

# Integração de Inteligência Artificial e Dados InSAR na Monitorização de Infraestruturas

**Joaquim Tinoco**

*University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal*



Organização



# Índice



Técnicas de Sensoriamento Remoto (RST)



Radar de Abertura Sintética (SAR)



Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR)



Aplicações de InSAR – Monitorização de Taludes



Monitorização de Taludes – Metodologia



Monitorização de Taludes – Resultados



Observações Finais

## Técnica de Sensoriamento Remoto (RST)



A deteção remota é uma tecnologia poderosa que consiste na **aquisição de informações sobre a superfície e a atmosfera da Terra à distância**, geralmente utilizando sensores aéreos ou baseados em satélites.



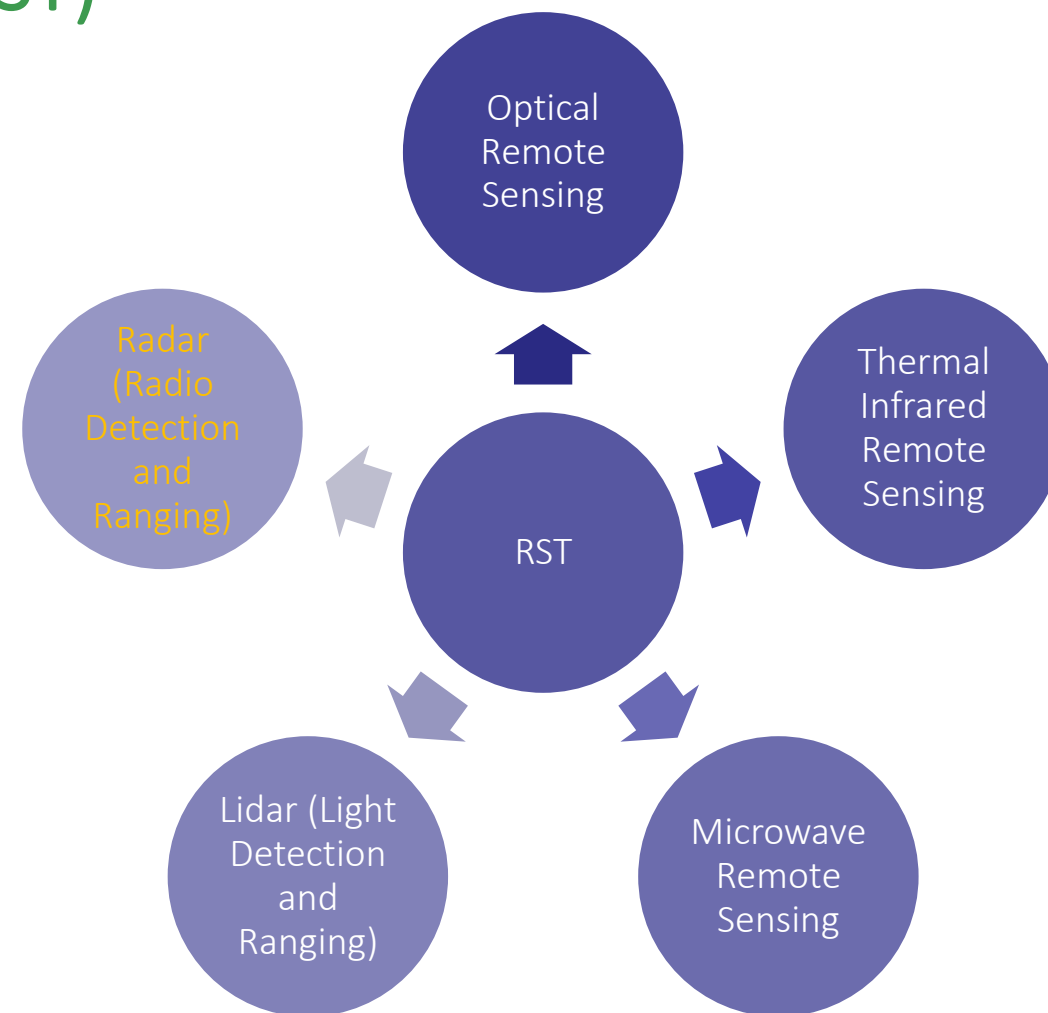
Permite que cientistas, investigadores e decisores obtenham dados valiosos sobre o nosso planeta, monitorizem alterações ao longo do tempo e adquiram conhecimento sobre diversos processos e fenómenos ambientais.



Algumas vantagens incluem ampla cobertura espacial, aquisição repetitiva de dados e a capacidade de capturar informações em áreas inacessíveis ou de difícil acesso.



Desempenham um papel crucial na monitorização ambiental, gestão de recursos naturais, resposta a desastres, estudos sobre alterações climáticas e planeamento urbano.



## Radar de Abertura Sintética (SAR)



Satélite Sentinel-1



O SAR é uma imagem produzida a partir da abordagem de detecção remota (RADAR). Utiliza **ondas de rádio** (sinais de micro-ondas) emitidas por um sensor em satélites ou aviões para gerar imagens de alta resolução.



