Apêndice D
Análise de Imagens

Dezembro de 2019

A versão oficial deste Apêndice é a versão em língua inglesa. Em caso de qualquer contradição ou divergência de interpretação entre a versão traduzida e a versão em língua inglesa deste Apêndice, prevalecerá a versão em língua inglesa.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

2. FONTE DE DADOS 1

3. ANÁLISE DE DADOS TOPOGRÁFICOS 2
   3.1 Volume e Espessura de Rejeitos 3
   3.2 Volume de Material que Sofreu Rompimento 4
   3.3 Índice Topográfico de Umidade 5

4. ANÁLISE DE PRISMAS 6

5. ANÁLISE DE RADAR DE SOLO 14
   5.1 Dados em Tempo Real 15
   5.2 Incidente com o DHP 15 28
   5.3 Dados de “Movimento Lento” 29

6. ANÁLISE DO SATÉLITE INSAR 31
   6.1 Parte Inferior e Central da Barragem I 33
   6.2 Parte Superior da Barragem I 38
   6.3 Rejeitos 39
   6.4 Seções Transversais 40
   6.5 Comparação Entre InSAR e TWI 43
   6.6 Comparação Entre InSAR e Precipitação 44

7. ANÁLISE DO SENTINEL-2 48
   7.1 Lago de Decantação Dentro dos Rejeitos e Áreas Úmidas 49
   7.2 Área do Recuo 53
   7.3 Diferenças de Vegetação nos Rejeitos e na Frente da Barragem 54

8. ANÁLISE DE IMAGEM ÓPTICA DE SATÉLITE COM VHR 56
   8.1 Lago de Decantação Dentro dos Rejeitos e Áreas Úmidas 57
   8.2 Diferenças de Vegetação na Face da Barragem e Sobre os Rejeitos 60
   8.3 Atividade Antrópica/Alterações 62

9. ANÁLISE DE VÍDEO 67
   9.1 Métodos 70
   9.2 Resultados da análise de vídeo 72

10. ANÁLISE DO VÍDEO DO DRONE 81

11. CONCLUSÕES 85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferença de altura entre as topografias original e pré-rompimento, com relação aos rejeitos, a partir da crista da Barragem 3

Figura 2: Diferença de altura entre as topografias originais e pré-rompimento, incluindo o maciço e os rejeitos sob o maciço 4

Figura 3: Diferença de altura entre topografias pré- e pós-rompimento 5

Figura 4: TWI da pegada da Barragem I 6

Figura 5: Localização do prisma instalado na Barragem I 7

Figura 6: (De cima para baixo) Dados (componentes x, y, e z) para prismas CFJB1MP001, CFJB1MP002, e CFJB1MP003 8

Figura 7: (De cima para baixo) Dados para prismas CFJB1MP004, CFJB1MP005, CFJB1MP006, e CFJB1MP007 10

Figura 8: (De cima para baixo) Dados para prismas MT01-BI, MT02-BI, MT03-BI, MT04-BI 11

Figura 9: (De cima para baixo) Dados para prismas MT05-BI, MT06-BI e MT07-BI 12

Figura 10: (De cima para baixo) Dados de 2018 para prismas MT01-BI, MT02-BI, MT03-BI, MT04-BI 13

Figura 11: (De cima para baixo) Dados de 2018 para prismas MT05-BI, MT06-BI, e MT07-BI 14

Figura 12: Posição e cobertura de área do radar IBIS-FM 15

Figura 13: Mapa de deformação cumulativa do radar IBIS-FM, cobrindo: (a) momento do rompimento, (b) 2 h antes do rompimento, (c) 4 h antes do rompimento, (d) 12 h antes do rompimento, (e) 24 h antes do rompimento, e (f) 48 h antes do rompimento 17

Figura 14: Mapas mensais de deformação cumulativa por radar (a imagem (a) corresponde a março de 2018 com imagens subsequentes identificadas por letras, seguindo ordem cronológica até dezembro de 2018) 19

Figura 15: Mapa de deformação cumulativa de 2 de janeiro de 2019 a 25 de janeiro de 2019 20

Figura 16: Mapa mensal da deformação cumulativa de 1 de março de 2018 a 1 de abril de 2018 20

Figura 17: Séries temporais de deformação de áreas selecionadas (conforme localizadas no mapa de deformação cumulativa na Figura 16) 21

Figura 18: Esboço mostrando a geometria da linha de visão do radar e a convenção de sinal 21

Figura 19: Mapa mensal de deformação cumulativa de 19 de dezembro de 2018 a 19 de janeiro de 2019 22

Figura 20: Mapa de deformação cumulativa de 18 de janeiro de 2018 a 19 de janeiro de 019 22

Figura 21: (a) Mapa de deformação cumulativa para uma canaleta de superfície de concreto, de 14 de novembro de 2018 a 25 de janeiro de 2019 e (b) Séries temporais de deformação correspondentes 23

Figura 22: Comparação entre (a) mapa de deformação cumulativa do radar em abril de 2018 e (b) o mapa de velocidade L-O obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019 24

Figura 23: Comparação entre (a) mapa de deformação cumulativa do radar em abril de 2018 e (b) mapa de velocidade vertical obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019 25

Figura 24: Imagem ampliada da parte superior da barragem, mostrando o mapa de deformação cumulativa pelo radar em abril de 2018 e o mapa de velocidade L-O obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019 26

Figura 25: Imagem ampliada da pparte superior da barragem, mostrando o mapa de deformação cumulativa do radar em abril de 2018 e o mapa de velocidade vertical obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019 27

Figura 26: Mapa de deformação cumulativa de 11 de junho de 2018 às 11h59, até 11 de junho de 2018 15h58 28

Figura 27: Séries temporais de deformação média da área 1 e da área 2 a partir de 11 de junho de 2018 11h59 até 11 de junho de 2018 15h58 29

Figura 28: (a) Mapa de deformação cumulativa em “movimento lento” de 1 de março de 2018 a 24 de janeiro de 2019 e (b) Série temporal de deformação de pontos selecionados (conforme localizado no mapa de deformação cumulativa) 30

Figura 29: (a) Mapa de deformação cumulativa em “movimento lento” de 4 de outubro de 2018 a 24 de janeiro de 2019 e (b) Série temporal de deformação de pontos selecionados (conforme localizado no mapa de deformação cumulativa) 31

Figura 30: Mapa de velocidade do conjunto de dados InSAR Sentinel 1, de 3 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019, mostrando (a) todos os pontos e (b) apenas os pontos em movimento 32

Figura 31: Mapa de velocidade do conjunto de dados InSAR Sentinel 1, de 3 de Janeiro de 2018 a 22 de Janeiro de 2019 (polígonos de setores em movimento da Barragem I estão identificados em vermelho) 33

Figura 32: Mapa de velocidade do conjunto de dados InSAR Terrasar-X de 8 de Fevereiro de 2018 a 15 de Janeiro de 2019, mostrando (a) todos os pontos e (b) apenas os pontos em movimento 34

Figura 33: Esboço com combinação de dados InSAR de órbitas ascendentes e descendentes, ao longo do perfil da Barragem I 34

Figura 34: Mapa de velocidade a partir de dados decompostos InSAR Terrasar-X – Sentinel-1: (a) para componentes L-O e (b) componentes verticais 35

Figura 35: Mapa de velocidade a partir de dados decompostos InSAR Cosmoskymed para (a) componentes L-O e (b) componentes verticais 36

Figura 36: Comparação entre conjuntos de dados de deformações cumulativas medidas pelo Sentinel-1 (a) de 3 de janeiro de 2018 a 7 de agosto de 2018 e (b) de 3 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019 37

Figura 37: Série temporal de deformações de pontos InSAR para dados do Sentinel-1, localizados na parte inferior da Barragem I (na Figura 31) para: (a) Área 1, (b) Área 2, e (c) Área 3 38

Figura 38: Série temporal de deformação de pontos InSAR para o conjunto de dados do Sentinel-1 na parte superior da Barragem I, pertencente à Área 5 da Figura 31 39

Figura 39: Mapa de velocidade vertical do InSAR, visualizado sobre a espessura dos rejeitos . 40

Figura 40: Topografia da Barragem I antes do rompimento mostrando as localizações de três seções transversais 41

Figura 41: Seção transversal AB, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR TerraSAR-X-Sentinel-1 42

Figura 42: Seção transversal CD, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR Terrasar-X-Sentinel-1 42

Figura 43: Seção transversal EF, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR Terrasar-X-Sentinel-1 43

Figura 44: Seção transversal EF, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR Terrasar-X-Sentinel-1, para diferentes subperíodos de todo o período de tempo coberto pelos conjuntos de dados 43

Figura 45: Vista tridimensional dos dados do satélite InSAR, visualizados sobre a Barragem e TWI 44

Figura 46: Comparação entre: (a) dados InSAR e precipitação diária, (b) dados InSAR e precipitação mensal, e (c) dados InSAR e precipitação cumulativa para os pontos localizados no pé da Barragem I 46

Figura 47: Comparação entre: (a) dados InSAR e precipitação diária, (b) dados InSAR e precipitação mensal, e (c) dados InSAR e precipitação cumulativa para os pontos localizados na crista da Barragem I 47

Figura 48: Comparação entre: (a) dados InSAR e precipitação diária e (b) dados InSAR e precipitação cumulativa para os pontos localizados dentro dos rejeitos 48

Figura 49: Dinâmica do lago de decantação (retratada em azul) na Barragem I em S-2: (a) 22 de janeiro de 2018, (b) 1 de junho de 2018, (c) 21 de julho de 2018, (d) 15 de agosto de 2018, (e) 23 de setembro de 2018, e (f) 18 de dezembro de 2019 50

Figura 50: Dinâmica da área úmida (contorno branco) na Barragem I em S-2: (a) 13 de março de 2018, (b) 1 de junho de 2018, (c) 21 de julho de 2018, (d) 18 de dezembro de 2018, (e) 7 de janeiro de 2019, e (f) 22 de janeiro de 2019 51

Figura 51: Dados S-2 para 27 de abril de 2018. elaborações usadas para identificar a área úmida e lago de decantação na parte de dentro. (a) RGB 12-8-3; (b) RGB 8a-11-12; (c) RGB 8-4-3; (d) NDWI 52

Figura 52: Comparação entre (a) 24 de setembro de 2018, (b) 18 de dezembro de 2018, (c) e 7 de janeiro de 2019, composições s-2 rgb 8a-11-12. É possível detectar a presença de um segundo lago de decantação em (a) 24 de setembro de 2018, (b) a presença de dois lagos de decantação em 18 de dezembro de 2018, e (c) o aumento geral da superfície de água em 7 de janeiro de 2019 52

Figura 53: Comparação entre elaborações S-2 NDWI que mostram a diminuição progressiva da superfície da água na parte norte da Barragem I para (a) 7 de janeiro de 2019, (b) 17 de janeiro de 2019, e (c) 22 de janeiro de 2019 53

Figura 54: Comparação entre as elaborações S-2 NDWI E NDVI, mostrando o teor de umidade na área do recuo da barragem de dezembro de 2018 ao início de janeiro de 2019, com relação aos valores de outubro de 2018: (a) 14 de outubro de 2019, (b) 18 de dezembro de 2019, e (c) 7 de janeiro de 2019 54

Figura 55: Comparação entre as aquisições do S-2 em (a) 7 de janeiro de 2019 e (b) após 10 dias (17 de janeiro de 2019). Observe a redução da área úmida na parte norte da Barragem I 56

Figura 56: Coluna da esquerda: dinâmica do lago de decantação e da área úmida de junho de 2018 a janeiro de 2019: (a) 2 de junho de 2018, WV3 RGB 654; (b) 22 de Julho de 2018, WV3 654; (c) 23 de Setembro de 2018, GE-1 RGB 432; (d) 18 de janeiro de 2019, Pléiades RGB 432. Coluna da direita: detalhe da área úmida (linha branca) e lago de decantação (polígono azul) 59

Figura 57: Possível represamento do emboque principal da Barragem I por uma berma de terra. (a) área em junho de 2018; (b) início do represamento do emboque em setembro de 2018; (c) o represamento está completo em janeiro de 2019; e (d) a água se concentra a montante, o que é confirmado pelo índice NWVI 60

Figura 58: Comparação entre os índices NDVI de junho de 2018 a janeiro de 2019: (a) 2 de junho de 2019; (b) 22 de julho de 2018; (c) 23 de setembro de 2018; (d) 18 de janeiro de 2019 61

Figura 59: Comparação entre principais condições sazonais: (esquerda) imagem de junho de 2018 do WV-3 (DS 641 e NDVI) e (direita) imagem de julho de 2018 do WV-3 (DS 641 e NDVI) 61

Figura 60: WV-3 de 2 de junho de 2018. Esquerda para a direita: composição de falsa cor RGB 654, pan, e NDWI 62

Figura 61: Imagens pan de todas as quatro datas em VHR: (a) 2 de junho de 2018, (b) 22 de julho de 2018, (c) 23 de setembro de 2018, e (d) 18 de julho de 2019 63

Figura 62: Comparação entre imagens pan do Pleaides e GE-1 de 23 de setembro de 2018 e 18 de janeiro de 2019 64

Figura 63: Dados Pluviométricos diários (barras azuis) de 1 de janeiro de 2018 a 30 de junho de 2018. A posição cronológica das imagens de satélite é mostrada pelas setas vermelhas 65

Figura 64: Dados pluviométricos diários (barras azuis) de 1 de julho de 2018 a 30 de setembro de 2018. A posição cronológica das imagens de satélite é mostrada pelas setas vermelhas 66

Figura 65: Dados pluviométricos diários (barras azuis) de 1 de outubro de 2018 a 25 de janeiro de 2019. A posição cronológica das imagens de satélite é mostrada pelas setas vermelhas 67

Figura 66: Captura de tela verificando o horário da câmera, com relação ao horário UTC 68

Figura 67: Captura de tela verificando a diferença entre o horário UTC e o horário refletido nas configurações da câmera 69

Figura 68: Exemplo de um único quadro extraído da câmera em frente à Barragem I antes do rompimento 69

Figura 69: Esboço dos componentes da deformação específica relativa horizontal e vertical e sua formulação matemática, de acordo com uma origem de referência arbitrária 70

Figura 70: Ambiente de modelagem com grade FEM, pontos de referência e contornos de modelagem 71

Figura 71: Análise de deformação e detecção de mudanças quadro a quadro da Barragem I 73

Figura 72: Quadro 003. A deformação específica inicial se desenvolve na parte central superior da Barragem I 73

Figura 73: Após 0,2 s do início da deformação na crista da barragem, um abaulamento começa a se desenvolver na parte central direita da face da Barragem 74

Figura 74: Após 45 quadros, a deformação na crista da barragem está se acelerando rapidamente, enquanto o abaulamento da face da barragem está maior e ainda é positivo 75

Figura 75: Estágio final da fase de deformação 1, na qual o abaulamento ainda é positivo e a crista da barragem está desmoronando amplamente 76

Figura 76: Mudança de predominantemente abaulamento para predominantemente colapso vertical na parte central direita da face da barragem 76

Figura 77: No quadro 120, as duas zonas do rompimento se juntam e inicia o rompimento geral da barragem 77

Figura 78: Resumo da análise de rastreamento de pontos do quadro 0 (tempo = 0 S) até o quadro 120 (tempo = 4 S) do componente *V* modelado 78

Figura 79: Análise detalhada de rastreamento de pontos do quadro 0 (hora = 0 S) ao quadro 30 (hora = 1 S) do componente *V* modelado 79

Figura 80: Resumo da análise de rastreamento de pontos do quadro 0 (hora = 0 S) ao quadro 120 (hora = 4 S) do componente *U* modelado 80

Figura 81: Análise detalhada de rastreamento de pontos do quadro 0 (hora = 0 S) ao quadro 30 (hora = 1 S) do componente *U* modelado 80

Figura 82: Filmagem do drone aos 06:50 do vídeo DJI_0143.mov, mostrando vegetação mais verde na parte inferior da barragem, se comparada com as porções central e superior 82

Figura 83: Filmagem do drone aos 06:20 do vídeo DJI_0142.mov 82

Figura 84: Filmagem do drone aos 05:32 do vídeo DJI_0143.mov, mostrando a canaleta de drenagem com lama marrom e água corrente 83

Figura 85: Filmagem do drone aos 02:10 do vídeo DJI_0142.mov 83

Figura 86: Filmagem do drone aos 01:48 do vídeo DJI_0143.mov, mostrando uma morfologia irregular na parte central da barragem 84

Figura 87: Filmagem do drone aos 09:30 do vídeo DJI_0142.mov, mostrando uma característica linear paralela à parte inferior do sétimo alteamento 84

1. INTRODUÇÃO

Este Apêndice apresenta a análise integrada da imagens disponíveis (radar interferométrico de abertura sintética ("InSAR"), radar e vídeo e filmagem de drones), dados topográficos, leituras dos prismas e dados de pluviometria da Mina do Córrego do Feijão I ("Barragem I") da Vale S.A. ("Vale") em Brumadinho, Brasil, de um o período de um ano antes do rompimento da Barragem I. Esta análise inclui a localização de zonas de deformação e áreas úmidas (via Sentinel ou outras imagens de satélite apropriadas), bem como a avaliação do volume de rejeitos retidos pela barragem. Esta Apêndice também inclui uma análise detalhada/com lapso de tempo do vídeo da Barragem I na data do rompimento, que foi usada para assistir a análise do mecanismo de rompimento. Após uma breve descrição inicial das fontes de dados, o Apêndice descreve os principais resultados das análises dos diferentes conjuntos de dados investigados.

