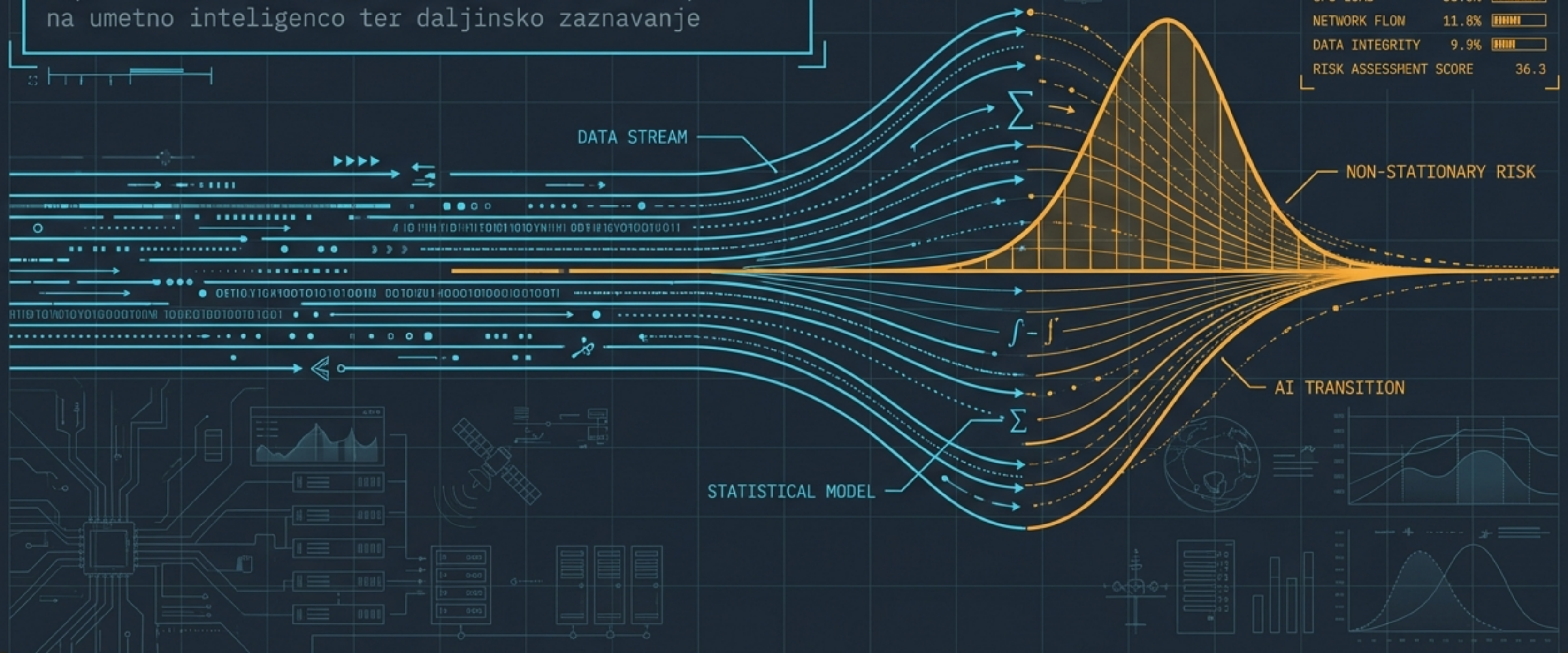


Inženiring suše: Ocena tveganj v nestacionarnem svetu

Odповed stacionarnih statističnih modelov in prehod na umetno inteligenco ter daljinsko zaznavanje

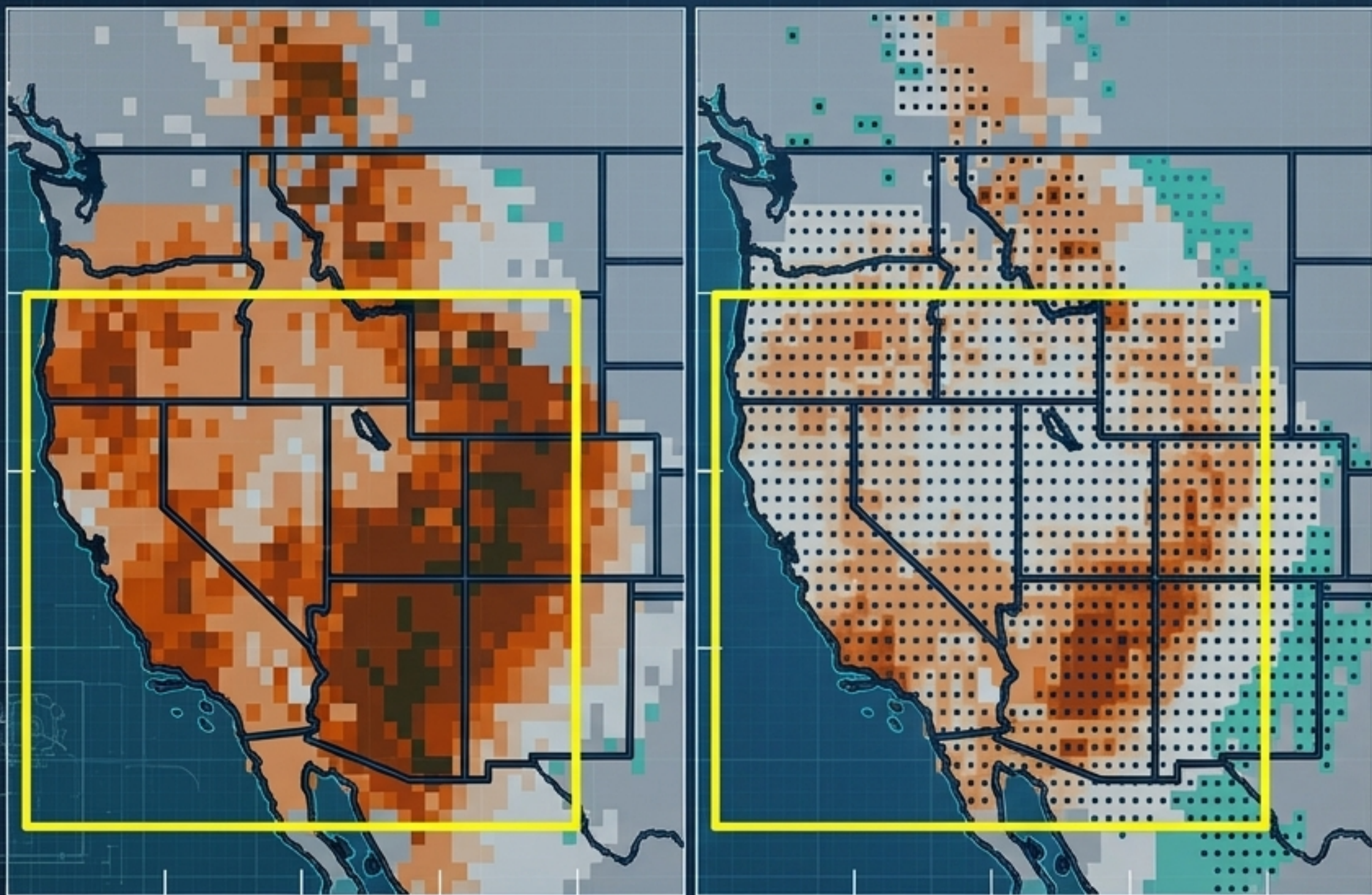
STATUS: ONLINE ■
SISTEMSKA ANALIZA

CPU LOAD 33.5%
NETWORK FLOW 11.8%
DATA INTEGRITY 9.9%
RISK ASSESSMENT SCORE 36.3



Opazovano
(Z antropogenim vplivom)

Simulacija brez antropogenega vpliva (ACC)



Odpoved stacionarnosti: Krah zgodovinskih referenčnih točk

Sistem pod stresom

Zahod ZDA se nahaja v prvi večdesetletni "megasuši" v celotni zgodovini meritev in najhujši v zadnjih 1200 letih.