Os sinais emitidos são refletidos de volta após encontrarem objetos na superfície terrestre. O tempo, a amplitude e os sinais de fase são medidos, pois refletem as características do objeto detetado.

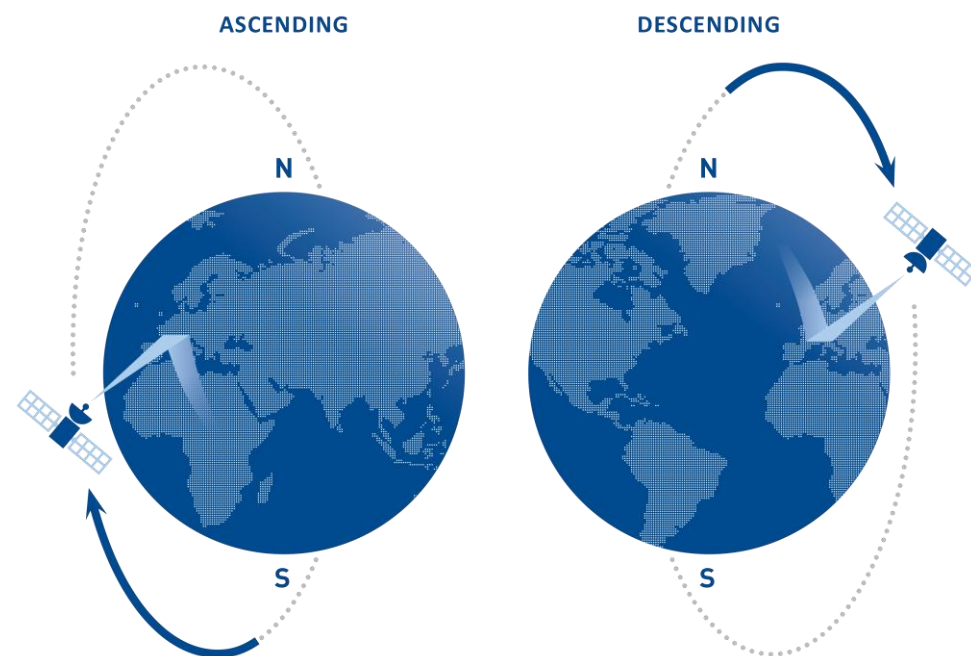


O SAR possui vantagens próprias, incluindo capacidade de imagem em todas as condições meteorológicas, alta resolução, aplicações interferométricas e ampla cobertura.



A resolução espacial das imagens SAR é determinada pelo sensor e pelo seu modo de aquisição, enquanto a resolução temporal das imagens SAR é influenciada pelo tempo de revisitação do satélite.

# Radar de Abertura Sintética (SAR)



Órbitas Ascendente e Descendente



Existem duas órbitas e modos de aquisição dos satélites SAR: as **órbitas ou modos Ascendentes e Descendentes**. As órbitas ascendentes movem-se do polo sul para o polo norte, observando de oeste para leste. Por outro lado, a órbita descendente é o inverso.



O modo ascendente é mais adequado para terrenos montanhosos, enquanto o modo descendente é indicado para mapear áreas com grandes massas de água, como oceanos e lagos.



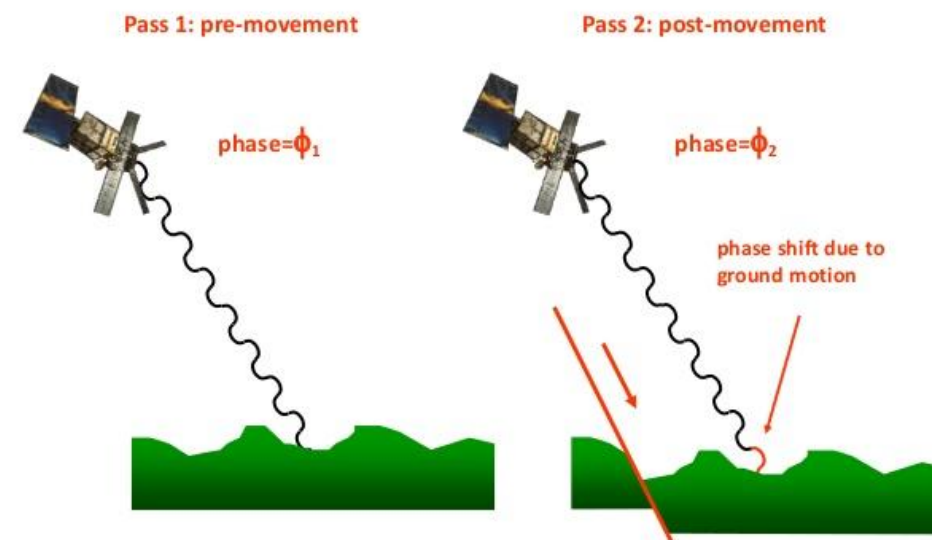
Em alguns casos, ambos os modos podem ser usados em conjunto para gerar interferogramas com melhor cobertura temporal ou para caracterizar mais detalhadamente padrões de deformação que variam no espaço e no tempo.