2. FONTE DE DADOS

Os principais conjuntos de dados analisados incluem:

- Dados topográficos: curvas de nível pré-barragem da área da Barragem I, dados de LiDAR (da sigla em inglês *Light Detection and Ranging*) pré-rompimento da Barragem I de setembro de 2018 e dados LiDAR pós-rompimento da Barragem I de fevereiro de 2019.
- Dados de leituras dos prismas: 14 prismas localizados na crista da Barragem I, lidos mensalmente pela Vale com uma estação total (ou seja, um instrumento eletrônico/óptico usado para topografia, composto por um teodolito integrado com medição eletrônica de distância ("EDM") para medir os ângulos verticais e horizontais e a distância do instrumento até um ponto específico), operado manualmente, cobrindo o período de 31 de agosto de 2011 a 12 de dezembro de 2018.
- Dados de radar: dados de radar de solo coletados pelo sistema IBIS-FM, cobrindo o período de 1 de março de 2018 a 25 de janeiro de 2019, com 480 imagens/dia, incluindo processamento em tempo real e em "Movimento Lento".
- Satélite InSAR: medições obtidas a partir das imagens do processamento interferométrico de múltiplas imagens de radar de satélite de abertura sintética ("SAR") para os seguintes conjuntos de dados:
    - Órbitas descendentes do Sentinel-1: 30 imagens cobrindo o período de 3 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019;
    - Órbitas ascendentes do TerraSAR-X: 28 imagens cobrindo o período de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019;
    - Componentes Sentinel-1 e TerraSAR-X decompostos vertical e leste a oeste ("L-O") dos vetores de deformação, cobrindo o período de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019;
    - Órbitas ascendentes do CosmoSkyMed: 24 imagens cobrindo o período de 23 de setembro de 2017 a 13 de novembro de 2018;

  - Órbitas descendentes CosmoSkyMed: 76 imagens cobrindo o período de 7 de setembro de 2017 a 24 de janeiro de 2019; e
  - Componentes CosmoSkyMed decompostos verticais e componentes L-O e dos vetores de deformação, cobrindo o período de 23 de setembro de 2017 a 13 de novembro de 2018.

- Imagens multiespectrais de satélite em alta resolução: 19 imagens multiespectrais coletadas pelo satélite Sentinel-2 em alta resolução [10 metros (m) a 60 m], cobrindo o período de 22 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019, analisadas para a identificação de áreas úmidas, a presença de superfícies de água, cobertura vegetal e atividade humana na Barragem I e dentro dos rejeitos.
- Imagens multiespectrais de satélite em altíssima resolução: oito imagens multiespectrais coletadas pelos satélites WorldView-3, GeoEye-1 e Pléiades em altíssima resolução (0,31 m a 30 m), cobrindo o período de 2 de junho de 2018 a 18 de janeiro de 2019, analisadas para a identificação de áreas úmidas, da presença de superfícies de água, de cobertura vegetal e de atividade humana na Barragem I e dentro dos rejeitos.
- Dados pluviométricos: dados coletados pelo pluviômetro F18 localizado a aproximadamente 1,4 km (quilômetros) a noroeste (NO) da Barragem I durante o período de janeiro de 2018 a fevereiro de 2019, analisados para a identificação de correlações com os dados do satélite InSAR e da análise de imagem óptica do satélite.
- Vídeos: um vídeo frontal e um vídeo da parte posterior da Barragem I capturando o momento do colapso da barragem e imediatamente após o início do rompimento (especificações de vídeo: RGB24, mp4, 24 bits por pixel, velocidade: 30 quadros por segundo ("fps"), altura: 1080 pixels, largura: 1920 pixels).
- Filmagem por drone: dois vídeos de um drone filmados em 18 de janeiro de 2019 – uma semana antes do rompimento – foram analisados para identificar qualquer evidência de deformações existentes ou passadas.

3. ANÁLISE DE DADOS TOPOGRÁFICOS

O escopo da análise de dados topográficos pode ser resumido como se segue:

- a avaliação da espessura e do volume dos rejeitos, com base na comparação quantitativa entre as curvas de nível pré-barragem e a nuvem de pontos LiDAR pré-rompimento;
- a avaliação do volume perdido durante o rompimento da Barragem I, comparando as nuvens de pontos LiDAR pré-rompimento (setembro de 2018) e pós-rompimento (fevereiro de 2019); e
- Cálculo do Índice Topográfico de Umidade ("TWI") usando a topografia pré-barragem para identificar os caminhos de fluxo hidrológico na topografia pré-barragem e sua localização em relação à topografia pré-rompimento.

Os diferentes dados topográficos foram importados e analisados em um ambiente de sistema de informações geográficas ("GIS"), a fim de calcular os parâmetros listados acima. Com base em curvas de nível e nuvens de pontos, e usando algoritmos de Krigagem, as superfícies triangulares foram determinadas e transformadas em arquivos de grade, para calcular a diferença de elevação, pixel por pixel.

3.1 Volume e Espessura de Rejeitos

Ao comparar a topografia pré-rompimento e nuvens de pontos LiDAR pré-rompimento, foi possível estimar o volume e a espessura dos rejeitos. O volume estimado de rejeitos armazenados na barragem no momento do rompimento era de 8.413.000 m^3 (metros cúbicos). Este número não inclui o maciço ou os rejeitos sob o maciço. Estima-se que a espessura dos rejeitos tenha atingido uma profundidade máxima de 76 m na parte central de armazenamento da barragem e ela se reduz gradualmente em espessura, movendo-se em direção ao leste, subindo o vale, afastando-se da crista da barragem. Os rejeitos no setor NO tinham uma espessura maior se comparados ao setor sudeste (SE) (Figura 1).

O volume total, incluindo o maciço e os rejeitos sob o maciço, é estimado em 12.726.000 m^3. A diferença máxima de elevação entre a topografia pré-barragem e pré-rompimento é de 76 m com relação à porção central da crista da barragem (Figura 2).

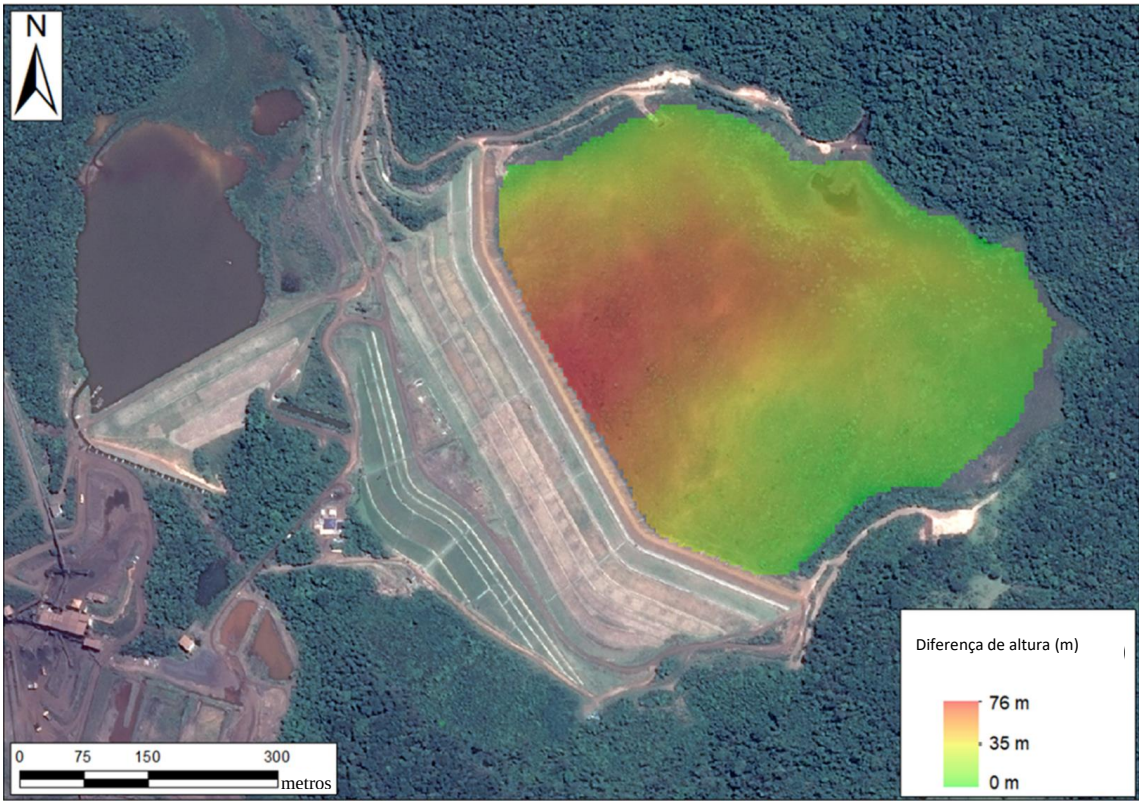


Figura 1: Diferença de altura entre as topografias original e pré-rompimento, com relação aos rejeitos, a partir da crista da Barragem

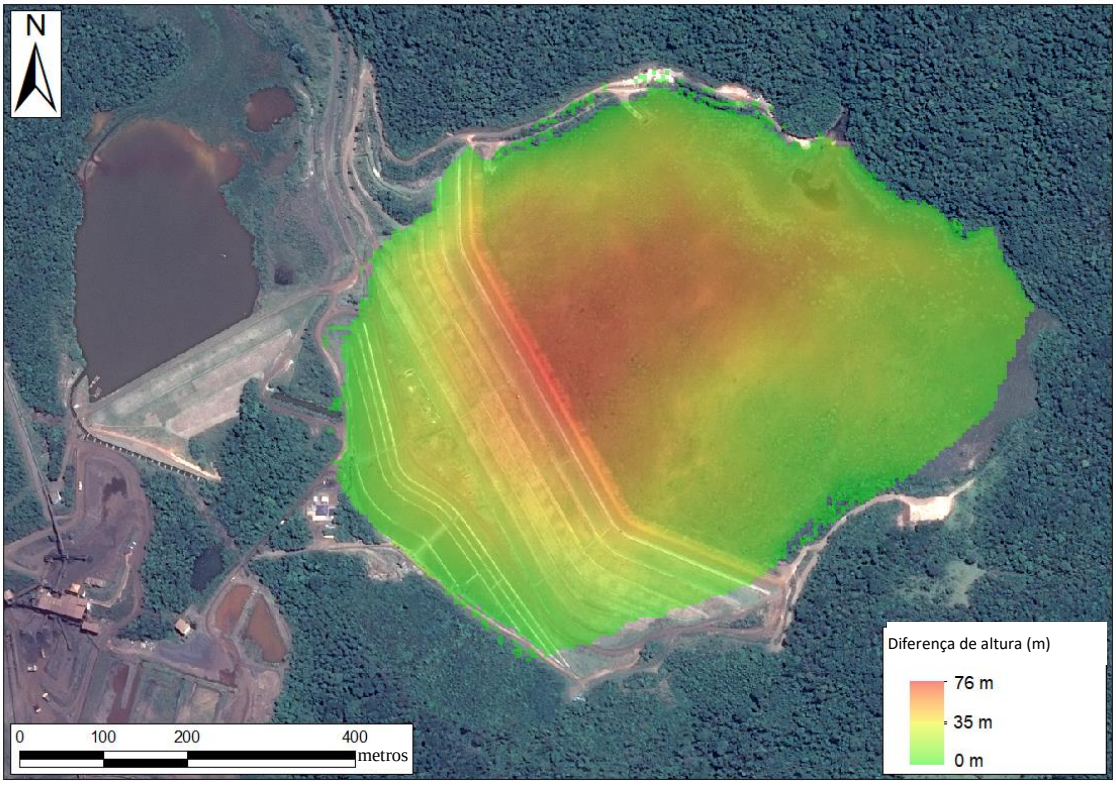


Figura 2: Diferença de altura entre as topografias originais e pré-rompimento, incluindo o maciço e os rejeitos sob o maciço

3.2 Volume de Material que Sofreu Rompimento

Ao comparar as topografias pré e pós-rompimento da Barragem I, o volume do rompimento é estimado em 9.651.000 m^3, incluindo os rejeitos, a barragem em si e porções de solos naturais. A diferença máxima de elevação entre as superfícies pré e pós-rompimento é de 79,2 m, localizada logo atrás da crista da barragem no centro (Figura 3).

