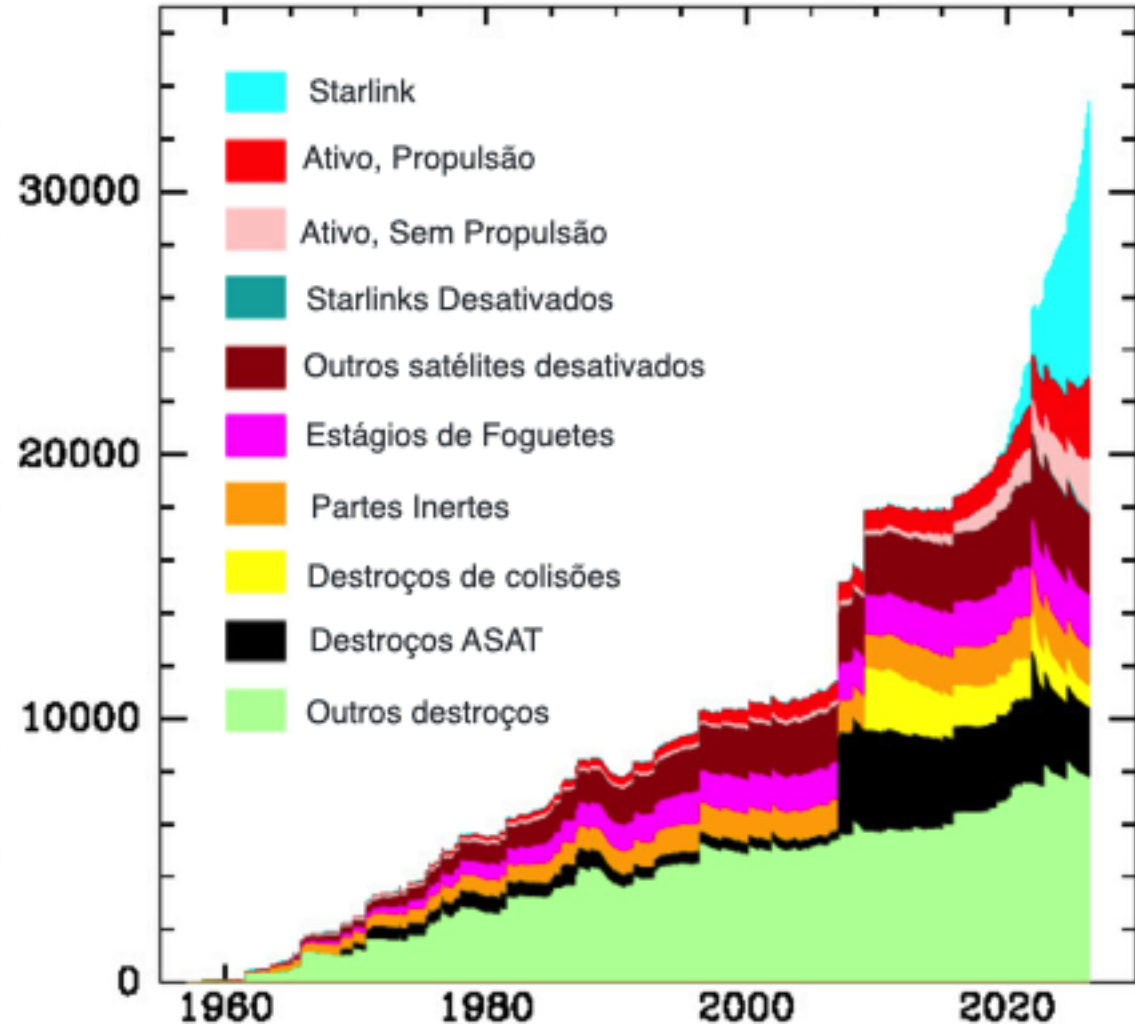
# O Problema: Crescimento Descontrolado

Massa em órbita: +63% em apenas 5 anos (2020 – 2025)