# Interferometria SAR (InSAR)

- ❑ Os dados de InSAR (Radar Interferométrico de Abertura Sintética) são uma técnica avançada de deteção remota utilizada para monitorizar diversos fenómenos geofísicos, incluindo a monitorização de estruturas marítimas.
- ❑ Algumas vantagens principais do InSAR:
  - Alta Resolução Espacial: O InSAR proporciona uma elevada resolução espacial, permitindo o mapeamento detalhado de deformações e alterações da superfície numa ampla área. É capaz de detetar mudanças na escala de milímetros a centímetros.
  - Cobertura de Grandes Áreas: O InSAR consegue cobrir grandes áreas numa única aquisição, tornando-o eficiente para monitorizar fenómenos geológicos e ambientais em larga escala.
  - Repetibilidade: O InSAR pode fornecer dados de séries temporais, permitindo a monitorização de deformações da superfície ao longo do tempo.
  - Técnica Não-Invasiva: O InSAR é uma técnica de deteção remota sem contacto, o que significa que não requer contacto físico com a área alvo.
  - Custo-Efetivo: Os dados do InSAR podem ser adquiridos a um custo relativamente baixo quando comparados com métodos tradicionais de levantamento no terreno, que podem ser demorados e dispendiosos.

## InSAR: How it works



# Interferometria SAR (InSAR)

InSAR (Interferometria de Radar de Abertura Sintética) é uma técnica que utiliza imagens de radar adquiridas por satélites para detetar deslocamentos na superfície da Terra com precisão milimétrica.

Envolve a geração de um interferograma a partir de duas ou mais imagens SAR, sendo que o componente de fase do interferograma representa a deformação da superfície ou alterações na elevação.

A diferença de fase, exibida como franjas, é proporcional ao deslocamento na linha de visão (LOS) entre o solo e o sensor de radar.

Ao resolver o interferograma, podem ser obtidas medições precisas de deslocamentos verticais e horizontais, tornando o InSAR uma ferramenta valiosa para monitorizar alterações na superfície da Terra ao longo do tempo.

O Radar Interferométrico de Abertura Sintética Diferencial (DInSAR) é uma técnica de detecção remota utilizada para medir, com precisão, deformações na superfície.

Baseia-se nos padrões de interferência das ondas de radar de duas ou mais imagens de SAR adquiridas em momentos diferentes para gerar interferogramas, revelando diferenças de fase.

Essas diferenças de fase, apresentadas como franjas, representam alterações na superfície, como subsidência, elevação.

# Interferometria SAR (InSAR)

O DInSAR explora a coerência dos sinais de radar para analisar, com precisão, o deslocamento da superfície. Uma elevada coerência indica uma reflexão consistente das ondas de radar, permitindo medições precisas.

No entanto, o DInSAR é influenciado por condições atmosféricas, decorrelação espacial e temporal, e pela topografia.

Para superar essas limitações, foram desenvolvidos métodos como o InSAR de Séries Temporais (TS-InSAR), o *Small Baseline Subset* (SBAS) e o InSAR Multitemporal (MTInSAR).

O SBAS, por exemplo, utiliza uma rede densa de interferogramas com pequenas linhas de base perpendiculares para minimizar a decorrelação, aumentando a precisão.

O SBAS é útil para monitorizar deformações lentas e cumulativas da superfície em grandes áreas.

Mitiga eficazmente as perturbações atmosféricas, tornando-se valioso para aplicações como a monitorização de subsidência do solo, deteção de deslizamentos de terra e análise de movimento do terreno.

No entanto, o SBAS exige um número suficiente de imagens SAR adequadas, informações orbitais precisas e correções atmosféricas rigorosas para obter resultados fiáveis.

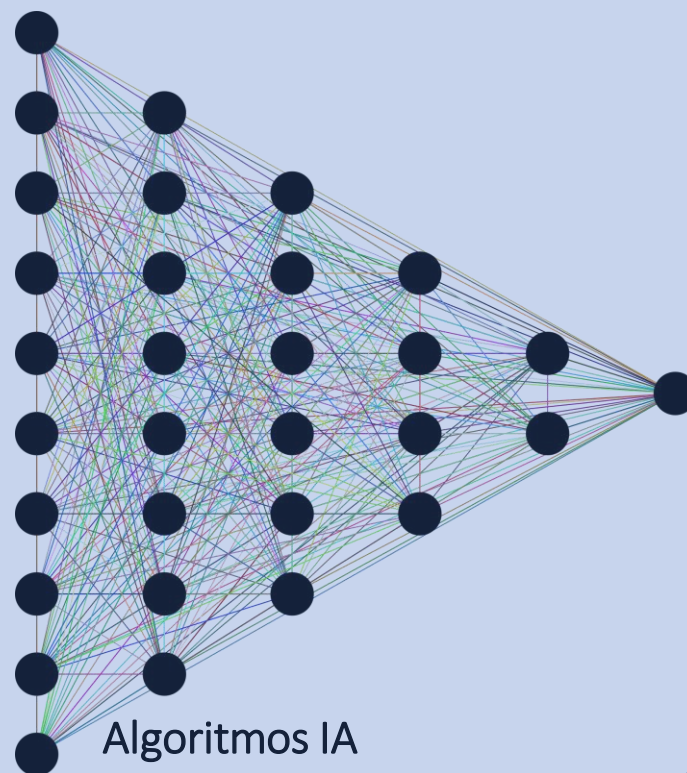
O SBAS desempenha um papel crucial na monitorização e medição de deformações da superfície, fornecendo informações sobre a dinâmica da superfície terrestre para diversas aplicações.