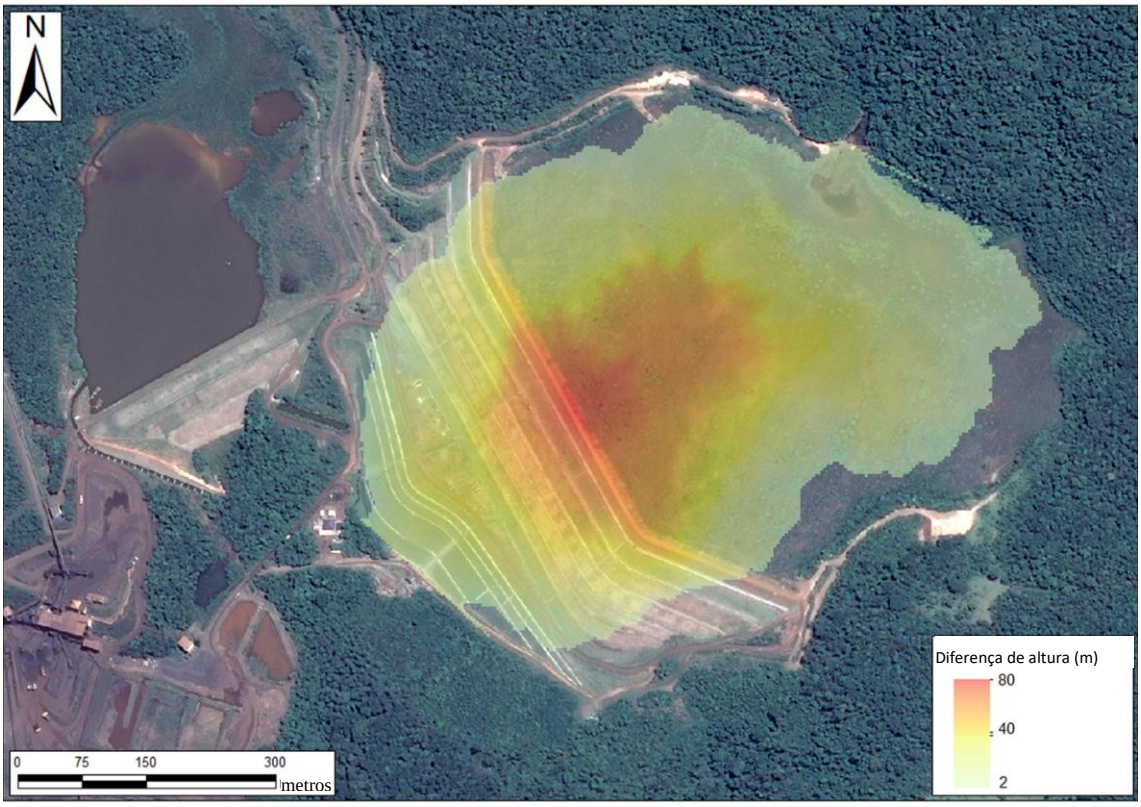


Figura 3: Diferença de altura entre topografias pré- e pós-rompimento

3.3 Índice Topográfico de Umidade

O TWI é normalmente usado para quantificar o controle topográfico em processos hidrológicos e para identificar caminhos de fluxos hidrológicos. É uma função do gradiente e da área de contribuição a montante por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo. Ele fornece uma estimativa do fluxo de água antes da construção da barragem. Valores altos de TWI indicam que a água está se acumulando. A distribuição espacial dos valores do TWI na área analisada revela que o acúmulo de fluxo, obtido ao calcular o TWI com a topografia original, está concentrado no pé da Barragem I, na parte sul, onde a face da barragem está virada para sudoeste (SO) (Figura 4).

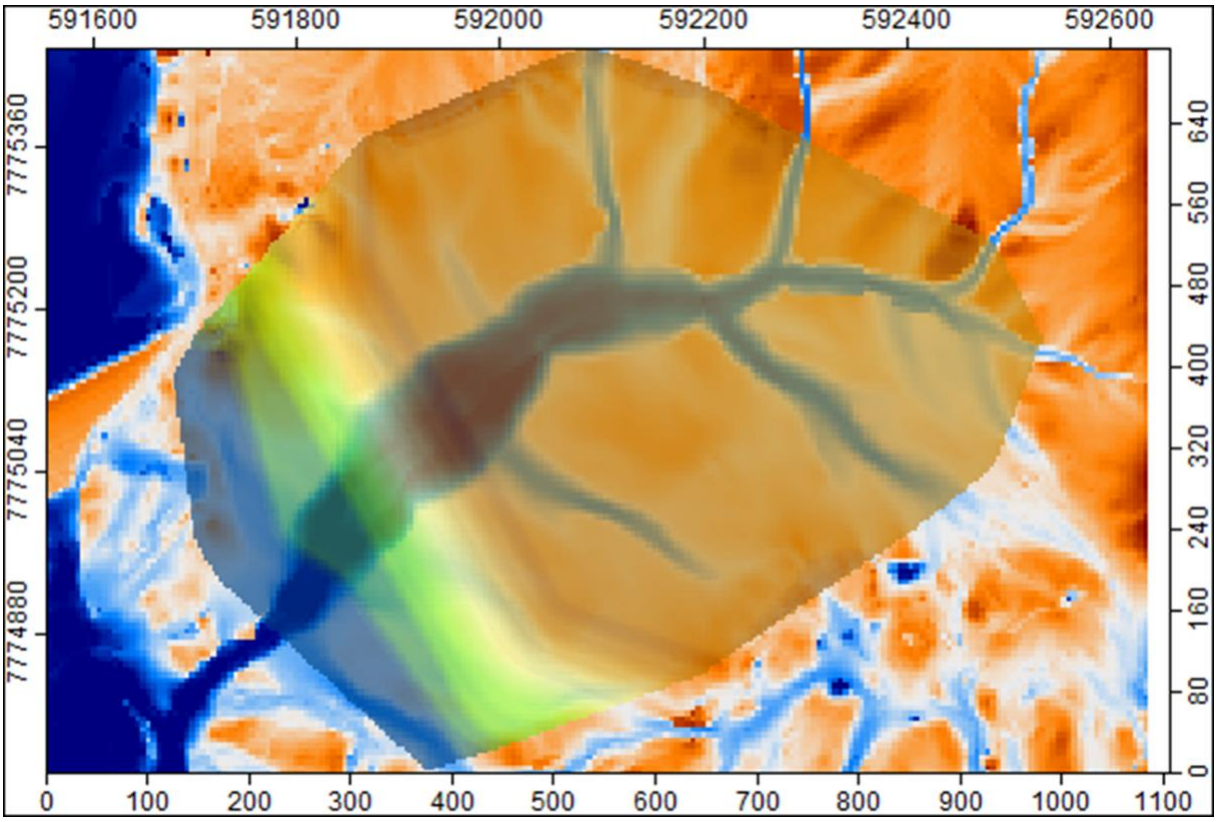


Figura 4: TWI da pegada da Barragem I

4. ANÁLISE DE PRISMAS

O principal objetivo da análise de prismas, que incluiu dados de 14 prismas localizados no topo da Barragem I (Figura 5), era determinar se as deformações de superfície foram detectadas pelo monitoramento do prisma e, se sim, analisar suas distribuições espaciais e temporais.

14 prismas estavam localizados na crista da barragem e estudados manualmente com uma estação total. Os 14 prismas correspondiam a sete posições no topo da Barragem I (os pontos denominados MT-XX-BI estão localizados na mesma posição dos pontos denominados CFJB1MXXX, mas estão cobrindo um período de tempo diferente).

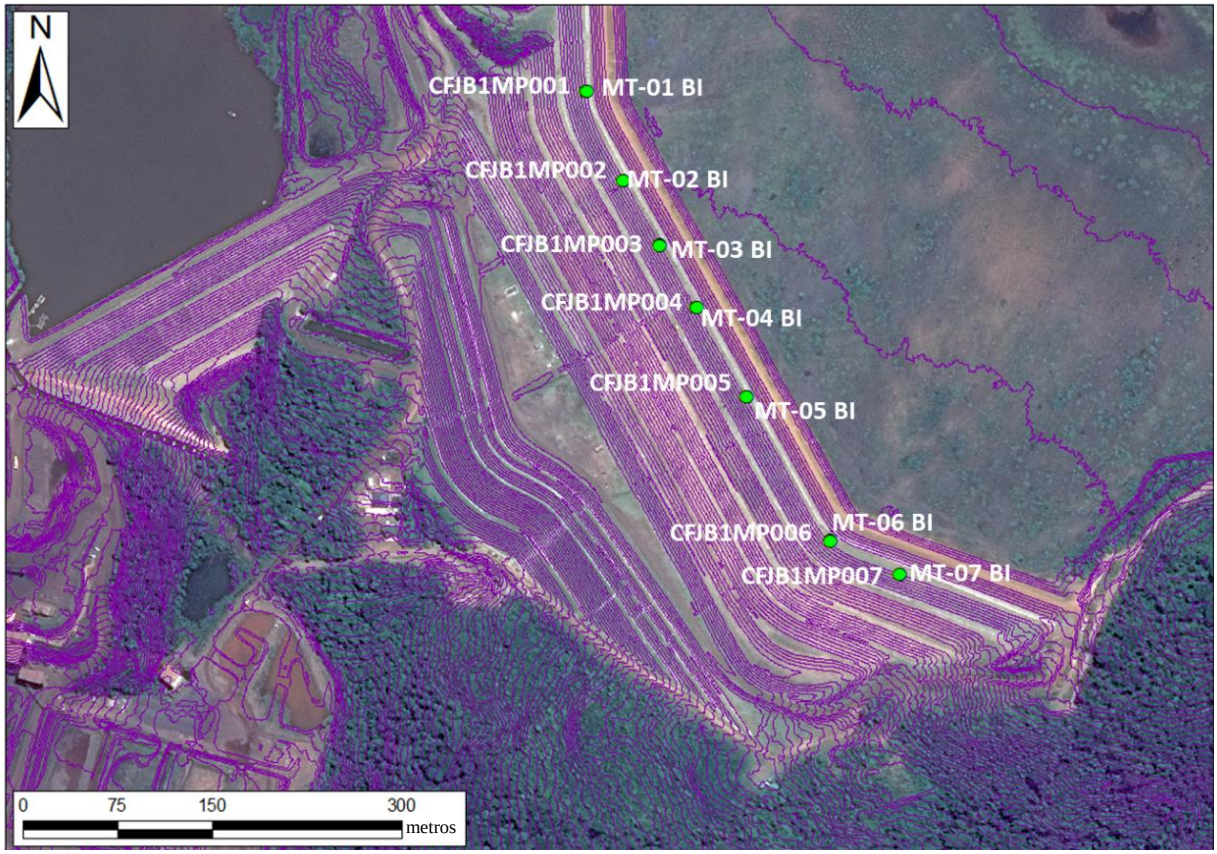


Figura 5: Localização do prisma instalado na Barragem I

Os dados adquiridos dos prismas CFJB1MP001, CFJB1MP003, CFJB1MP004, CFJB1MP005, CFJB1MP006, e CFJB1MP007 são de um período entre agosto de 2011 e setembro de 2016, com uma frequência de aquisição mensal (aproximadamente). Os dados do prisma CFJB1MP002 são de período entre agosto de 2011 e junho de 2015. Durante este intervalo de tempo, os dados não foram adquiridos continuamente; especificamente, os seguintes intervalos de tempo não foram cobertos:

- Dezembro de 2011;
- Julho, Novembro, e Dezembro de 2013;
- Novembro de 2014;
- Janeiro e Março de 2015; e
- De Julho de 2015 a Maio de 2016.

Os dados adquiridos pelos prismas MT-01 BI, MT-02 BI, MT-03 BI, MT-04 BI, MT-05 BI, MT-06 BI e MT-07 BI cobrem um intervalo de tempo entre março de 2017 e dezembro de 2018; os dados foram coletados mensalmente, exceto nos seguintes períodos:

- Junho de 2018, quando os dados foram coletados quatro vezes; e
- Outubro de 2018, quando os dados foram coletados duas vezes.

A última aquisição de dados dos prismas antes do rompimento foi em 12 de dezembro de 2018.

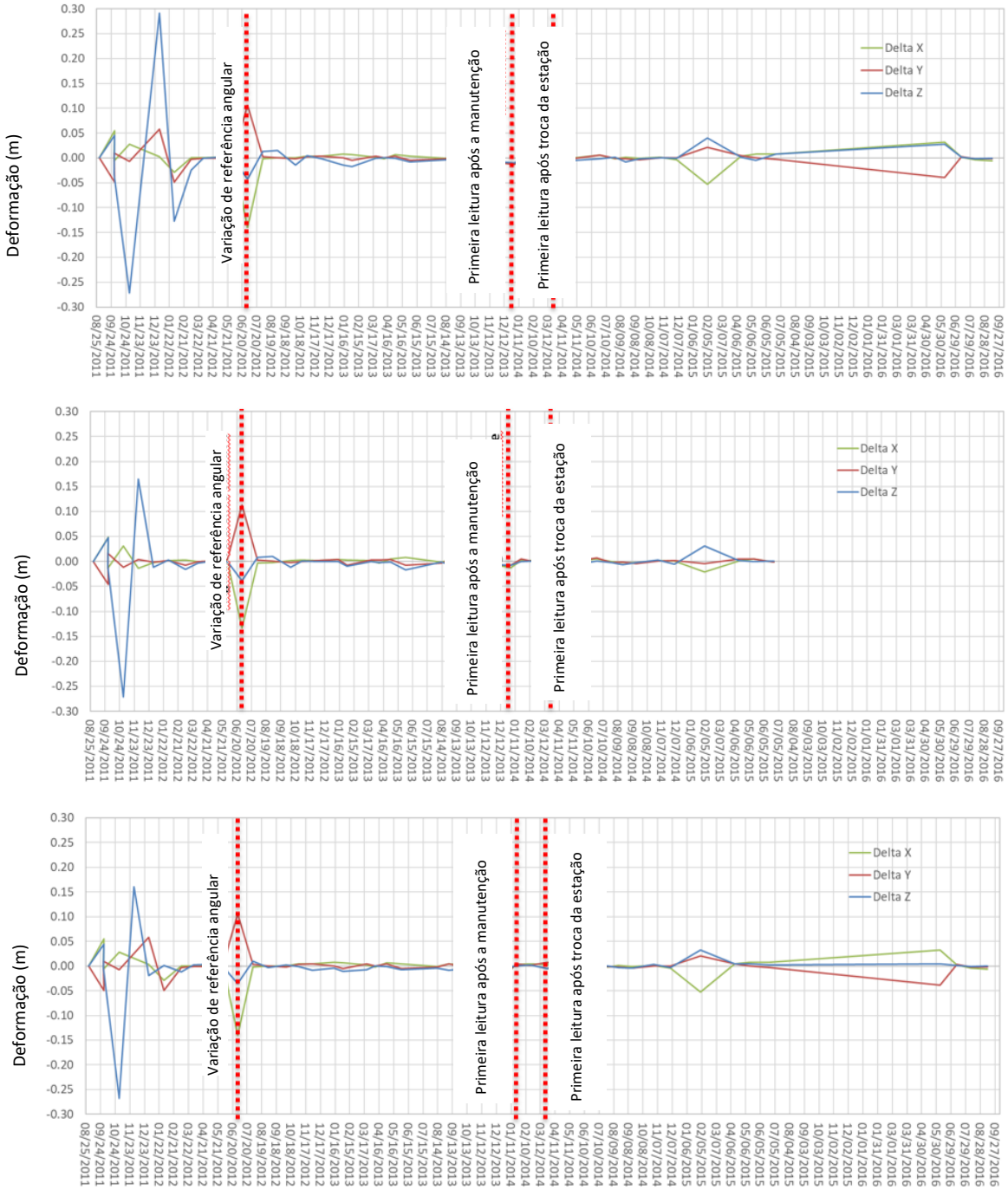
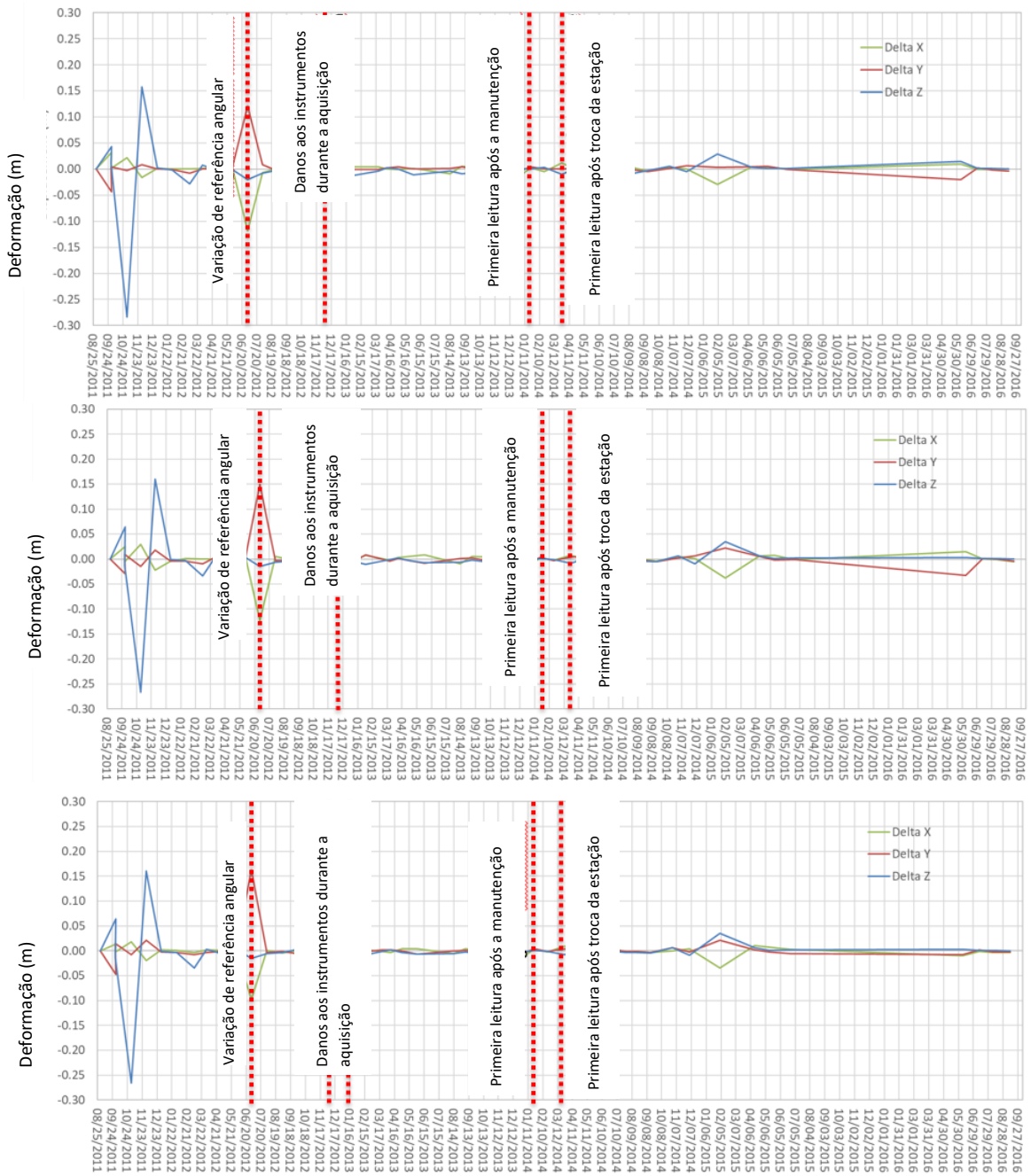