Antropogeni pospeševalnik

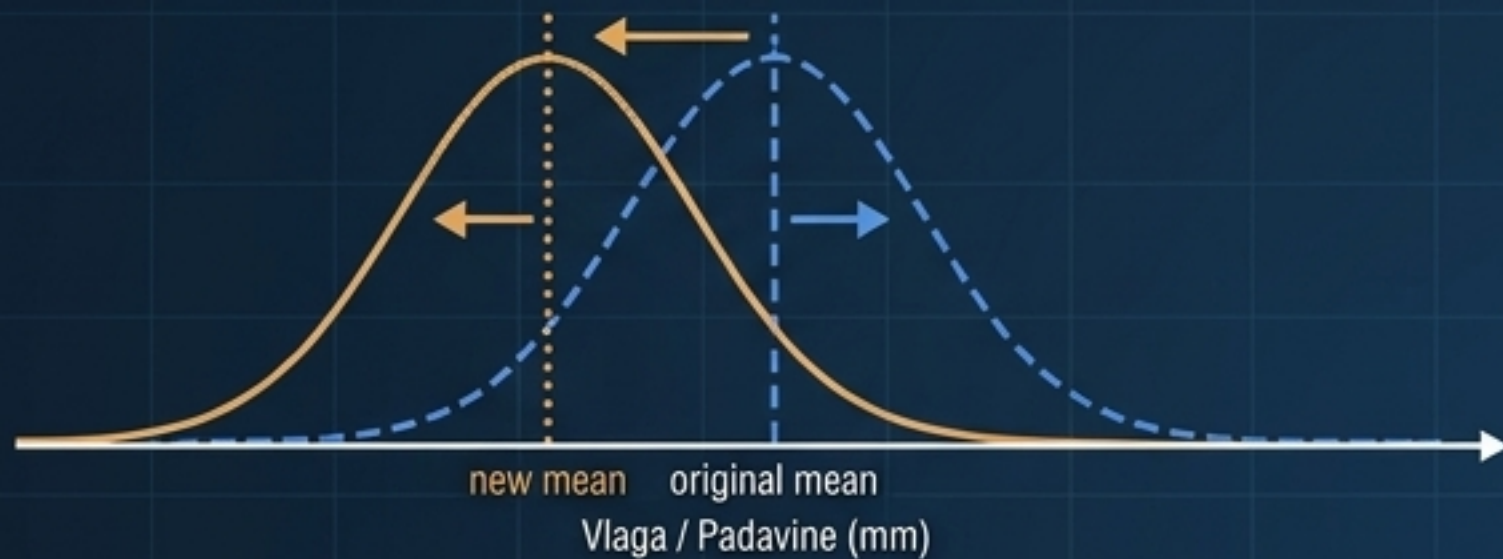
Odstranitev vpliva antropogenih podnebnih sprememb iz modelov pokaže bistveno manjše in povsem običajne anomalije vlažnosti tal.

Inženirski sklep

Podnebje ni več stacionarno. Ekstremi iz 20. stoletja ne morejo več služiti kot zanesljiva osnova (baseline) za projektiranje infrastrukture ali izračun tveganj.

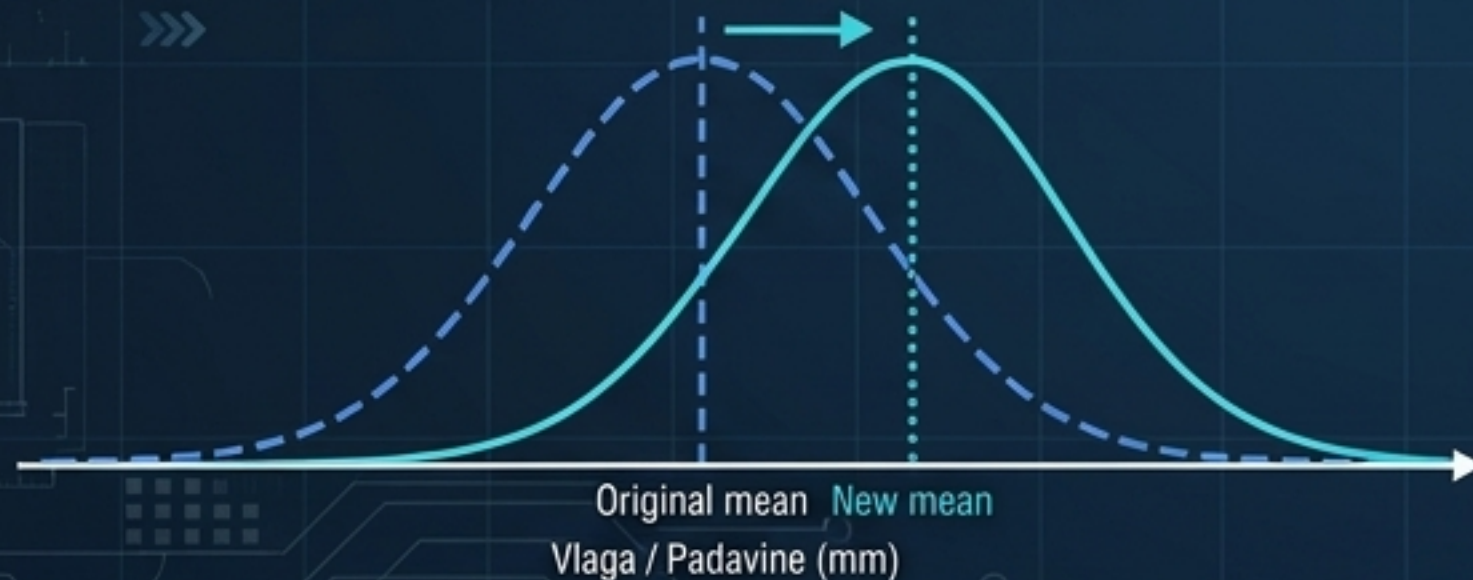
Matematični dokaz nestacionarnosti: Premikajoče se porazdelitve

Scenarij sušenja (Blaine County, Idaho)