## Aplicações InSAR



## Integração de InSAR e IA



# Monitorização de Taludes | Introdução & Motivação

Instabilidades de taludes, sejam naturais ou induzidas por atividades humanas, podem representar riscos significativos para a integridade dos taludes. Esses riscos podem potencialmente levar a deslizamentos de terra, fluxos de detritos e outros [eventos perigosos que ameaçam vidas, infraestruturas e o ambiente](#).

Com o aumento da frequência e gravidade de desastres relacionados com taludes, [há uma necessidade acrescida de técnicas avançadas de monitorização contínua e avaliação de riscos](#), com o objetivo de analisar eficazmente os perigos associados à instabilidade de taludes.

Integrando o [processamento de imagens de satélite com algoritmos de aprendizagem automática](#), nomeadamente utilizando dados de InSAR, pretende-se melhorar a monitorização da instabilidade de taludes.

Assim, a automatização de processos e o reforço das capacidades de tomada de decisão na avaliação de riscos são passos fundamentais para o desenvolvimento de abordagens mais eficazes de redução do risco associados a desastres.

Esta abordagem inovadora promete não apenas [mitigar os impactos adversos das instabilidades de taludes](#), mas também [contribuir para a proteção de vidas, infraestruturas e do ambiente contra potenciais perigos](#).





# Objectivos

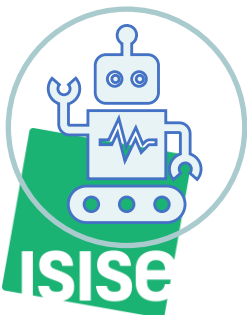


O principal objetivo desta proposta é criar uma metodologia simplificada para avaliar os níveis de serviço e a resiliência de redes rodoviárias e ferroviárias, com foco em infraestruturas lineares.



Este projeto tem como objetivo desenvolver um sistema de deteção e classificação de movimentos/deslocamentos de taludes, integrando técnicas de deteção remota (RST) com algoritmos de Inteligência Artificial (IA):

- Facilitar a monitorização e análise de instabilidades de taludes a nível de rede, oferecendo potenciais melhorias e automatização do processo.
- Contribuir para o desenvolvimento de ferramentas eficientes de apoio à decisão para mitigação de instabilidades de taludes e metodologias abrangentes de avaliação de riscos.



Além disso, com base na fundação estabelecida no ponto 2, o projeto pretende desenvolver um sistema preditivo capaz de antecipar falhas de taludes.

# Metodologia

A metodologia proposta **integra Inteligência Artificial (IA) com imagens de satélite** para avaliar os níveis de serviço de autoestradas, utilizando aprendizagem automática (ML) para detetar movimentos de taludes, através da análise de dados InSAR.

Esta metodologia foca-se especificamente no desenvolvimento de modelos preditivos capazes de detetar movimentos de taludes utilizando dados InSAR, que identificam deslocamentos verticais e horizontais tanto na infraestrutura rodoviária como nos taludes circundantes.

Os dados são segregados em duas partes: uma representando deslocamentos na infraestrutura rodoviária e a outra mostrando deslocamentos nos taludes adjacentes. Este estudo foca-se particularmente nos deslocamentos verticais observados nos taludes, excluindo deliberadamente outras fontes de dados para minimizar o ruído.

O conjunto de dados de origem abrange **5079 registos** de valores de deslocamento e datas, num período de 7 anos (2016-2023).

## Metodologia – Estratégias de Modelação

- Para facilitar a exploração dos conjunto de dados InSAR, é utilizada uma técnica de **janela móvel de cinco elementos** transformando-os num novo conjunto de dados – o conjunto de treino. Este conjunto de dados é mais fácil de analisar e serve como base para o treino dos modelos.
- Diferentes estratégias (experiências) foram conduzidas para abordar a previsão de movimentos/deslocamentos de taludes. Este estudo consiste em três iterações.

Iteração 0: Prever o próximo movimento do talude utilizando os últimos quatro deslocamentos verticais como imputes.

Iteração 1: Extensão da Iteração 0 considerando os intervalos de tempo entre as medições.

Iteração 2: Integração de diferentes intervalos de tempo na recolha de dados.



## Metodologia – Base de Dados Original

Date	PID1	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6
04/10/2016	2.45	-2.07	1.98	1.30	0.97	1.72
16/10/2016	2.65	3.08	1.72	1.18	0.55	1.9
28/10/2016	-1.91	-1.32	-1.77	-2.78	-2.5	-1.13
09/11/2016	-1.73	-1.58	-2.88	-3.44	-2.94	-2.02
21/11/2016	-8.23	-8.25	-9.58	-9.71	-8.5	-6.38
03/12/2016	-5.01	-4.22	-5.29	-6.28	-6.9	-5.69

Amostra do conjunto de dados de origem (deslocamentos verticais InSAR).