Figura 6: (De cima para baixo) Dados (componentes x, y, e z) para prismas CFJB1MP001, CFJB1MP002, e CFJB1MP003

Os dados nas Figuras 6 a 9 mostram picos; algumas vezes estes picos estavam associados a mudanças na configuração da estação total, mas em outros casos a origem dos picos não é clara. O nível de ruído (estimado considerando a diferença entre a deformação mínima e máxima medida, sem incluir os principais picos) é da ordem de centímetros, o que é compatível com a aquisição manual e a

distância do levantamento. Não foram detectadas tendências claras acima do nível de ruído durante o período de monitoramento, incluindo os últimos meses antes do rompimento (Figura 10 e Figura 11).



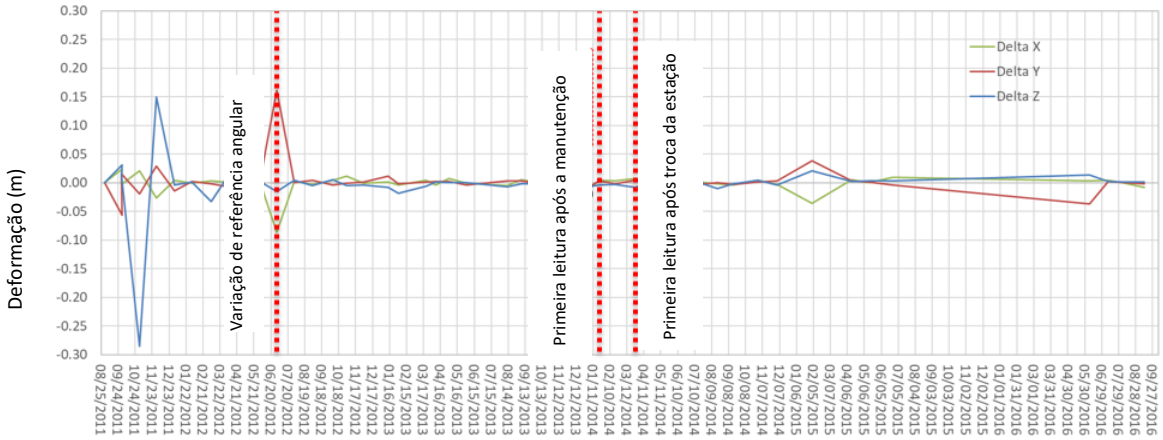
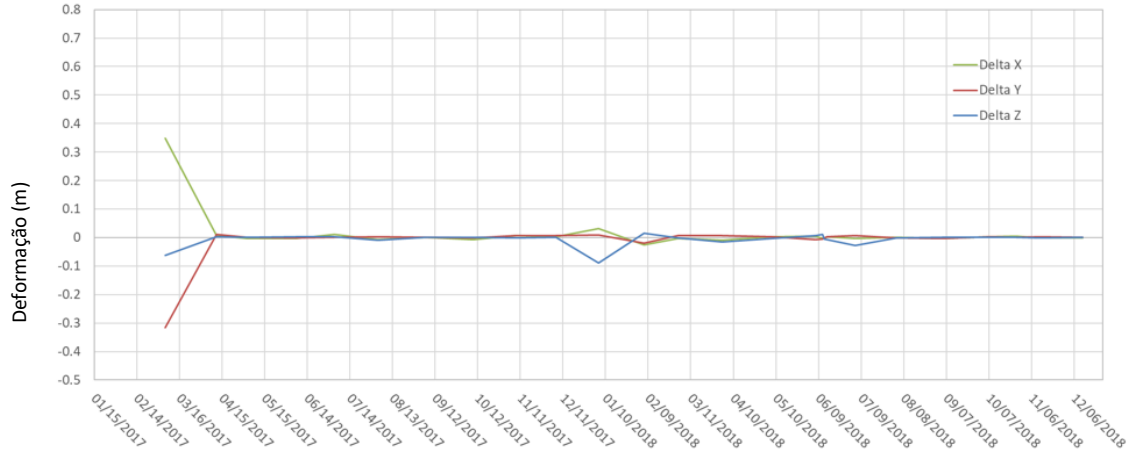


Figura 7: (De cima para baixo) Dados para prismas CFJB1MP004, CFJB1MP005, CFJB1MP006, e CFJB1MP007

Figura 8: (De cima para baixo) Dados para prismas MT01-BI, MT02-BI, MT03-BI, MT04-BI



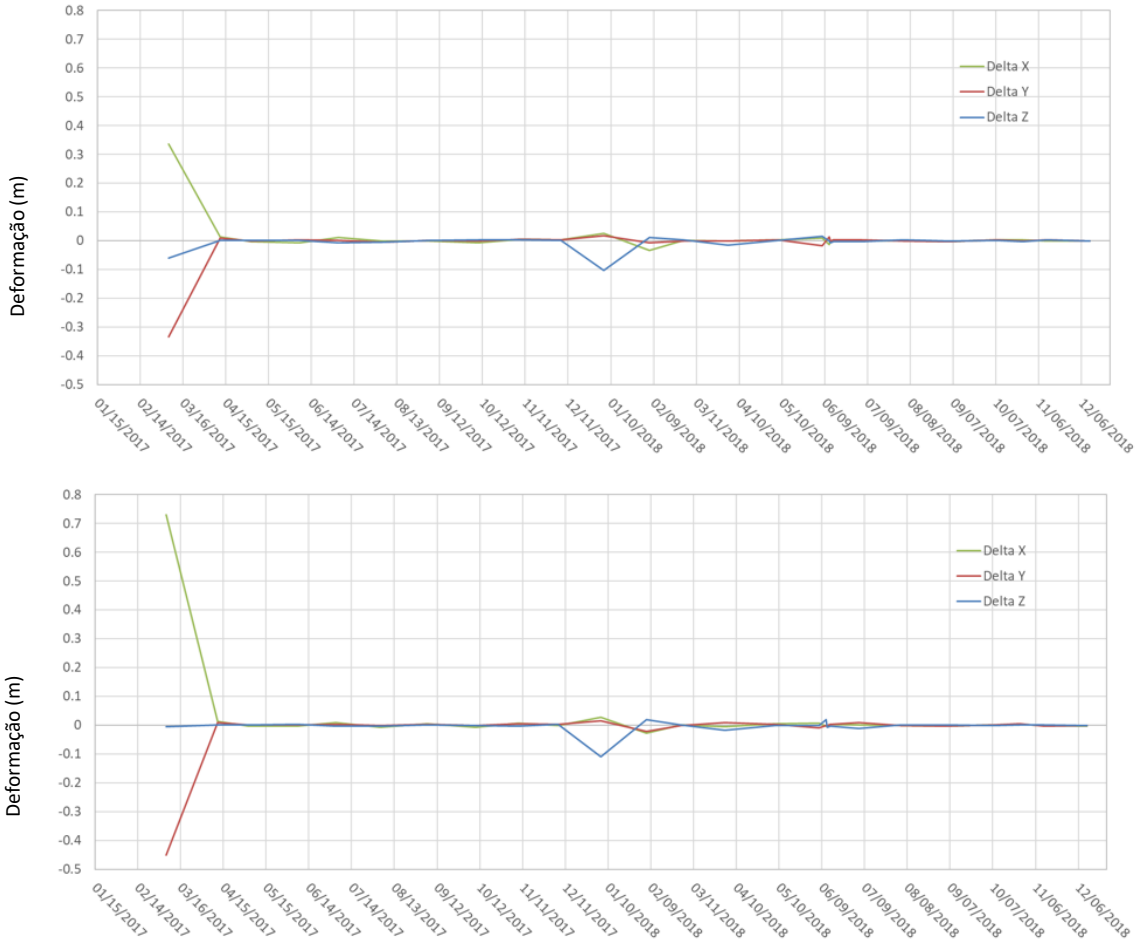
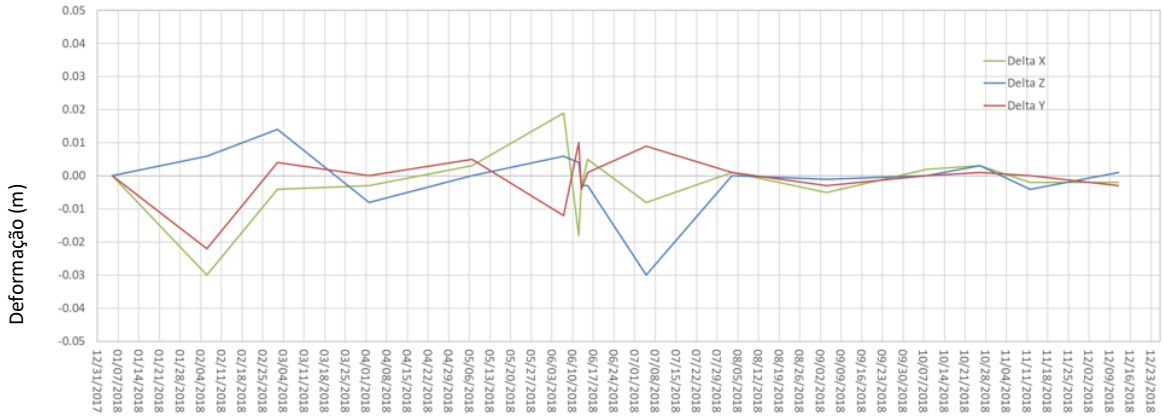


Figura 9: (De cima para baixo) Dados para prismas MT05-BI, MT06-BI e MT07-BI



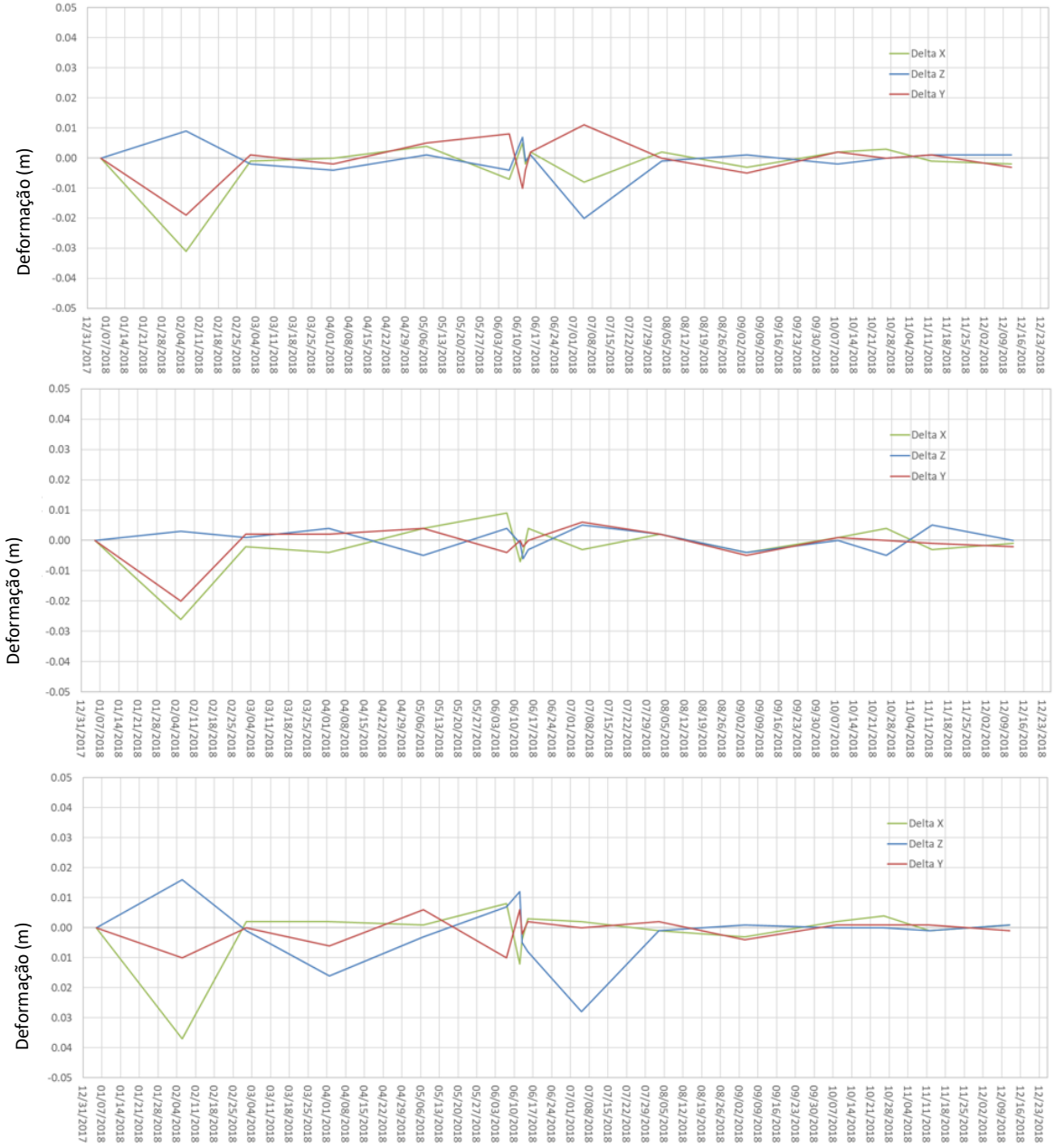


Figura 10: (De cima para baixo) Dados de 2018 para prismas MT01-BI, MT02-BI, MT03-BI, MT04-BI