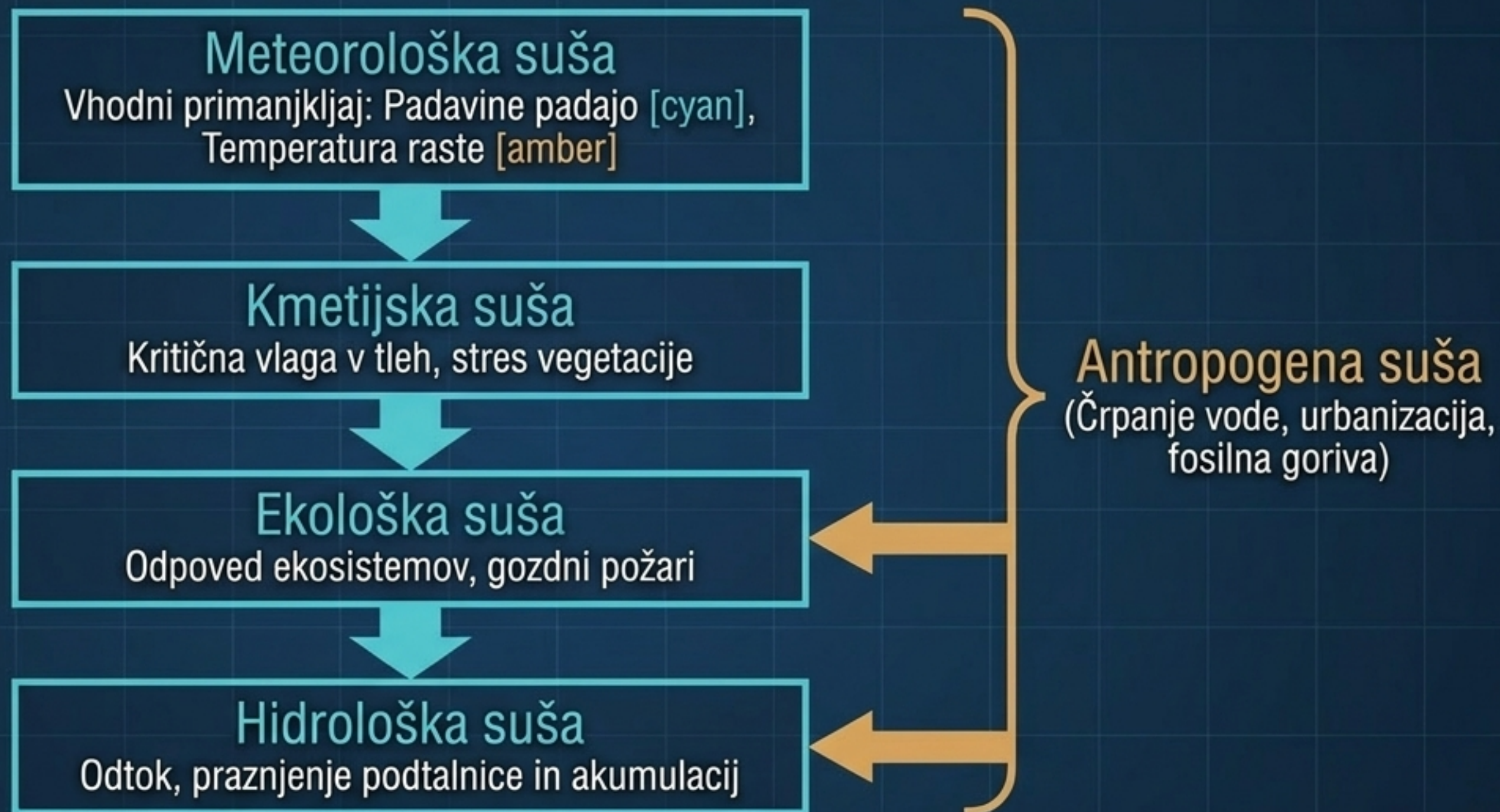
Metrika: Isti primanjkljaj vlage (-510 mm) je bil med letoma 1961–1990 klasificiran kot 'D3 - Ekstremna suša' (1-v-20 letni dogodek). V obdobju 1991–2020 je to le še 'D1 - Zmerna suša' (1-v-8 letni dogodek).

Scenarij močenja (Palm Beach, Florida)



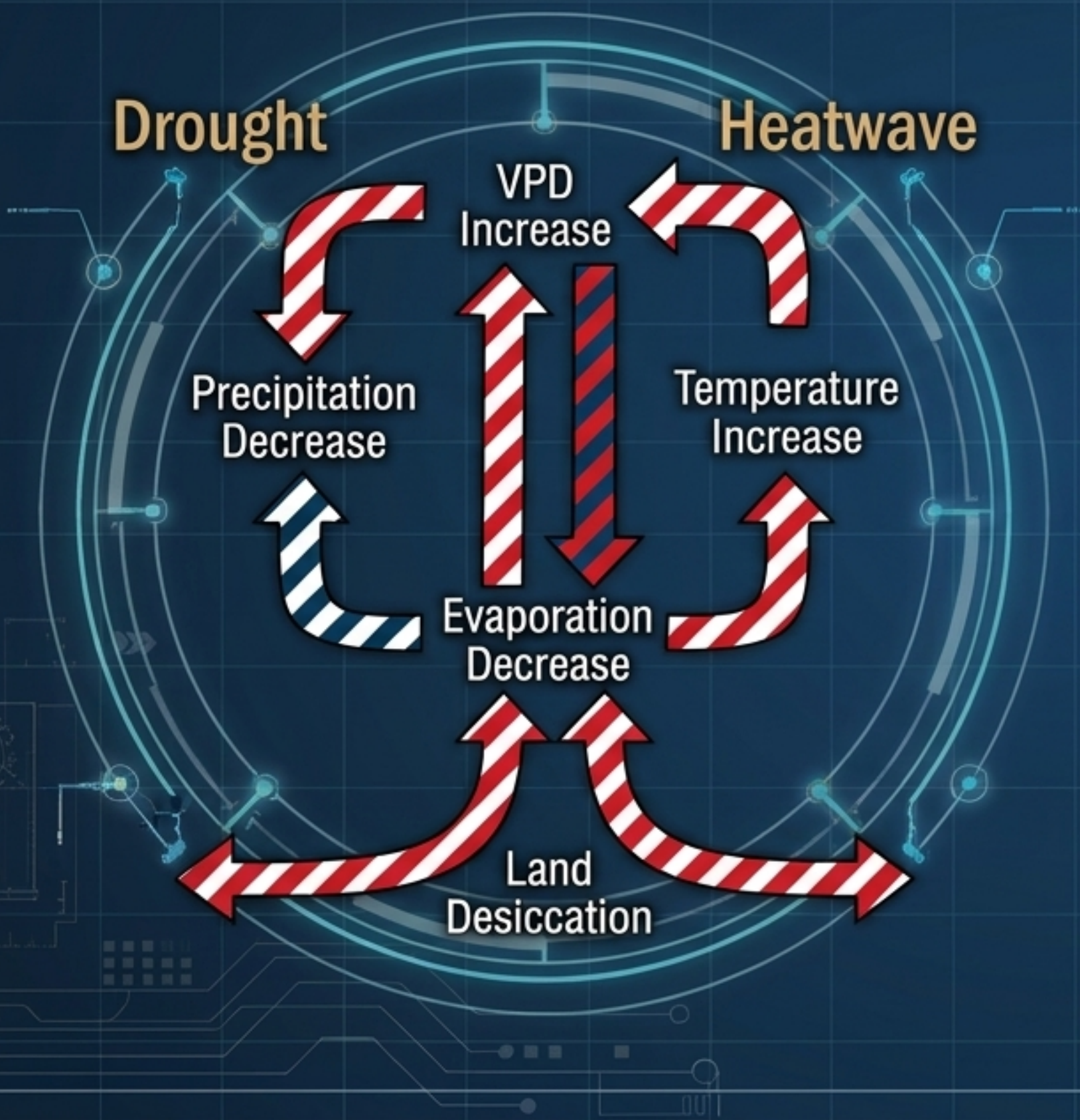
Sklep: Premik srednje vrednosti in 'repov' distribucije pomeni, da fiksni pragovi za inženirsko odločanje, ki temeljijo na preteklosti, matematično odpovedo.