## Metodologia – Base de Dados de Treino

Time1	Time2	Time3	Time4	stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	Next stage (Output
12	12	12	12	2.45	2.65	-1.91	-1.73	-8.23
12	12	12	12	2.65	-1.91	-1.73	-8.23	-5.01
12	12	12	12	-1.91	-1.73	-8.23	-5.01	1.88
12	12	12	12	-1.73	-8.23	-5.01	1.88	-0.29
24	24	24	24	-5.69	-8.9	-4.49	-9.77	-8
24	24	24	24	-8.9	-4.49	-9.77	-8	-4.81
24	24	24	24	-4.49	-9.77	-8	-4.81	-5.8
24	24	24	24	-9.77	-8	-4.81	-5.8	-1.73
72	72	72	72	-3.72	-5.55	-7.52	-8.21	-10.24
72	72	72	72	-5.55	-7.52	-8.21	-10.24	-4.6
72	72	72	72	-7.52	-8.21	-10.24	-4.6	-10.34
72	72	72	72	-8.21	-10.24	-4.6	-10.34	-14.12
144	144	144	144	-14.7	-15.02	-13.67	-16.49	-18.34
144	144	144	144	-10.11	-10.17	-9.34	-12.29	-13.67
144	144	144	144	-17.02	-16.28	-15.17	-17.02	-19.82
144	144	144	144	-15.67	-16.21	-15.12	-17.07	-20.22

# Metodologia – Algoritmos & Avaliação dos Modelos



Este estudo utiliza algoritmos de aprendizagem automática baseados em dados, nomeadamente **Redes Neurais Artificiais (ANN)** e **Regressão Multilinear (MR)**..



Os algoritmos foram submetidos a uma validação cruzada de 5 folds (5-fold cross-validation) para fins de treino e validação. Todo o processo foi repetido cinco vezes para fins de generalização.



A complexidade dos algoritmos de aprendizagem automática exige uma avaliação baseada na precisão, eficiência computacional e interpretabilidade.



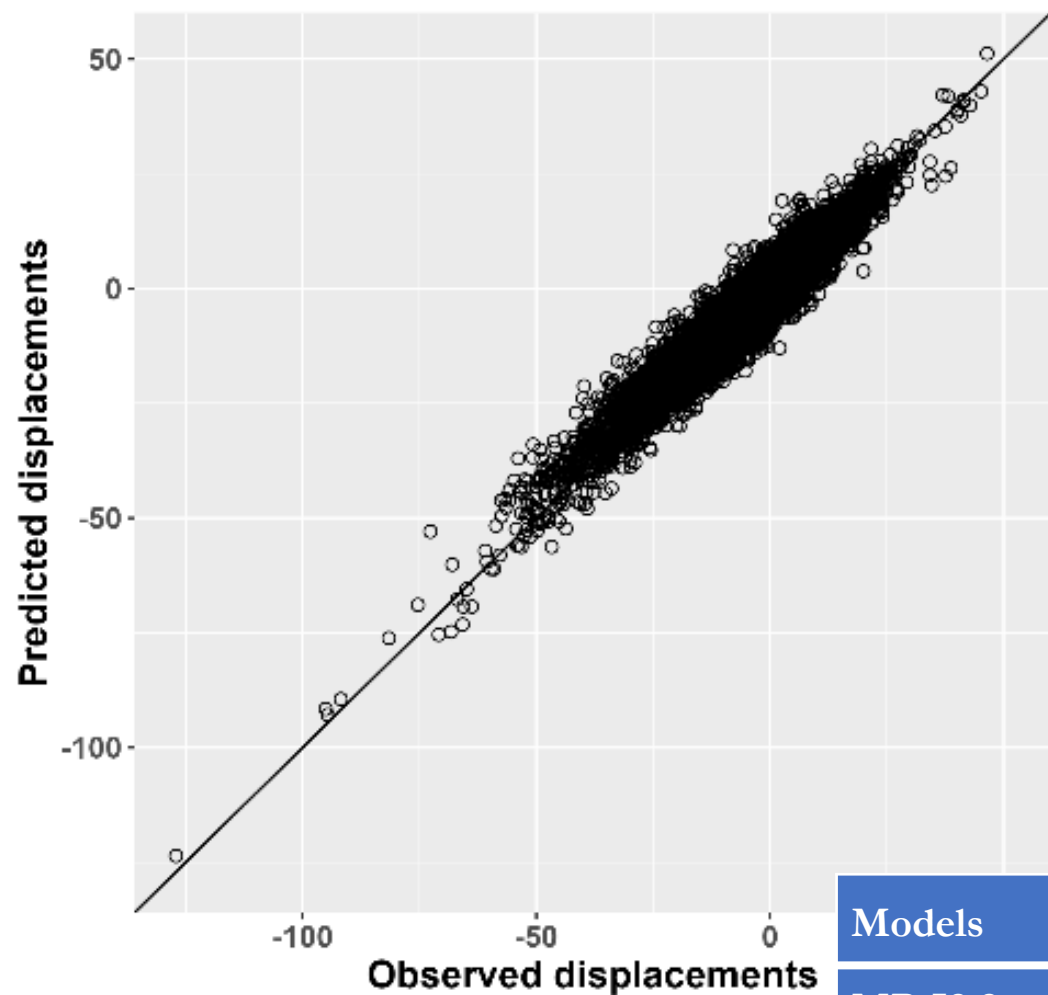
Métricas como o Erro Absoluto Médio (MAE), o Erro Quadrático Médio (MSE), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) foram utilizadas para avaliar os modelos.