Satélites Ativos em Orbita da Terra



Objetos espaciais em Orbita da Terra



# E mais problema – Crescimento exponencial

## Constelação planejada enorme (Total planejado $N > 1000$ )

- Total de constelações planejadas: **34**
- Total de satélites planejados: **1.916.629**
- Total de constelações com pelo menos um satélite lançado: **11**
- Total de satélites lançados em todas as constelações: **11.987**
- Total lançado de satélites em camadas operacionais da constelação: **10.479**

## Grandes constelações LEO existentes e planejadas (esperado de $50 < N < 1000$ )

Total de constelações planejadas: **45**

Total de satélites planejados: **8.555**

Total de constelações com pelo menos um satélite lançado: **36**

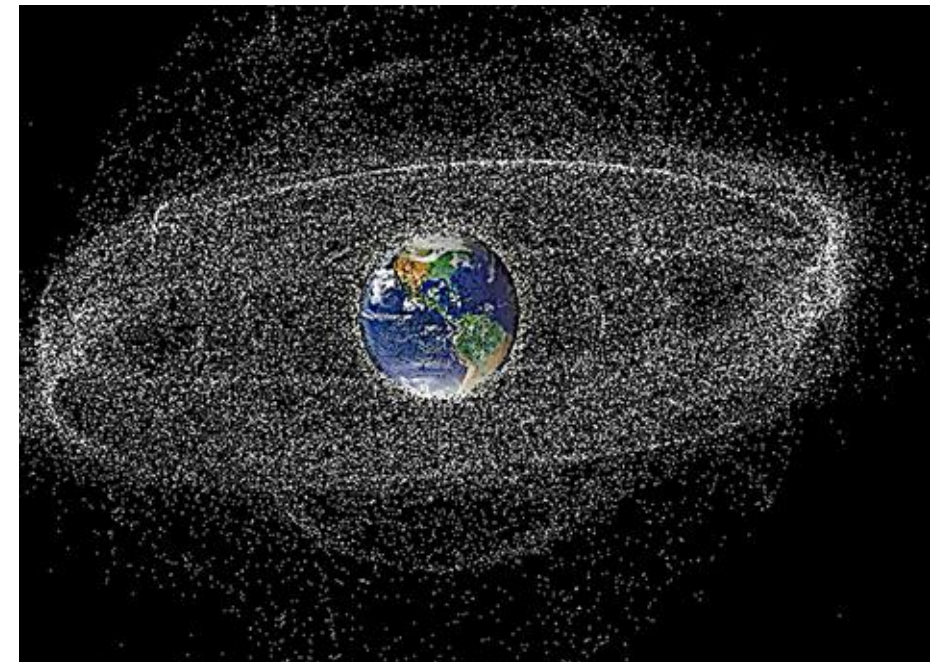
Total de satélites lançados em todas as constelações: **1.984**