Suša kot kaskadna napaka hidrološkega sistema



Kaskadni učinek zahteva senzorje na vseh nivojih sistema za pravilno identifikacijo faze napake in preprečitev popolnega zloma (system failure).

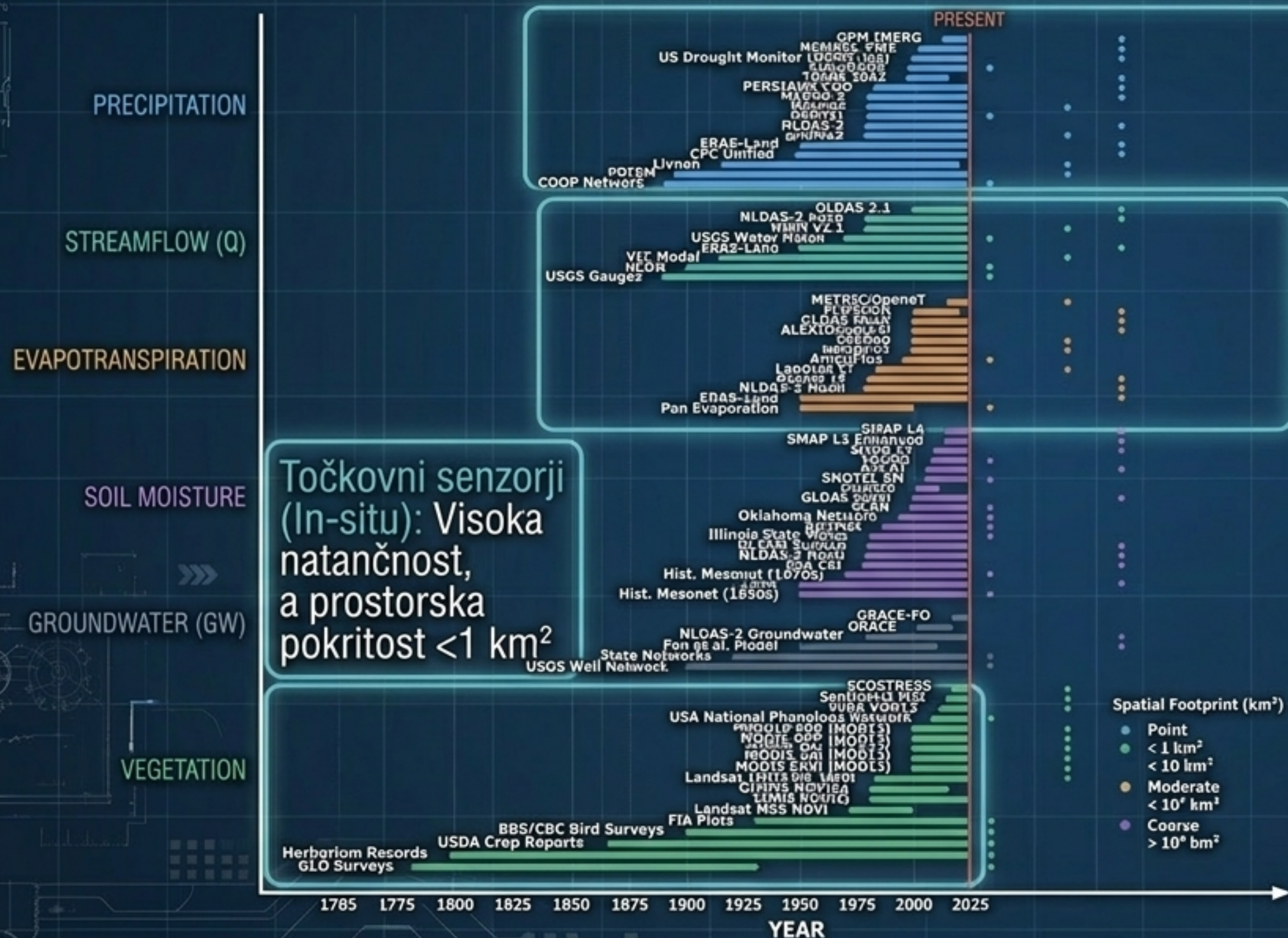
Termodinamika hitrih suš (Flash Drought) in povratne zanke



Ojačevalna povratna zanka (Feedback Loop)

1. **Sprožilec:** Primanjkljaj padavin drastično zmanjša vlago v tleh.
2. **Energetska preobrazba:** Pomanjkanje vlage preusmeri sončno sevanje iz latentne toplote (izhlapevanje) v občutno toploto (segrevanje zraka).
3. **Pospešek (VPD):** Višje temperature povečajo deficit parnega tlaka (VPD), kar eksponentno poveča atmosfersko povpraševanje po vlagi.
4. **Rezultat:** Nastop hitre (flash) suše in ekstremna desikacija v zgolj nekaj tednih.

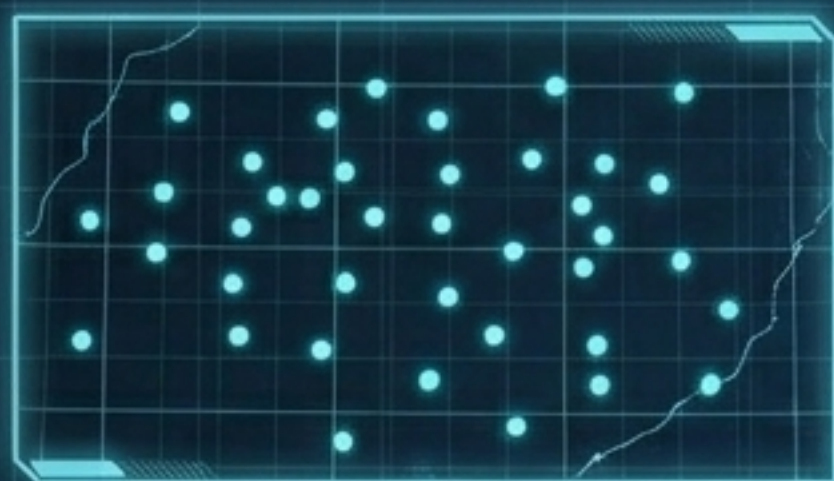
Telemetrična arhitektura: Razvoj opazovalnih sistemov



Matrika satelitskih senzorjev in njihovih funkcij

Tehnologija / Misija	Primarna Metrika	Prostorska Ločljivost	Omejitve v sistemu
SMAP / SMOS	Površinska vlaga v tleh (mikrovalovi)	~9-36 km	Meri le zgornjih 5 cm tal, slabo deluje pod vplivom goste vegetacije.
GRACE / GRACE-FO	Kopenska voda in globoka podtalnica (težnostne anomalije)	> 10.000 km ²	Visoka latenca podatkov in zelo groba prostorska ločljivost.
MODIS / Landsat	Zdravje vegetacije (NDVI, EVI) in evapotranspiracija	< 1 km ²	Optični senzorji so neuporabni ob oblačnosti in dimu.
GPM-IMERG	Količina padavin (mikrovalovi in IR)	~10 km	Zahteva nenehno kalibracijo s prizemnimi postajami.