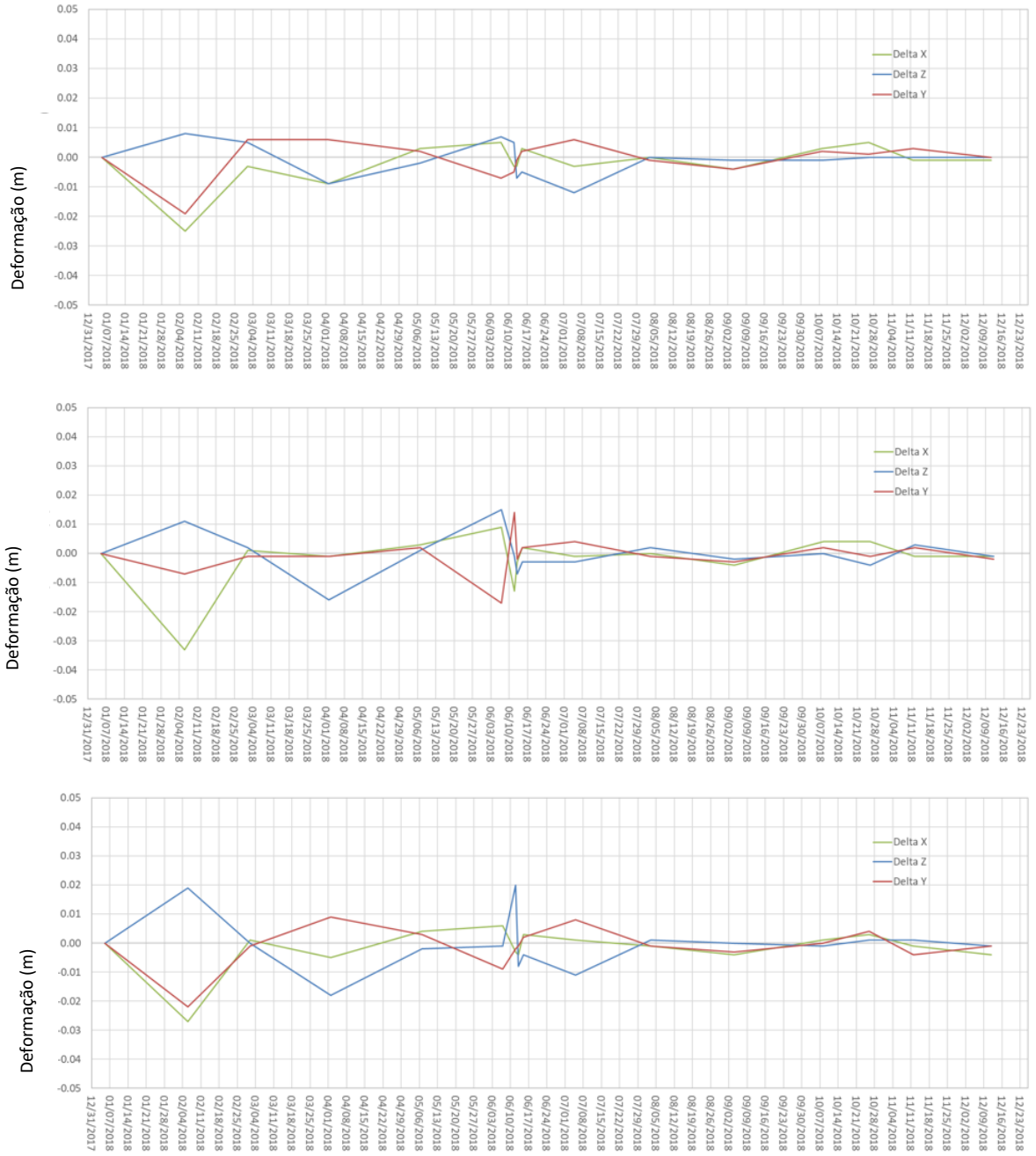


Figura 11: (De cima para baixo) Dados de 2018 para prismas MT05-BI, MT06-BI, e MT07-BI

5. ANÁLISE DE RADAR DE SOLO

Nós analisamos os dados adquiridos durante o período de março de 2018 até a data do rompimento pelo radar IBIS-FM, fabricado pela IDS Georadar e instalado na Barragem I. O propósito de analisar estes dados foi para determinar (i) se deformações de superfície foram detectadas pelo radar de solo; (ii) se as indicações produzidas pelo radar com relação a estas deformações eram precisas e confiáveis; e (iii) as distribuições espaciais e temporais de quaisquer deformações observadas.

A unidade de radar, instalada na área de estocagem a uma distância da barragem variando de 730 m a 1.160 m (ou seja, a parte inferior e superior da barragem, respectivamente), coletou dados a cada 3 minutos (min) (480 varreduras/dia em média) (Figura 12). Por conta da linha de visão, os dados do radar têm boa sensibilidade a deformações horizontais [ambas componentes norte (N) e leste (L)], mas baixa sensibilidade a deformações verticais, levandoo radar a ser capaz de medir deformações de barragens com componentes horizontais, mas menos capaz de medir deformações verticais.

Figura 12: Posição e cobertura de área do radar IBIS-FM

5.1 Dados em Tempo Real

Nós analisamos os dados processados em tempo real antes do rompimento, por meio do software IBIS Guardian, desenvolvido pela IDS Georadar. Nossa análise se concentrou nas seguintes perguntas:

- O radar detectou alguma deformação nas 48 horas (h) anteriores ao rompimento?
- Os dados do radar, enquanto processados em tempo real, detectaram alguma deformação durante o período de março de 2018 até a última imagem do radar antes do rompimento?
- As deformações registradas nos mapas mensais de deformação produzidos pelo software do radar são confiáveis ou correspondem a ruído?

A precisão dos dados do radar, processados em tempo real, foi estimada pela IDS Georadar, através da análise da frequência de distribuição das medidas de deformação coletadas sobre os pixels do

radar, caracterizadas por altos valores de refletividade antes do colapso. As medições de deformação fornecidas neste intervalo de tempo são distribuídas simetricamente em torno de zero, com um desvio padrão de 0,6 milímetros (mm), indicando a precisão da medição. Com base nesta análise, de acordo com a IDS Georadar, a velocidade mínima detectável do radar na configuração específica da Barragem I corresponde a 0,3 milímetros por hora (mm/h) ao longo da linha de visão do radar.

Considerando a precisão descrita acima, a análise dos mapas de deformação pelo radar nas últimas 48 horas anteriores ao rompimento não detectou nenhuma deformação acima do nível de ruído do radar (Figura 13). Ao aumentar a janela temporal dos mapas de deformação cumulativa, para incluir mapas de 2 h, 4 h, 12 h, 24 h, e 48 h antes do rompimento, é possível observar um aumento gradual nos valores de deformação com uma distribuição espacial dispersa, sem qualquer padrão consistente evidente. Interpretamos os valores de deformação medidos como o efeito do ruído acumulado induzido pela presença de vegetação na face da barragem.

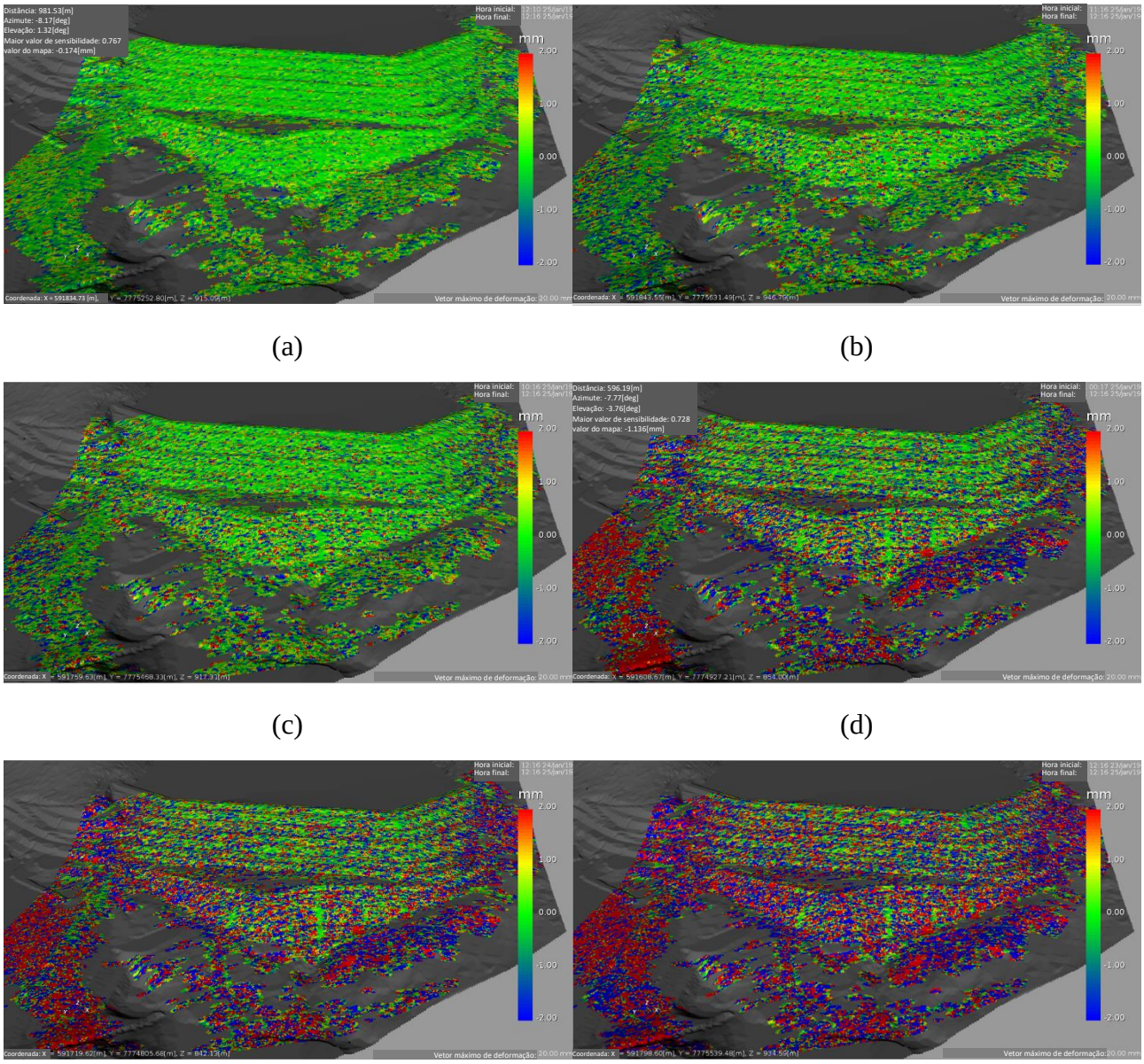


Figura 13: Mapa de deformação cumulativa do radar IBIS-FM, cobrindo: (a) momento do rompimento, (b) 2 h antes do rompimento, (c) 4 h antes do rompimento, (d) 12 h antes do rompimento, (e) 24 h antes do rompimento, e (f) 48 h antes do rompimento

O radar usa micro-ondas (neste caso, o radar está trabalhando na banda Ku, correspondendo a um comprimento de onda de 1,8 centímetro), as quais são afetadas pela constante dielétrica do material refletido. Vegetação tem baixa refletividade para o sinal do radar e é provável que seu crescimento e seu movimento sejam as principais causas do ruído identificado nos dados do radar. Tal vegetação pode induzir os seguintes efeitos nos dados do radar:

- descorrelação do sinal do radar (diminuição da coerência), principalmente em longo prazo;

- falsas deformações induzidas pela variação do teor de umidade na vegetação durante o dia; e
- vegetação nas laterais da barragem pode introduzir ruído nos dados do radar.

Os mapas mensais de deformação cumulativa, produzidos pelo radar entre março de 2018 e a data do rompimento, parecem identificar deformações superficiais significativas em diferentes setores da barragem, especialmente entre março e abril de 2018. A quantidade de deformação relatada de maio a outubro de 2018 é menor do que aquela mostrada nos mapas para o período de novembro de 2018 a janeiro de 2019. A quantidade mais alta e o maior número de áreas das supostas deformações aparecem nos mapas de março a abril de 2018.

As deformações reportadas têm sinais negativos e positivos, indicando deformações que se afastariam e se aproximariam do radar, respectivamente (Figura 14 e Figura 15). A quantidade da suposta deformação é significativa (variando de 200 a 700 mm em março de 2018 e de 100 a 380 mm em abril de 2018) e acima do nível de ruído estabelecido pelo fabricante do radar (ou seja, 0,3 mm/h).

Uma reavaliação dos dados do radar de solo revela que as deformações em longo prazo não estavam ocorrendo conforme foi reportado. Por exemplo, em abril de 2018, o radar de solo parecia mostrar grandes, novas e contínuas deformações superficiais de centenas de milímetros em áreas específicas. No entanto, o sinal de radar mostrado nos mapas mensais de deformação de março e abril de 2018 não é atribuível à deformação real, mas é provavelmente o resultado de ruído acumulado induzido por: (i) presença de vegetação na face da barragem, (ii) mudanças na umidade da vegetação/solo e (iii) artefatos atmosféricos residuais cumulativos não compensados adequadamente entre cada varredura consecutiva de radar (Figura 16 e Figura 17). Isto foi confirmado pelas fotografias tiradas na época.

As duas maiores áreas em que as deformações foram reportadas pelo radar de solo (Áreas 3 e 5 da Figura 16) as mostram se afastando do radar. Tal direção de deformação não é compatível com qualquer mecanismo razoável de rompimento , considerando a geometria da linha de visão do radar e a geometria da barragem (Figura 18).

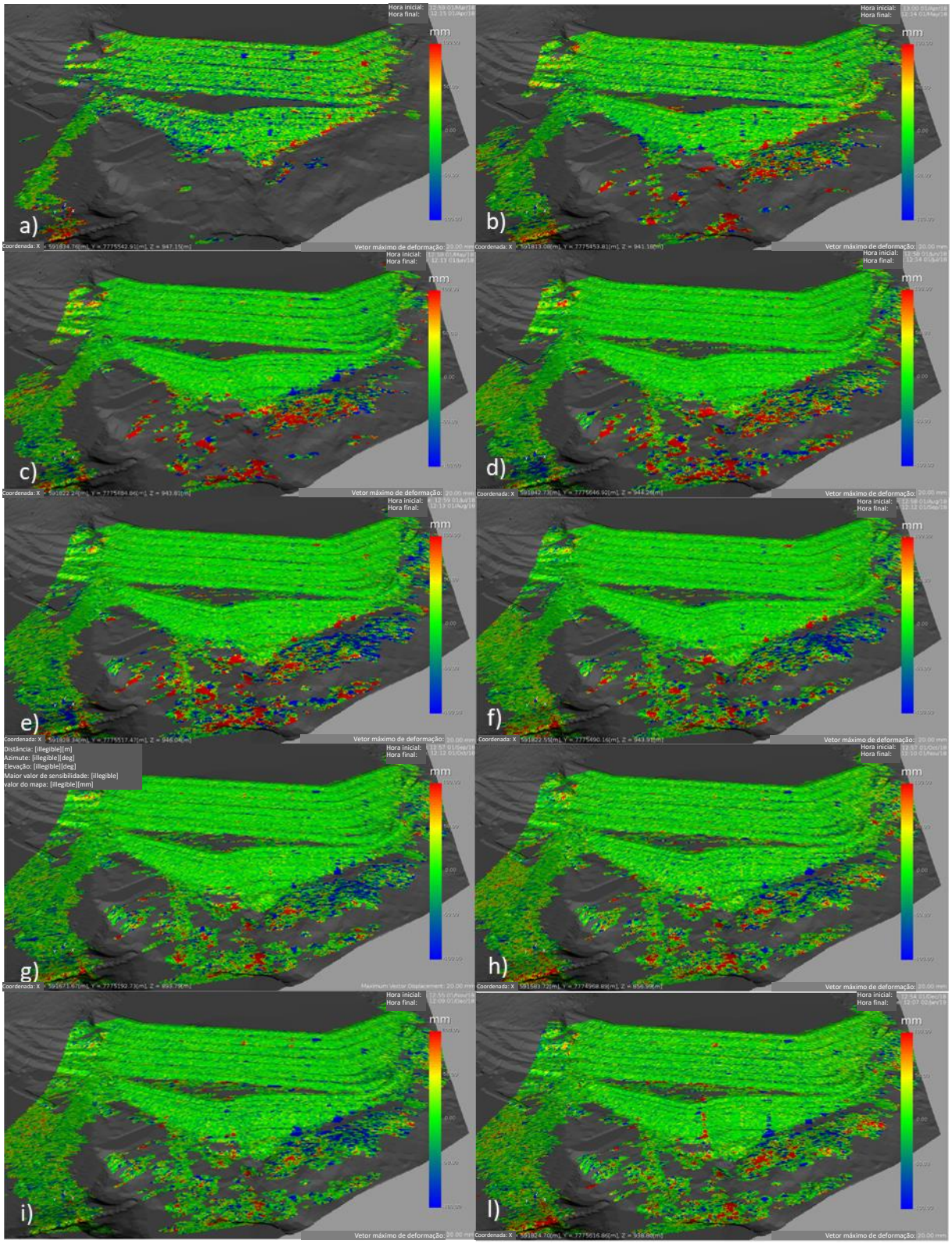


Figura 14: Mapas mensais de deformação cumulativa por radar (a imagem (a) corresponde a março de 2018 com imagens subsequentes identificadas por letras, seguindo ordem cronológica até dezembro de 2018)