Total lançado de satélites em camadas operacionais da constelação: **767**

**Massa em órbita: +63% em apenas 5 anos (2020 – 2025)**

*Atualizado: 16 de maio de 2026*

*Fonte: Jonathan's Space Report de Jonathan McDowell*

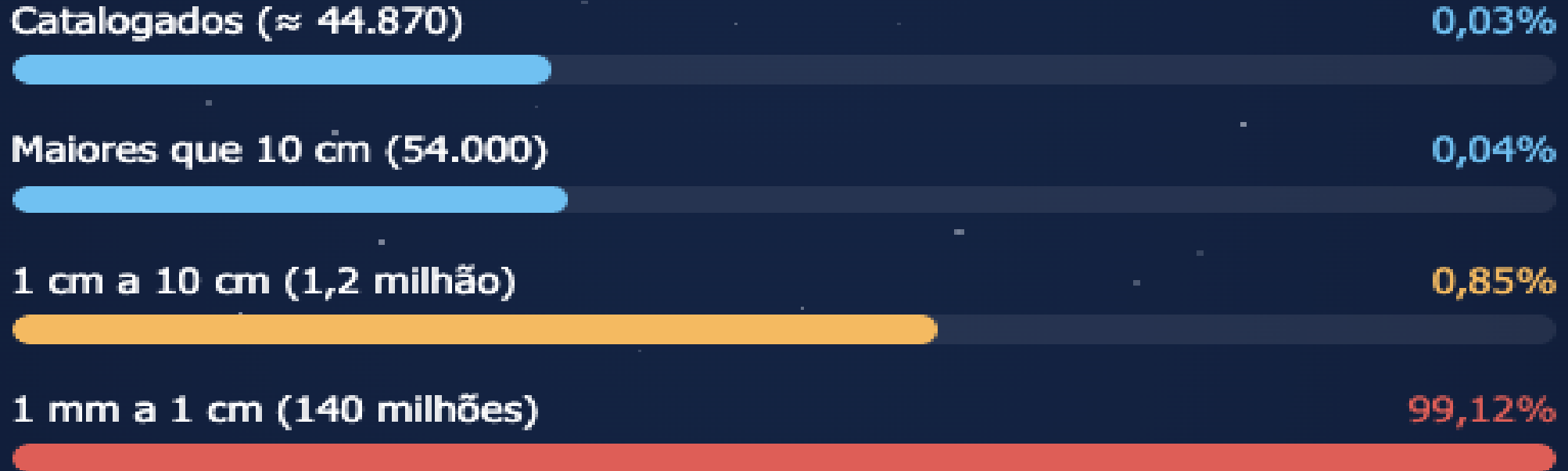


# Previsões da ESA:



Estimativas Estatísticas — Modelo MASTER-8

## Objetos em órbita terrestre



**⚠ Observação:** apesar de minúsculos, os fragmentos de 1 mm a 1 cm representam mais de 99% de todos os detritos e podem causar danos significativos a satélites em razão da alta velocidade orbital (~28.000 km/h).

# Objetos em Órbita da Terra - Tempo de Decaimento Orbital



> 1000 km	> 1000 Anos
< 800 km	< 100 Anos
< 600 km	< 25 Anos
< 400 km	< 1 Ano

# A consequência - Síndrome de Kessler

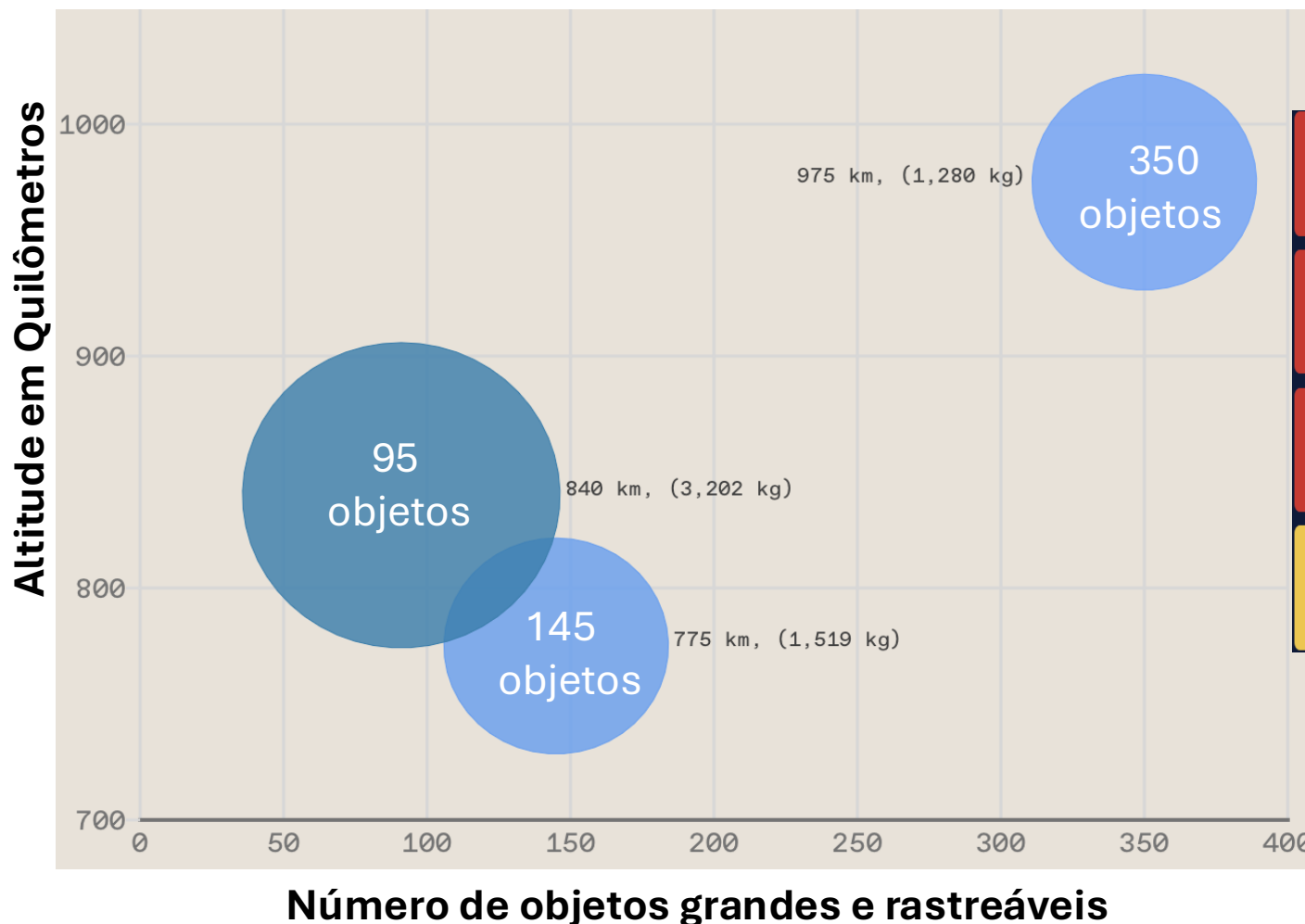
*A reação em cadeia que transforma órbita em campo minado*