Fuzija podatkov in odpravljanje senzorskih omejitev

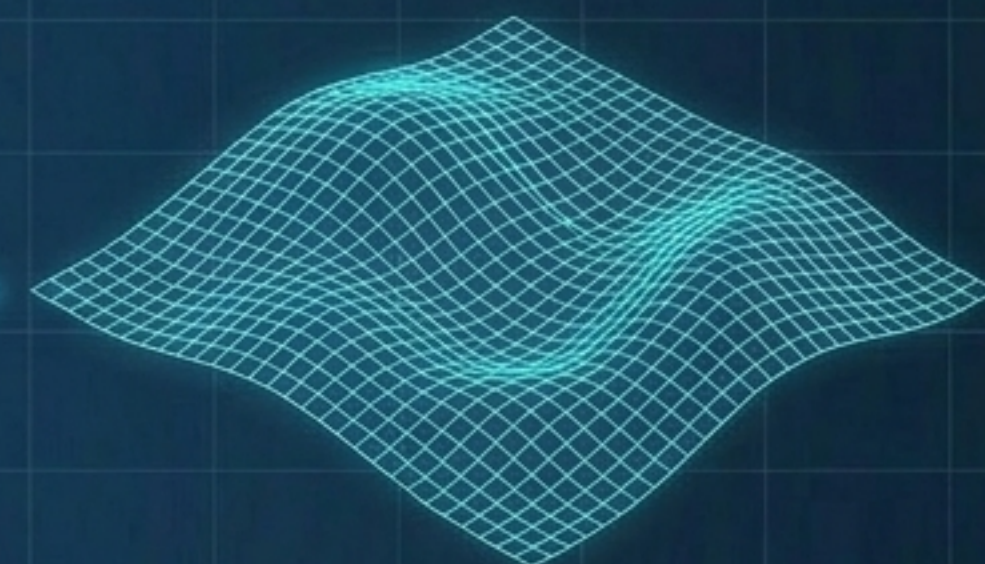
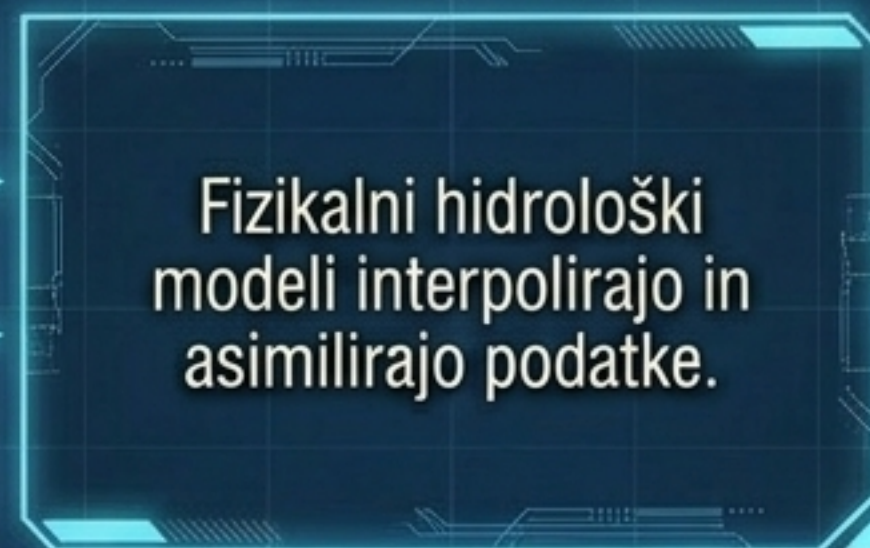


Točkovne meritve
(Senzorji v tleh)



Makro zaznavanje
(Satelitski posnetki)

Sistem za asimilacijo podatkov
(npr. NLDAS)



Enakomerna zvezna površina

Konvergenca dokazov (Convergence of Evidence): Ker noben senzor nima popolne prostorske, časovne in globinske ločljivosti, ansambelsko povprečje fizioloških in satelitskih podatkov izniči napake posameznih instrumentov.

Analitika: Standardizacija odstopanj (SPI in SPEI)

$$SPI = \frac{P - \mu}{\sigma}$$

P = Padavine

μ = Zgodovinsko povprečje

σ = Standardni odklon

Koncept Z-vrednosti: Omogoča primerjavo stopnje suše v puščavi in deževnem gozdu na popolnoma isti matematični skali.

Evolucija v SPEI

Indeks SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) upošteva tudi referenčno evapotranspiracijo.

SPI v pogojih globalnega segrevanja podcenjuje sušo, saj ignorira vpliv vročine na izhlapevanje.