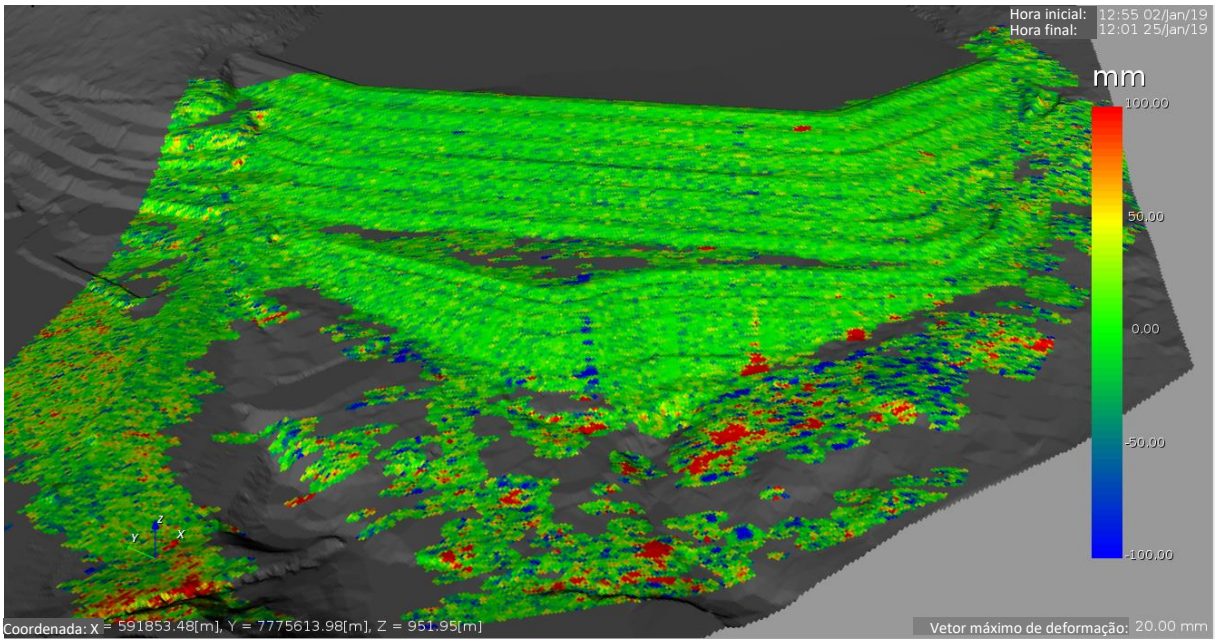


Figura 15: Mapa de deformação cumulativa de 2 de janeiro de 2019 a 25 de janeiro de 2019

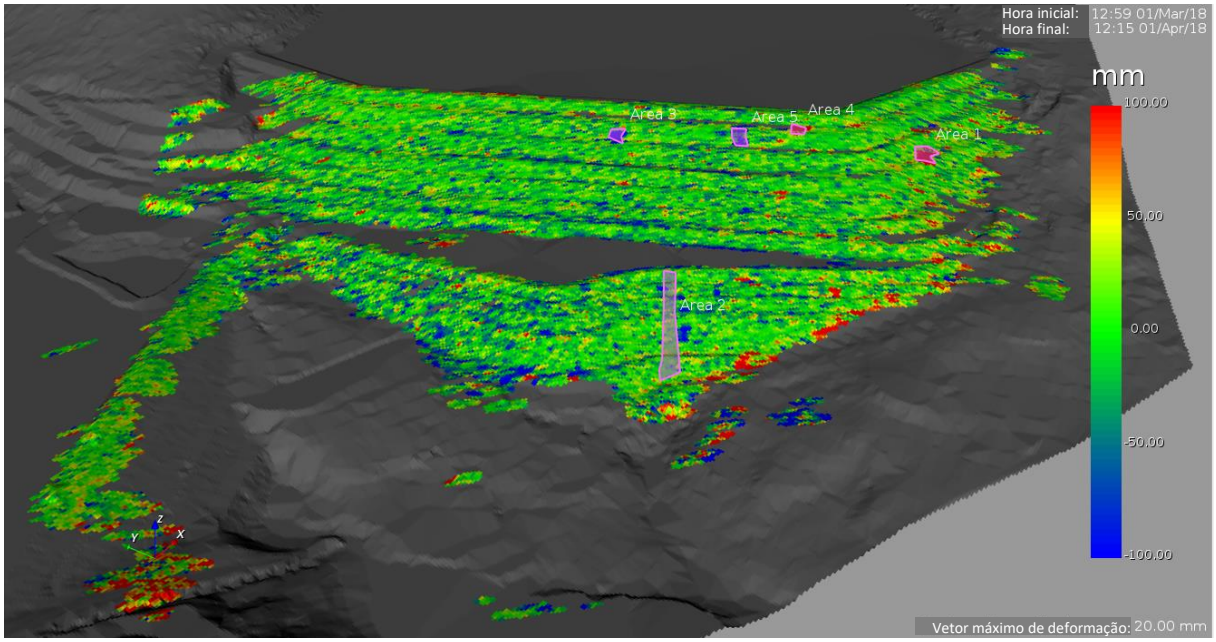


Figura 16: Mapa mensal da deformação cumulativa de 1 de março de 2018 a 1 de abril de 2018

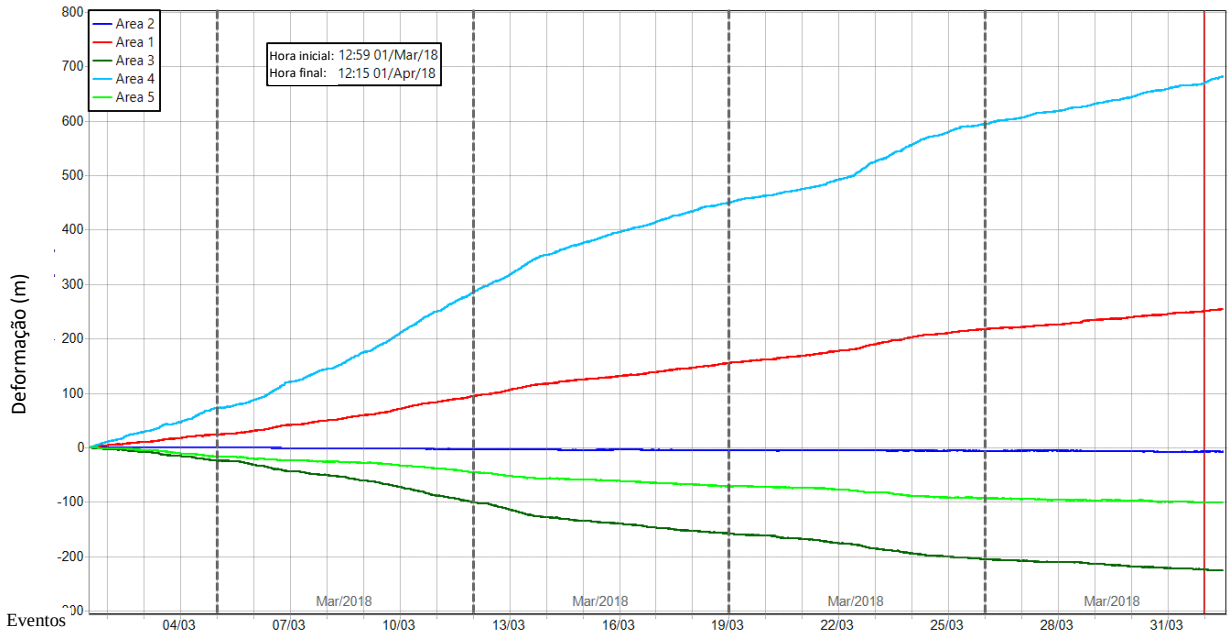


Figura 17: Séries temporais de deformação de áreas selecionadas (conforme localizadas no mapa de deformação cumulativa na Figura 16)

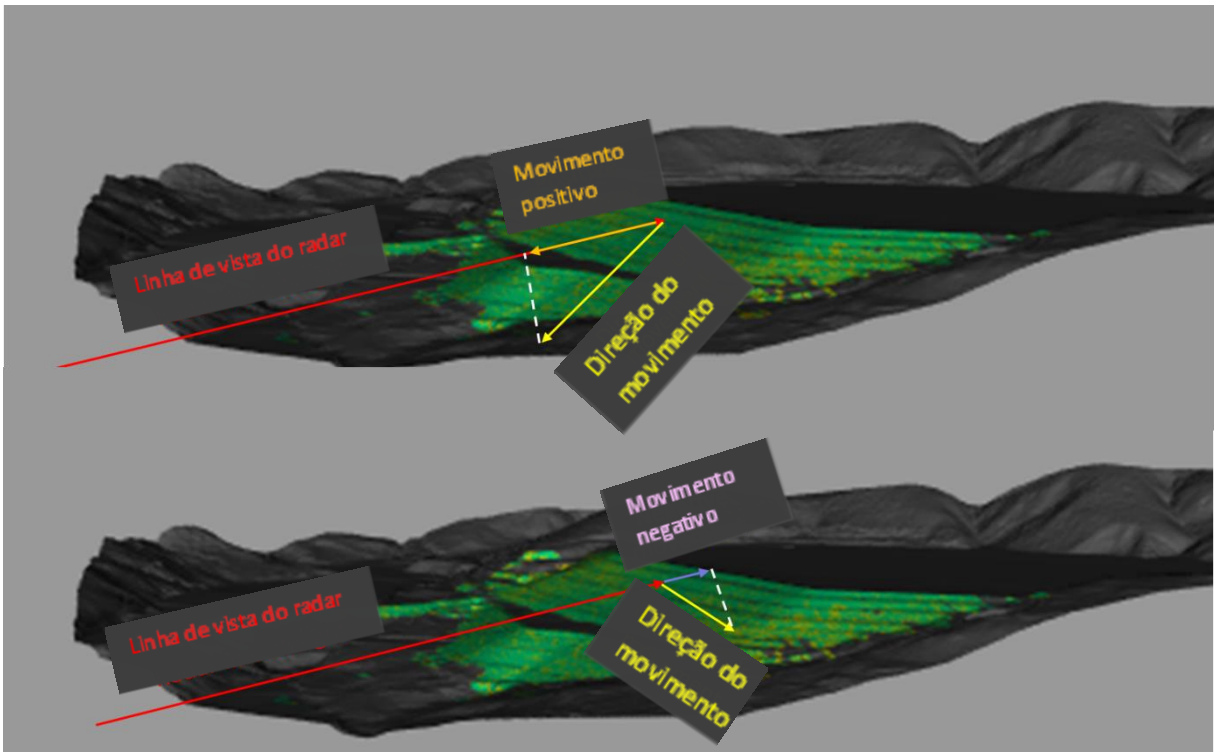


Figura 18: Esboço mostrando a geometria da linha de visão do radar e a convenção de sinal

Também houve relatos pelo radar de solo de grandes deformações ocorrendo na barragem durante o período de dezembro de 2018 a 18 de janeiro de 2019, inclusive. A análise dos dados do radar não identifica nenhuma deformação acima do nível de ruído do radar no mapa mensal de deformação

cumulativa de 19 de dezembro de 2018 a 19 de janeiro de 2019 (Figura 19) ou no mapa diário de deformação cumulativa de 18 a 19 de janeiro de 2019 (Figura 20). O sinal do radar visível nesses mapas de deformação é interpretado como ruído induzido pela vegetação e umidade do solo e não deformações reais.

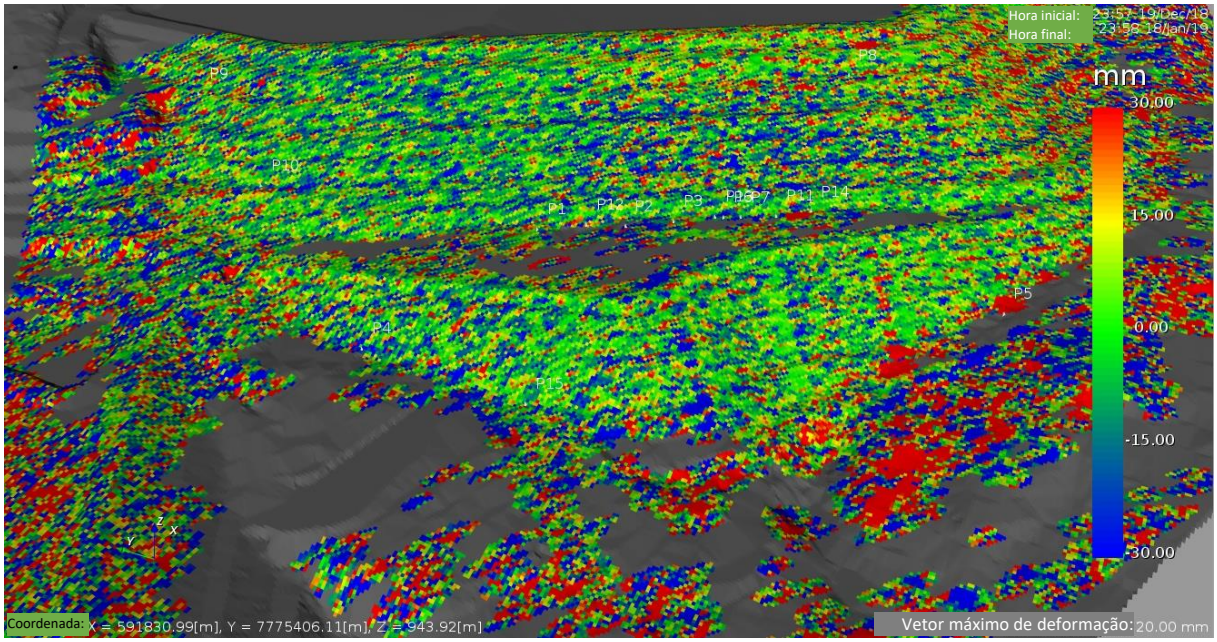


Figura 19: Mapa mensal de deformação cumulativa de 19 de dezembro de 2018 a 19 de janeiro de 2019