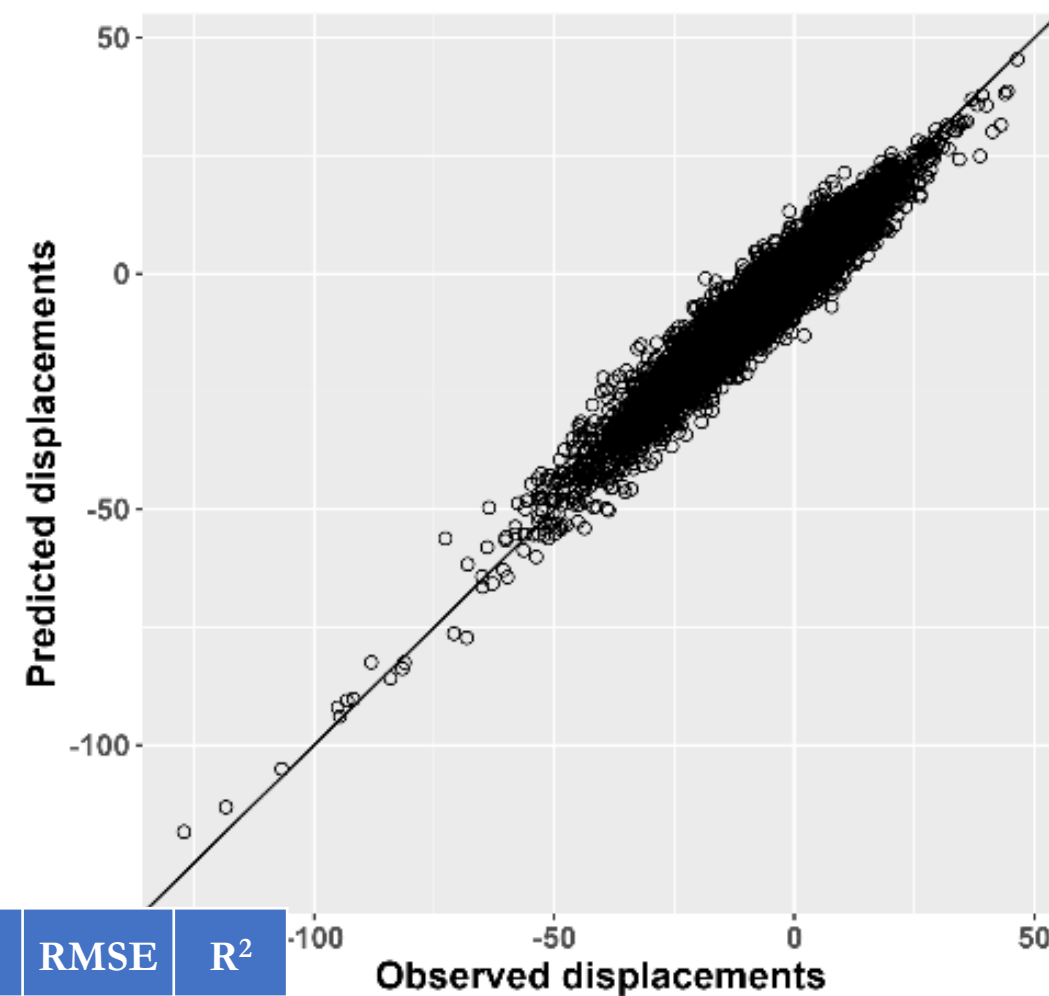
Valores baixos ou próximos de zero de MAE, MSE e RMSE indicam maior precisão dos modelos, enquanto um valor mais elevado de  $R^2$  (próximo de valor unitário) significa maior precisão.