D0: Nenormalno suho

D1: Zmerna

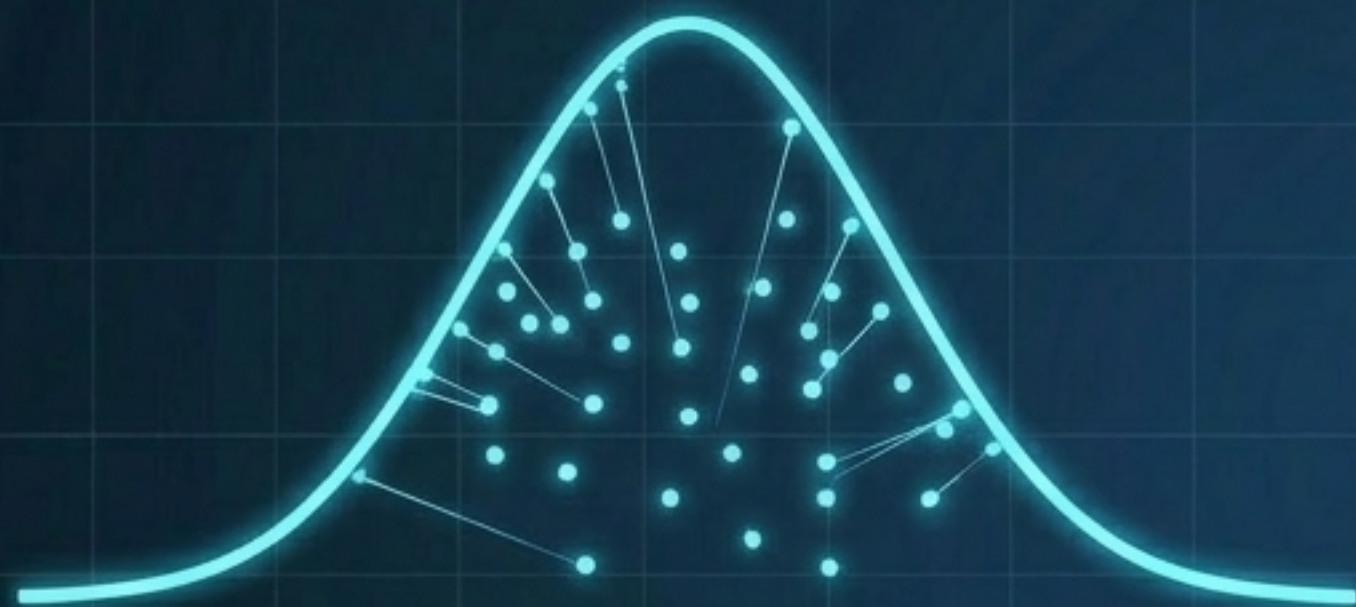
D2: Huda

D3: Ekstremna

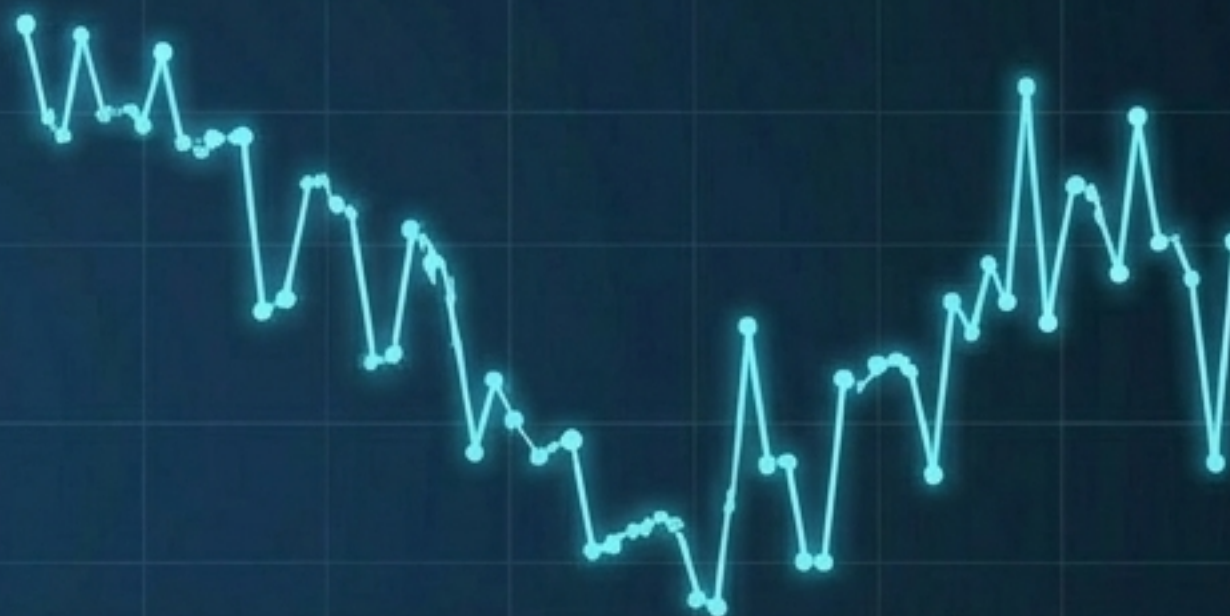
D4: Izjemna suša
(<2% verjetnost nastanka)

Računska logika: Parametrični vs. Neparometrični pristopi

Parametrični pristop (Primer: SMI)



Neparometrični pristop (Primer: ESMI)



Prednost: Računsko izjemno učinkovito in primerno za projekcije v prihodnost (uporaba GEV).

Slabost: Prisilno prileganje (fitting) lahko privede do hudih napak na ekstremih, če narava ne sledi izbrani matematični funkciji.

Prednost: Empirične porazdelitve ne predpostavljajo oblike, kar omogoča natančen zajem kompleksnih nelinearnosti v lokalnih podatkih.

Slabost: Strogo vezano na opazovane podatke, kar otežuje napovedovanje prihodnjih, še nevidenih ekstremov.

Paradigemski premik: Od opazovanja k UI napovedovanju

Deterministični modeli
(Stari pristop)

Linearno
računanje

Omejeno s fiksnimi
enačbami

Visoka latenca
prepoznavanja

Zaključek: Odlično za opazovanje trenutnega stanja, a prepočasno za proaktivno preprečevanje.

Strojno učenje
(UI premik)

Prostorsko-časovne
interakcije

Procesiranje tisočev
telemetričnih
spremenljivk

Realnočasovno
zaznavanje brez
ročnega umerjanja

Cilj: Prehod od odkrivanja trenutne suše (Monitor) k verjetnostnemu napovedovanju prihodnjega tveganja (Forecast).

Arhitektura nevronske mreže za prostorsko-časovno analizo

Recurrent Neural Networks (RNN / LSTM)

Vloga: Zajem časovne dinamike.

Model strojnega učenja ugotavlja, kako pretekla sušna obdobja (spomin sistema) vplivajo na zmanjšano odpornost vlage v tleh danes.

Graph Neural Networks (GNN)

Vloga: Obvladovanje prostorskih nelinearnosti.

Grafične mreže modelirajo regije kot povezana vozlišča. Suša ni izoliran piksel, temveč topološki proces prehajanja zračnih mas med sosednjimi regijami.

Rezultat: Namesto rigidnega determinističnega izračuna, mreža generira dinamično verjetnost pojava hitre suše.

Verjetnostno napovedovanje in obvladovanje latence

Izhod modela strojnega učenja
(npr. DroughtCast)



Problem diskretnih stanj

Trenutni sistemi (npr. USDM) dodelijo območju eno trdo kategorijo (npr. D2) na podlagi strokovnega konsenza. To vnaša subjektivnost in tedenski zamik (latenco) v proženje reševalnih mehanizmov.

Rešitev: Verjetnostni modeli

Umetna inteligenca ne vrne enega absolutnega odgovora, temveč porazdelitev verjetnosti (npr. '70% možnost za prehod v D3 naslednji mesec').

Zmanjševanje latence: Sistemska predikcija preseže birokratske zamike in omogoči identifikacijo hitrih suš, preden vegetacija sploh pokaže prve znake stresa.