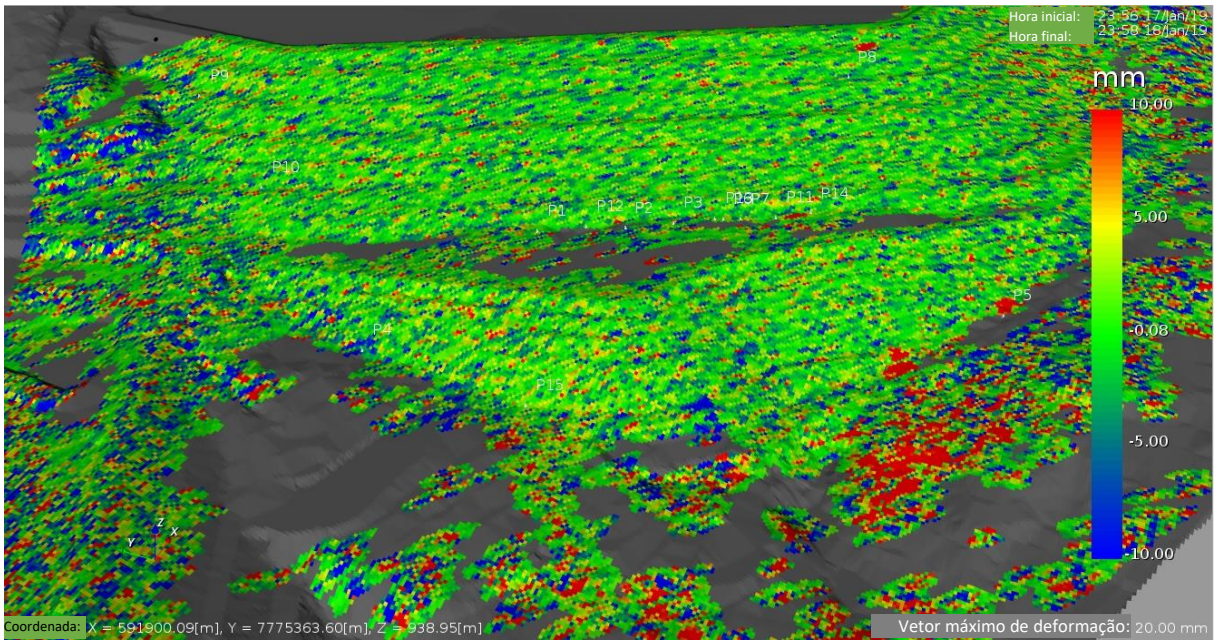


Figura 20: Mapa de deformação cumulativa de 18 de janeiro de 2018 a 19 de janeiro de 2019

Como prova adicional do efeito atribuível à umidade da vegetação na redução da confiabilidade das medições de radar, o nível de ruído foi menor ao longo dos canais de superfície de concreto altamente refletivos, o que não indicou nenhuma deformação antes do rompimento (Figura 21).

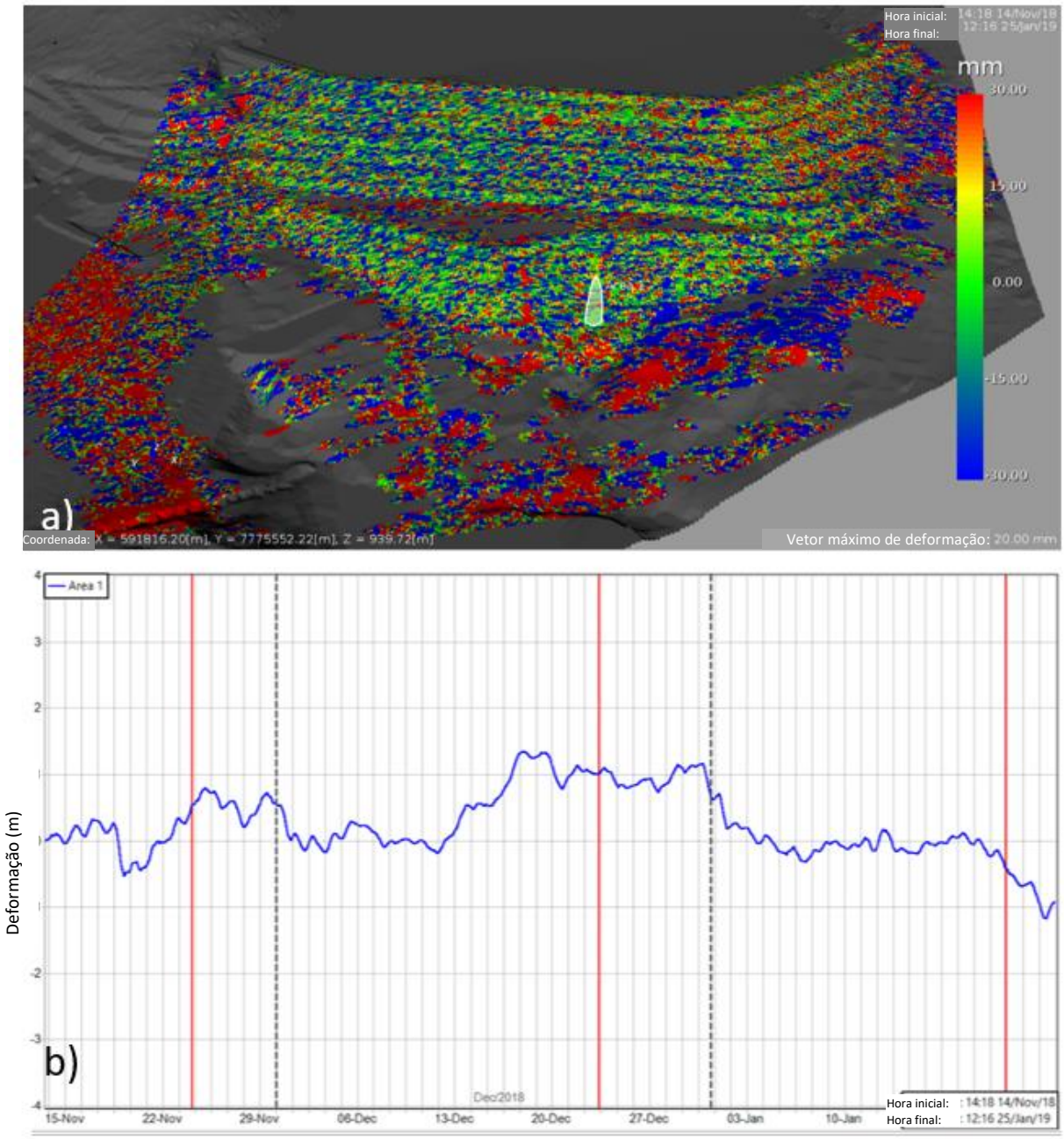


Figura 21: (a) Mapa de deformação cumulativa para uma canaleta de superfície de concreto, de 14 de novembro de 2018 a 25 de janeiro de 2019 e (b) Séries temporais de deformação correspondentes

As deformações indicadas pelo radar de solo não são confirmadas após uma revisão e análise de dados de satélite mais sensíveis desse mesmo período de tempo (discutido mais adiante), corroborando esta

conclusão. Deformações de tal intensidade, conforme indicado nos mapas mensais de deformação, se verídicas, teriam sido observadas nos dados do InSAR por falta de pontos de medição nas áreas correlacionadas do mapa. No entanto, os dados do InSAR nessas áreas revelam boa cobertura dos pontos de medição (Figura 22 a Figura 25).

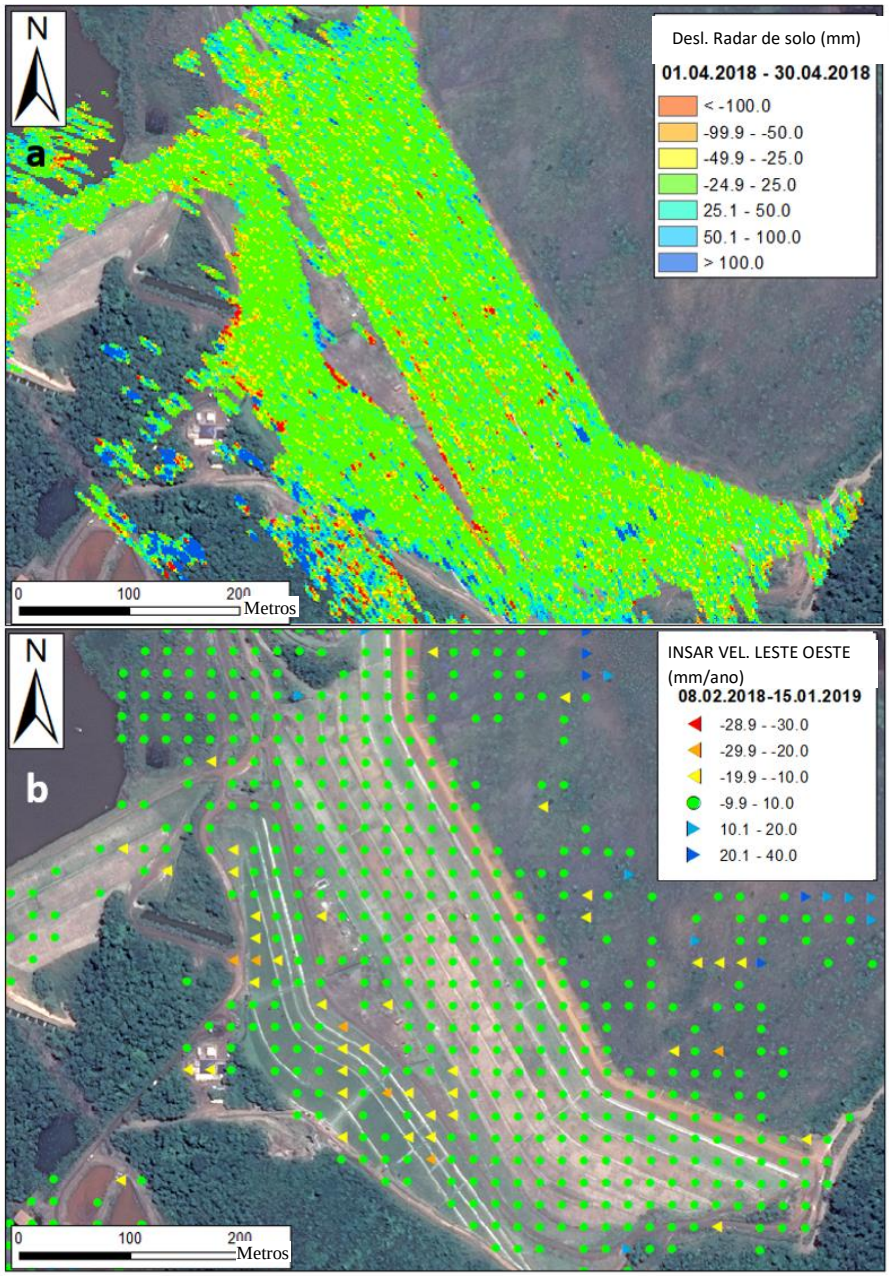


Figura 22: Comparação entre (a) mapa de deformação cumulativa do radar em abril de 2018 e (b) o mapa de velocidade L-O obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019

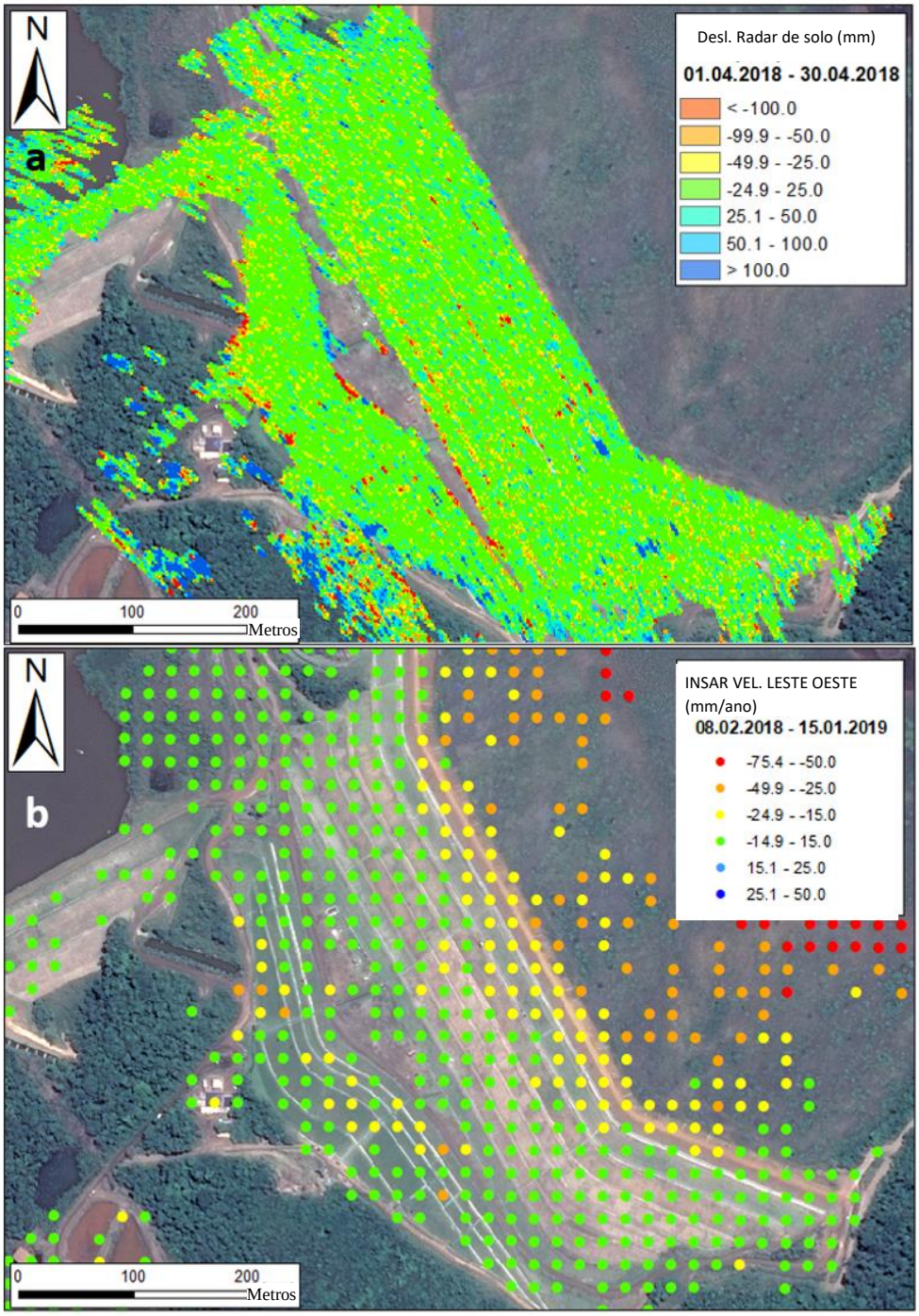


Figura 23: Comparação entre (a) mapa de deformação cumulativa do radar em abril de 2018 e (b) mapa de velocidade vertical obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019

Os dados do InSAR identificaram deformações na barragem, mas com uma distribuição espacial diferente, tendo uma geometria diferente (principalmente vertical no topo da barragem, com uma componente horizontal significativa em direção oeste no fundo da barragem para o InSAR) e com uma gama de valores diferente (10 milímetros por ano (mm/ano) a 30 mm/ano para o InSAR contra 200 mm a 700 mm para o radar de solo) quando comparados àqueles reportados pelo radar de solo.