# Resultados - Desempenho

MR\_I2.2



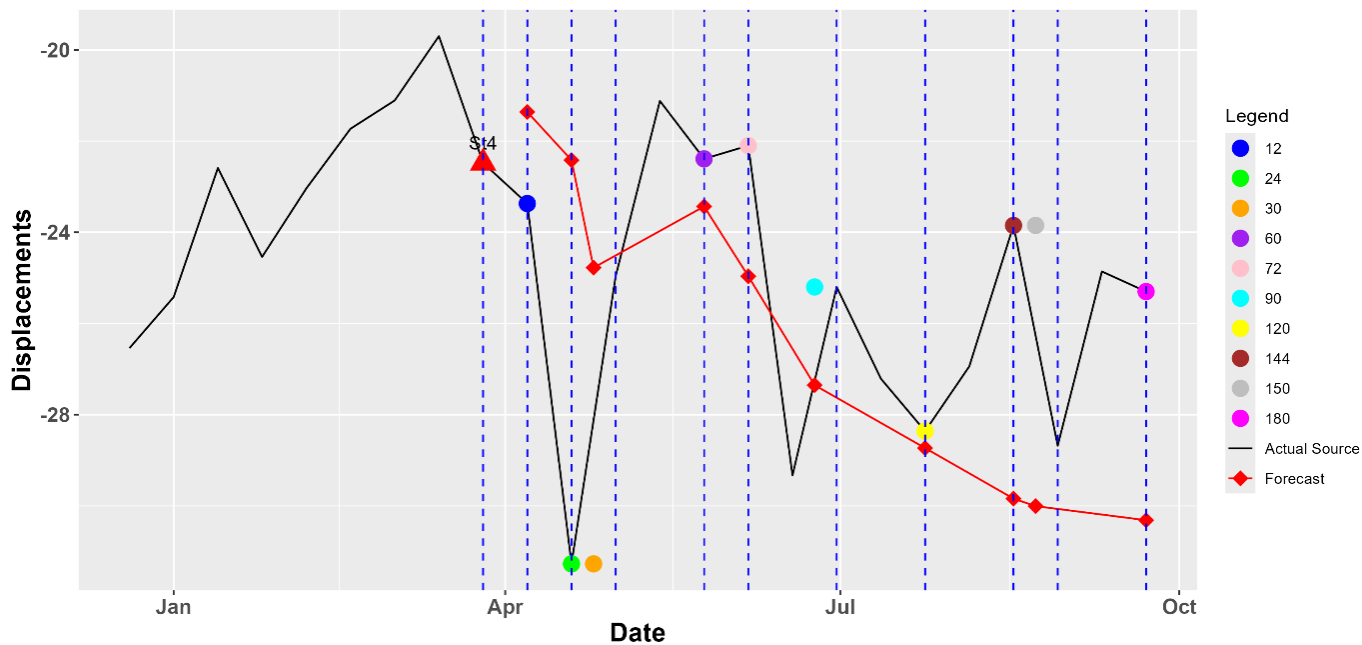
ANN\_I2.2



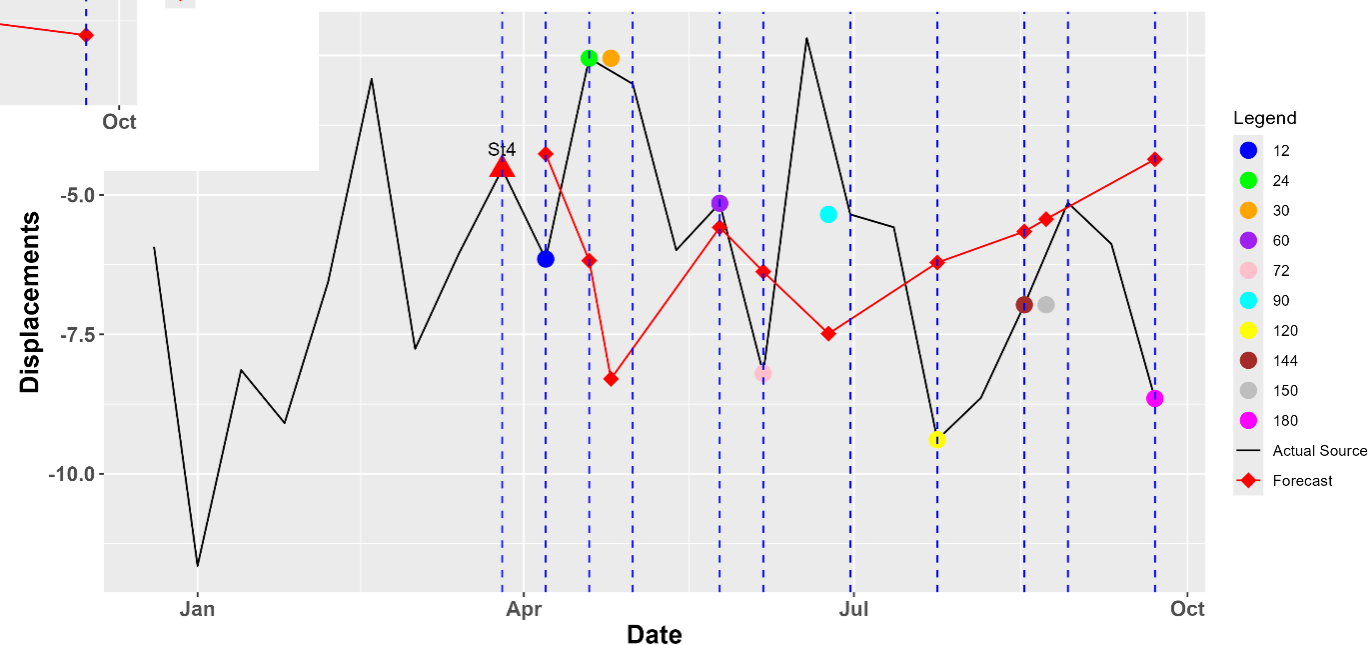
Models	MAE	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>
MR.I2.2	2.30	9.15	3.02	0.91
ANN.I2.2	2.23	8.51	2.92	0.92