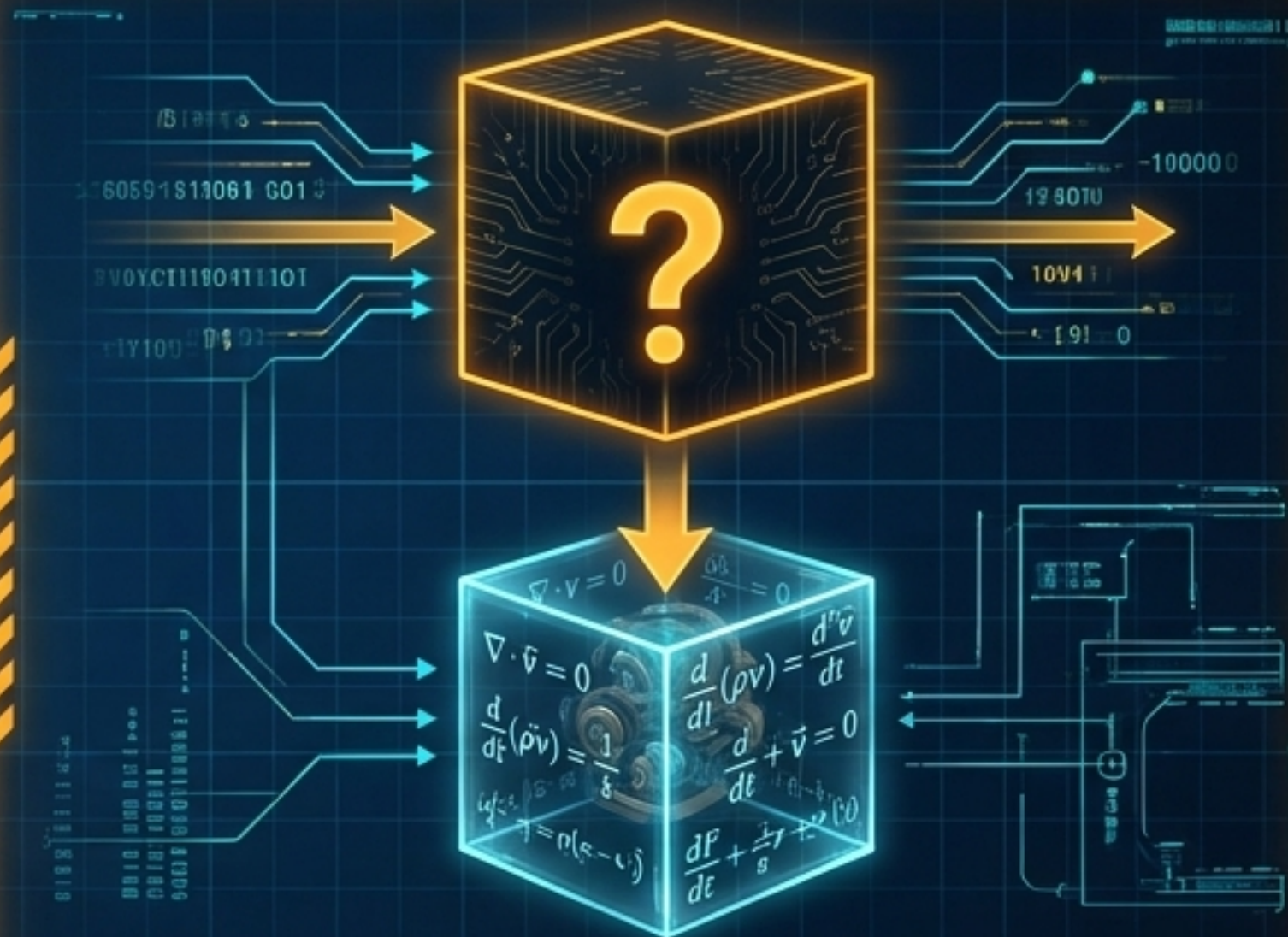
Inženirske omejitve: Negotovost in UI 'Bias'

! Problem zunajserijskih ekstremov (Outliers)



Algoritmi se učijo izključno na preteklih podatkih (training data). Zaradi pospešenih podnebnih sprememb se danes pojavljajo ekstremi, ki jih model še nikoli ni "videl". Model lahko nevede ublaži te napovedi (*over-smoothing*), kar ustvari nevaren lažen občutek varnosti.

! Pomanjkanje transparentnosti (Black Box)



Čisti data-driven modeli skrivajo prave fizikalne zakonitosti. Sodobna inženirska rešitev zahteva Hibridne modele (Physics-Informed Neural Networks), ki združujejo strojno učenje z vsiljenimi naravnimi zakoni ohranitve mase in energije.

Novi sistemski arhitekturni okvir (Dvo-tirni sistem)

Zajeti telemetrični podatki

TIR 1: Kratkoročno operativno odzivanje (0-6 mesecev)

- Cilj: Ocena trenutne redkosti pojava in hitro proženje zakonskih mehanizmov za pomoč.
- Orodja: Satelitska telemetrija v realnem času, UI "Nowcasting", spremljanje hitrega upada vlažnosti tal.

TIR 2: Dolgoročno načrtovanje infrastrukture (5-50 let)

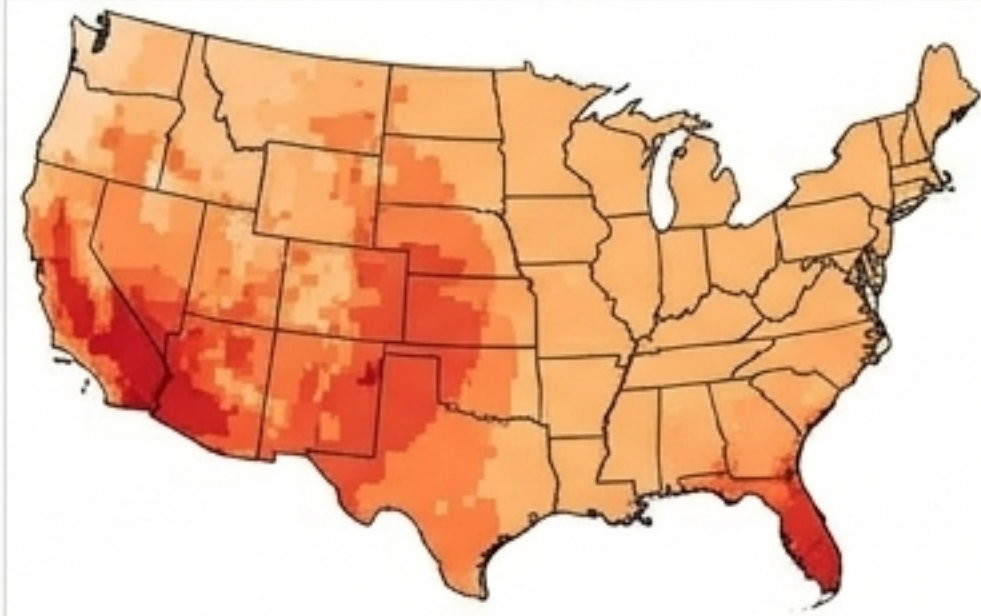
- Cilj: Prilagajanje zasnove jezov, vodovodov in agrikulture na popolnoma nestacionarno prihodnost.
- Orodja: Modeli podnebnih sprememb (CMIP6), eksplicitne nestacionarne funkcije verjetnosti, scenarijsko načrtovanje.