*A previsão se cumpriu — apenas 12 anos depois do prazo*

# Estado atual: As Quatro Ondas da Síndrome de Kessler e onde estamos

Não é mais previsão: a Síndrome de Kessler já começou



1	Detritos × Defuntos	EM ANDAMENTO
2	Detritos × Ativos	EM ANDAMENTO
3	Rastreáveis × Rastreáveis	EM ANDAMENTO
4	Cascata massiva	AINDA NÃO

Faixa crítica: 520 – 1.000 km | Altitudes mais perigosas: 775, 840 e 975 km

# Caminho de Mitigação – Quatro frentes, uma única órbita

*Não há solução única – as frentes são complementares*



## TECNOLOGIA

Remoção ativa de detritos  
(Astroscale, ClearSpace-1)  
IA para gestão de tráfego



## REGULAÇÃO

Limites por altitude  
Banimento de testes ASAT  
Controle de tráfego espacial



## CONCEITO

Capacidade de carga  
Órbita como recurso finito  
(Moriba Jah • MOCAT-3)



## DIREITO

Revisão dos tratados  
de 1967 e 1972  
Governança global vinculante

# A métrica do alarme: CRASH Clock

Tempo até a primeira colisão se todas as manobras cessassem



***"Não é colapso instantâneo. É degradação contínua."***

A Starlink realizou 144.404 manobras entre dezembro/2024 e maio/2025 — cerca de uma a cada 1,8 minuto.

A tempestade solar de Gannon (maio/2024) causou incertezas posicionais de vários quilômetros e levou metade dos satélites ativos a manobrar simultaneamente.

Uma tempestade do tipo Carrington (1859, ao menos duas vezes mais intensa) seria devastadora.

# Síntese: Convergência de quase 50 anos

Cinco estudos independentes, um mesmo diagnóstico



**MITIGAÇÃO**  
Reduzir geração de novos detritos

**REMOÇÃO ATIVA**  
Industrializar a limpeza orbital

**GOVERNANÇA**  
Tratados internacionais

**Teto teórico: 12,6 milhões de satélites • Teto operacional: já está sendo testado hoje**

# Perguntas?

*"Era previsível, e foi previsto."*  
— Donald J. Kessler

Waldo Russo – [waldo.russo@union.eng.br](mailto:waldo.russo@union.eng.br)