# Resultados - Desempenho

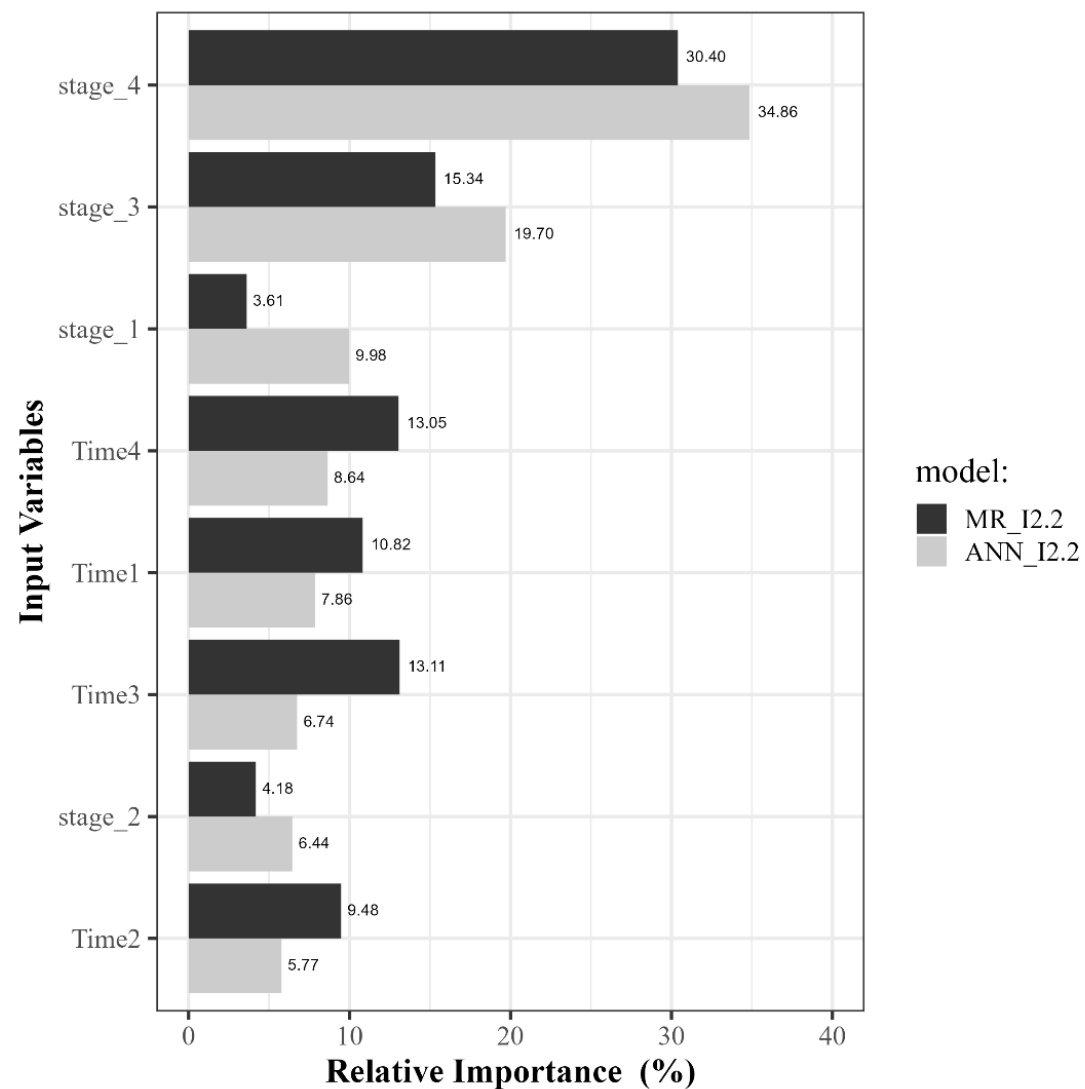
PID3300 Over Time with Forecast and Reference Point



PID10 Over Time with Forecast and Reference Point



## Resultados – Importância Relativa





## Observações Finais

- ❖ O estudo demonstra a eficácia dos algoritmos ANN e MR na previsão de movimentos de taludes, evidenciada pelos valores de  $R^2$  elevados e pelos valores reduzidos das restantes métricas (e.g., RMSE) ao longo das diferentes iterações.
- ❖ As variáveis de entrada relativas às medições anteriores (“Stage\_4,” “Stage\_3”) mostrou uma importância relativa consistente ao longo das diferentes iterações, o que demonstra a sua relevância na previsão dos deslocamentos verticais na avaliação da estabilidade dos taludes.
- ❖ Embora o intervalo de tempo entre medições tenha mostrado um impacto reduzido no desempenho dos modelos, a sua influência pode variar em situações reais com condições ambientais dinâmicas.
- ❖ Pese embora os resultados satisfatórios, outras estratégias poderão explorar a natureza dinâmica dos intervalos de tempo de forma a melhorar ainda mais a precisão dos modelos preditivos.
- ❖ Outras abordagens (iteraões) são necessárias para aumentar o desempenho dos modelos, incorporando outras variáveis conhecidas pelo seu efeito na estabilidade dos taludes (e.g., dados geométricos, informações de precipitação/pluviosidade).

Obrigado pela  
Atenção!