Dolgoročno načrtovanje: Projekcije z modeli CMIP6

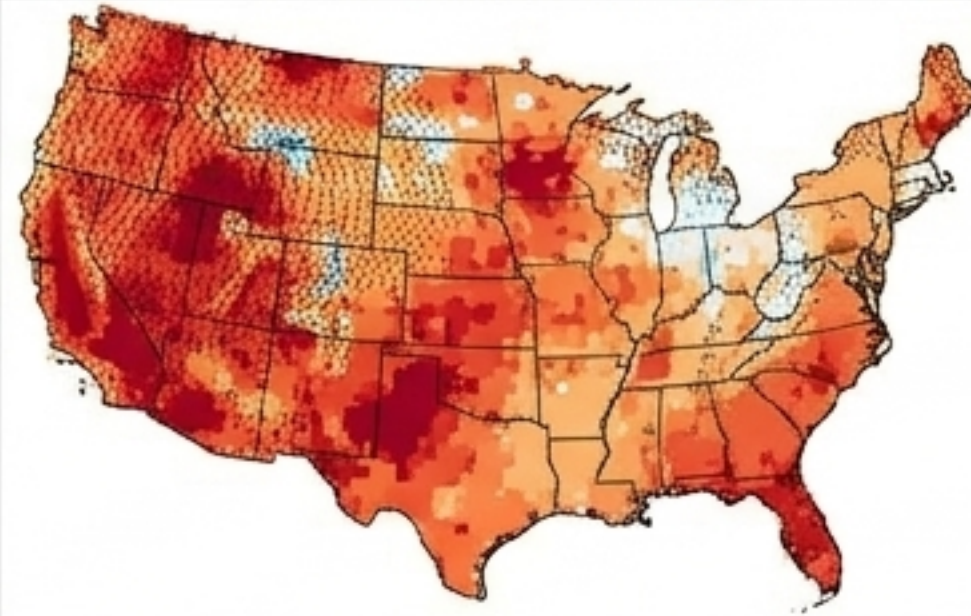
Sodobna D3
Frekvenca

množitelj

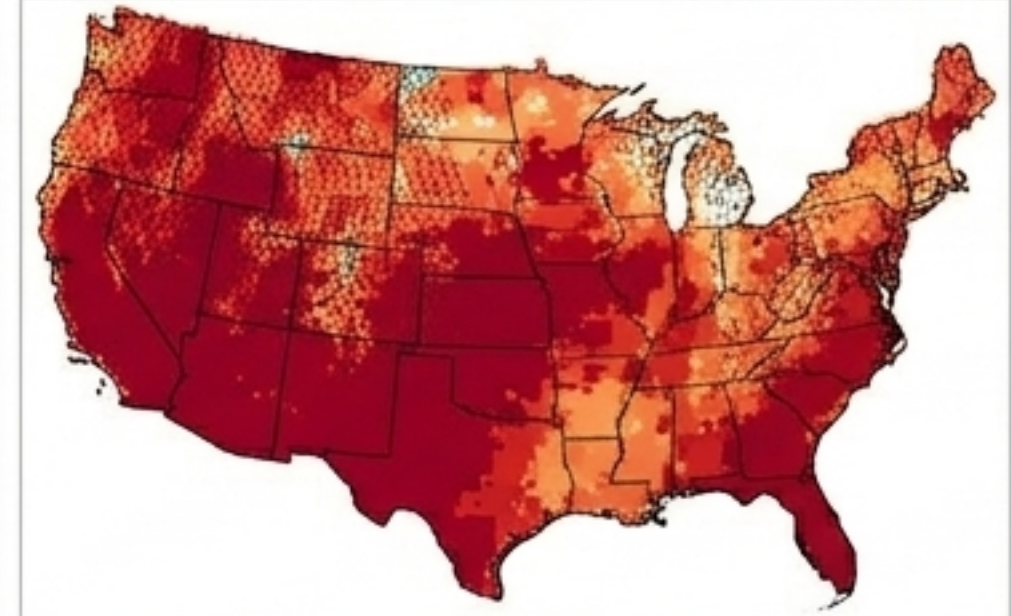
00 - 40
20 - 50
30 - 90



2050 vs Sodobna
(Frekvenčni množitelj)



2100 vs Sodobna
(Frekvenčni množitelj)



Matematika v ozadju

- Izdelava temelji na specifičnih podnebnih scenarijih (model EC-Earth3 pod pogoji SSP3-7.0).
- Uporabljena je korekcija pristranskosti (Bias-Correction) z metodo QDM (Quantile Delta Mapping) glede na referenčno obdobje.

Inženirski zaključek

- Isti fizični primanjkljaj vlage (P-ETo), ki danes sproži izredne razmere (D3), bo ob koncu stoletja v številnih regijah postal povprečna poletna normirana vrednost (D0 ali D1). Infrastruktura mora biti dimenzionirana na novo normalnost.

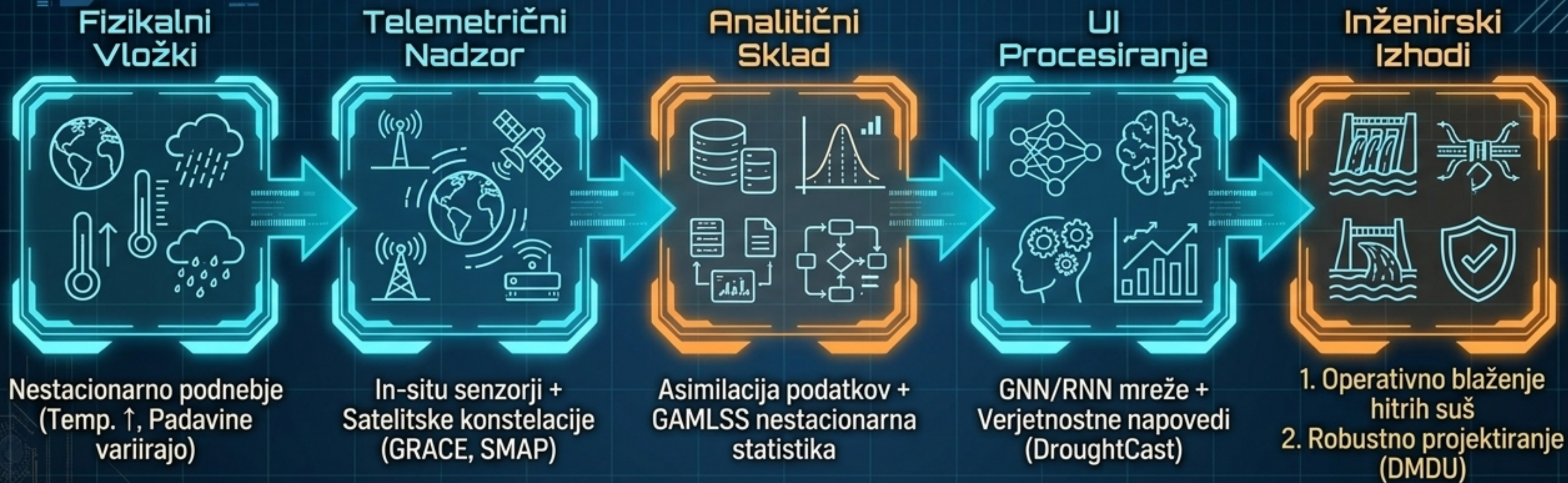
DMDU: Odločanje v pogojih globoke negotovosti



Metodologija DMDU (Decision Making under Deep Uncertainty):

- **Zavrnitev iluzije natančnosti.** Inženirji prenehajo iskati eno samo "optimalno rešitev" za prihodnost. Cilj je iskanje "**najbolj robustne rešitve**" – arhitekture, ki preživi na tisoče Monte Carlo simulacij pod popolnoma nasprotujočimi si podnebnimi predpostavkami.
- Odmik od determinističnega projektiranja k **adaptivnemu upravljanju.**

Sinteza: Telemetrija suše v 21. stoletju



Prihodnost reševanja suše ni le v masovnejši gradnji jezov, temveč v vrhunski podatkovni arhitekturi in umetni inteligenci.