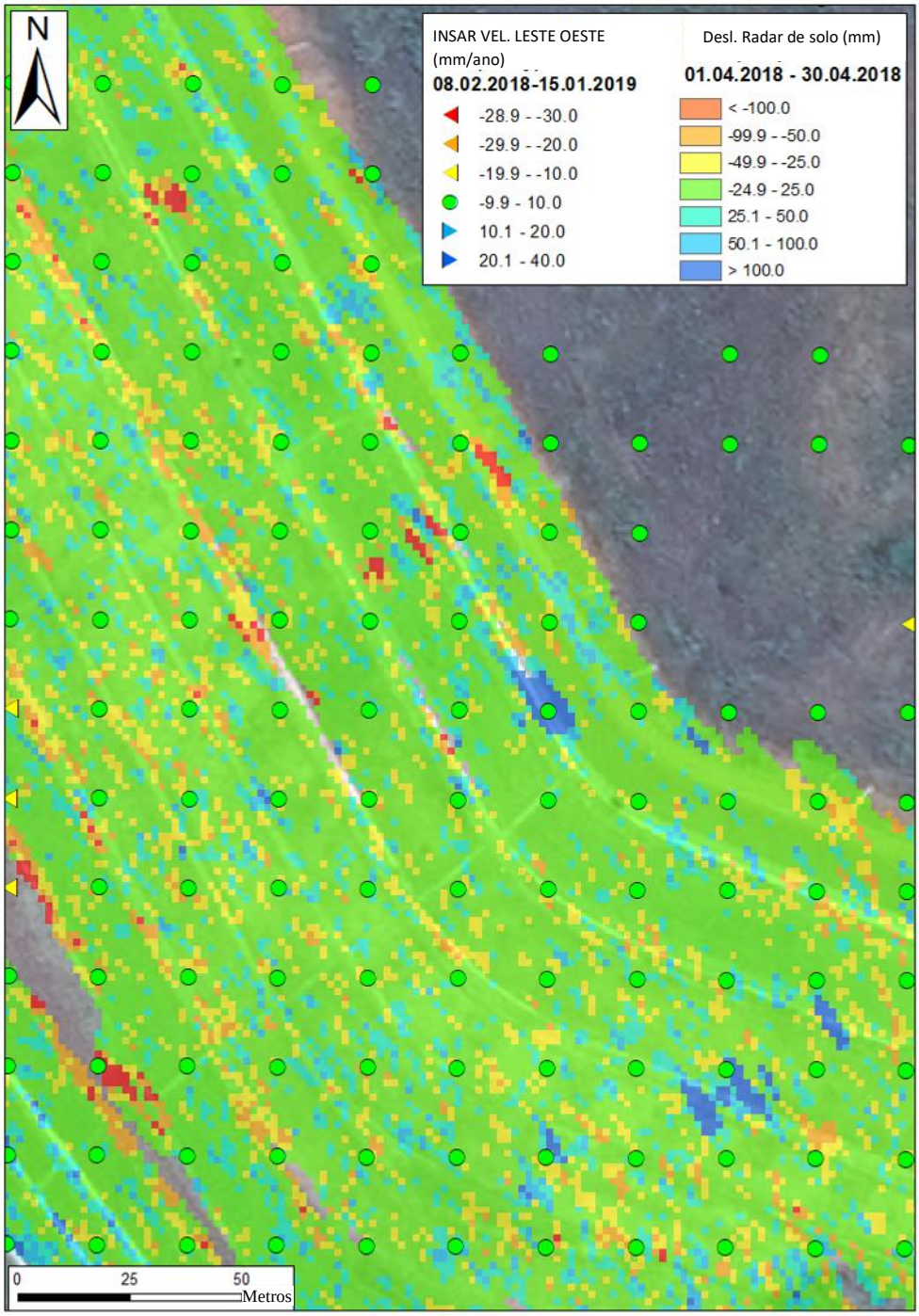


Figura 24: Imagem ampliada da parte superior da barragem, mostrando o mapa de deformação cumulativa pelo radar em abril de 2018 e o mapa de velocidade L-O obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019

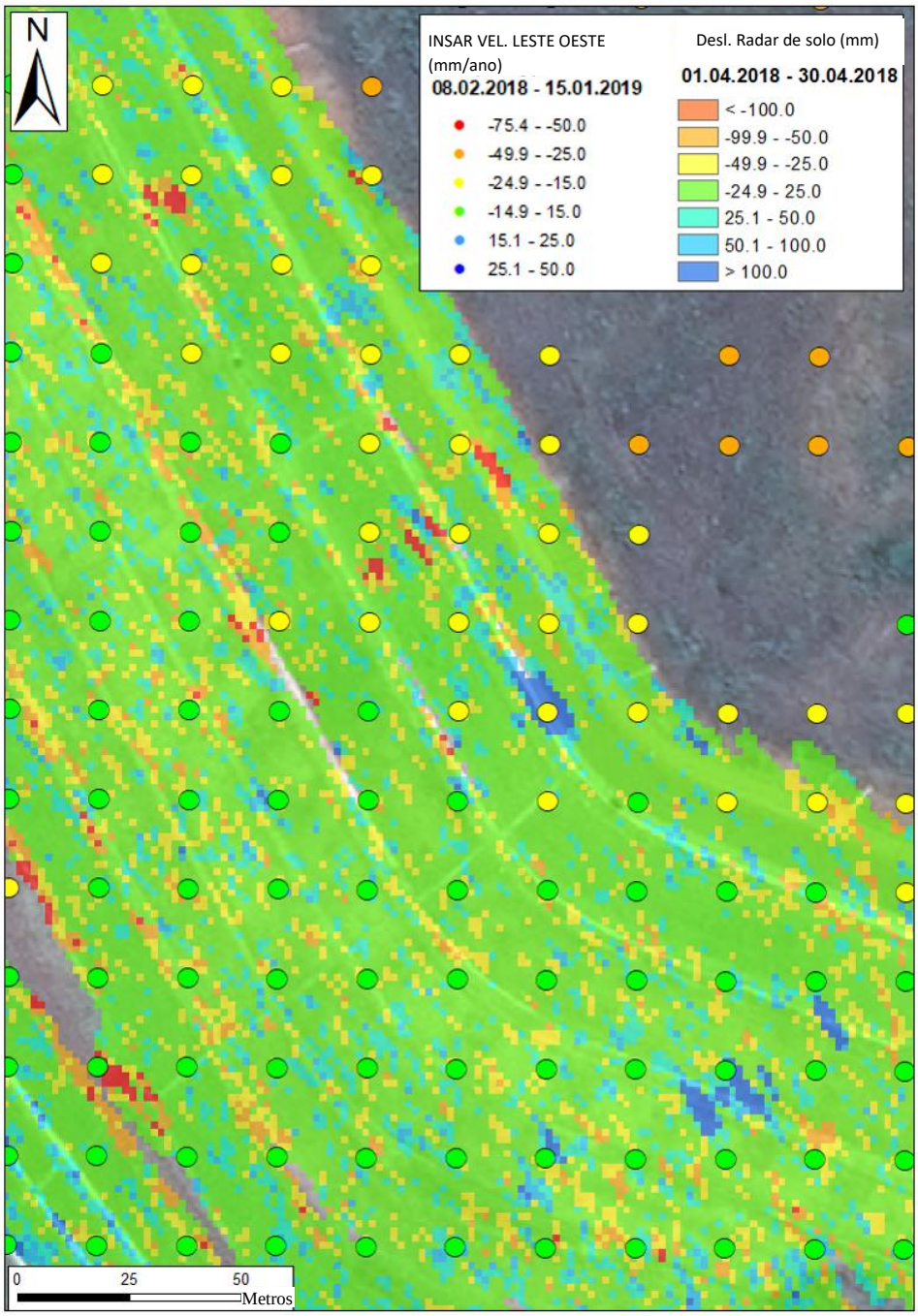


Figura 25: Imagem ampliada da pparte superior da barragem, mostrando o mapa de deformação cumulativa do radar em abril de 2018 e o mapa de velocidade vertical obtido via InSAR de 8 de fevereiro de 2018 a 15 de janeiro de 2019

5.2 Incidente com o DHP 15

Os dados coletados pelo radar em 11 de junho de 2018 também foram analisados, a fim de verificar a ocorrência de deformações ao redor do incidente encontrado na perfuração do dreno horizontal profundo (DHP) 15 naquele dia (mais discutido no Apêndice A).

Pequenas, rápidas deformações foram gravadas pelo radar em 11 de junho de 2018 em duas áreas: Área 1, de cerca de 400 m^2 e Área 2, de cerca de 135 m^2, localizadas na parte central da barragem, respectivamente a uma distância de 35 m e 55 m do DHP 15 (Figura 26). Na Área 1, deformações positivas (em direção ao radar) começaram às 13h53, atingindo um valor máximo na área de 6,4 mm e um valor médio de 2,4 mm. A partir das 14h17, as deformações negativas (afastando-se do radar) foram medidas pelo radar até as 15h16, com um valor máximo de 14,1 mm e um valor médio na área de 3,9 mm (Figura 27). Essas deformações são compatíveis com um abaulamento inicial na área, potencialmente associado à injeção de água e ar na barragem durante a perfuração, seguido de um processo de contração da superfície da barragem, induzido pela dissipação da pressão no solo. Na área 2, o radar gravou apenas deformações positivas (em direção ao radar) começando às 13h53 e terminando às 14h46, com um valor máximo na área de 8,3 mm e um valor médio de 3,6 mm (Figura 27).

Todos os horários foram obtidos do relógio do computador que controlava o radar.

Porque essas deformações foram rápidas e ocorreram em um período de tempo relativamente curto, as deformações detectadas são consideradas confiáveis. Notadamente, o radar de solo não detectou nenhuma deformação rápida do tipo detectado em relação com o DHP 15 nos meses antes do rompimento, inclusive durante a última varredura do radar imediatamente antes do rompimento visível da barragem.

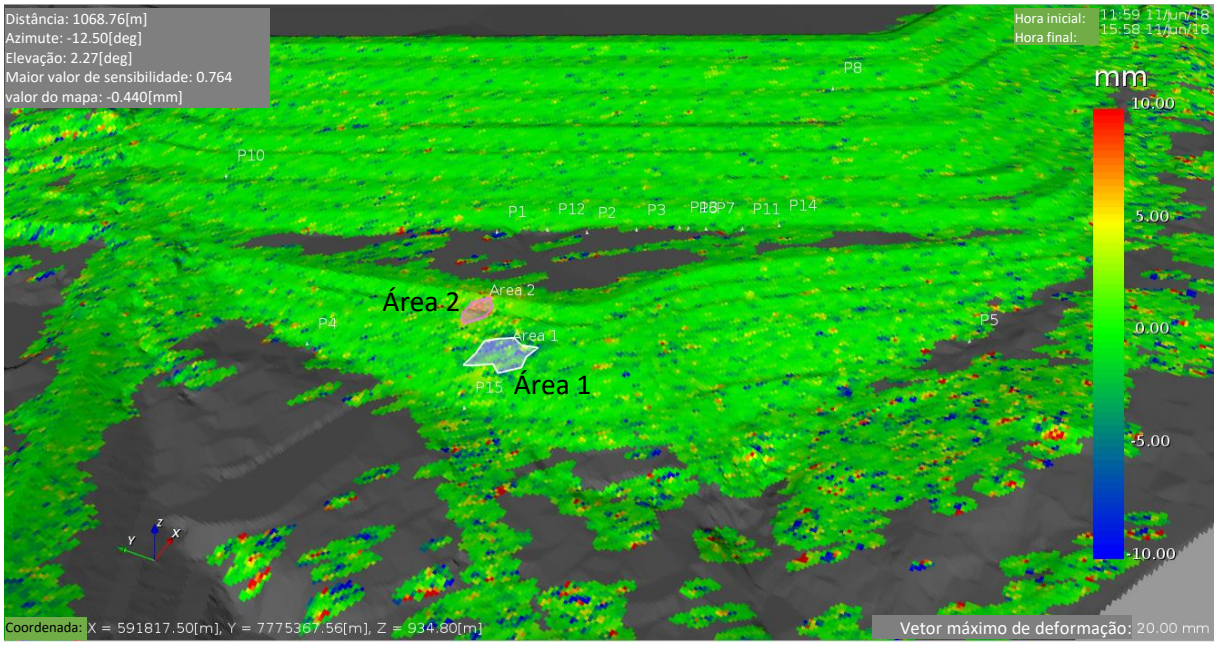


Figura 26: Mapa de deformação cumulativa de 11 de junho de 2018 às 11h59, até 11 de junho de 2018 15h58

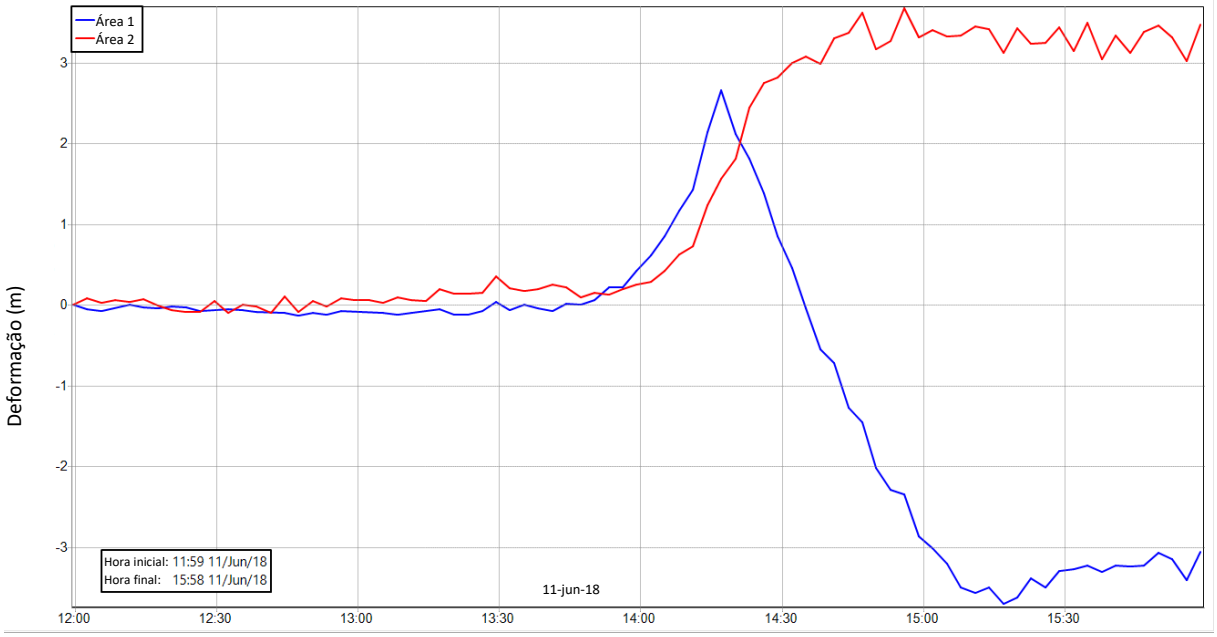


Figura 27: Séries temporais de deformação média da área 1 e da área 2 a partir de 11 de junho de 2018 11h59 até 11 de junho de 2018 15h58

5.3 Dados de "Movimento Lento"

A segunda análise dos dados do radar foi realizada usando uma análise de "movimento lento", fornecida pela IDS Georadar após o rompimento. O método de processamento de movimento lento usa menos imagens de radar durante todo o período (uma imagem a cada 24 h), o que resulta em um nível de ruído muito menor, potencialmente fornecendo dados de deformação mais confiáveis durante longos períodos de tempo.

A análise de "movimento lento" não detectou nenhuma deformação significativa ao longo da linha de visão do radar, acima do ruído do radar ou da velocidade mínima detectável do radar (correspondente a 3 mm/mês ou 36 mm/dia, de acordo com o fabricante do radar IDS Georadar) (Figura 28). Em janeiro de 2019, um sinal ligeiramente acima do limite detectável foi reportado na parte inferior da barragem, em direção à ombreira esquerda (Figura 29). No entanto, em 3 a 4 mm, isso é muito próximo da velocidade mínima detectável para ser confirmada como deformação real. Além disso, conforme observado acima, as supostas deformações reportadas pelo radar não se correlacionam com as reportadas pelo satélite InSAR.

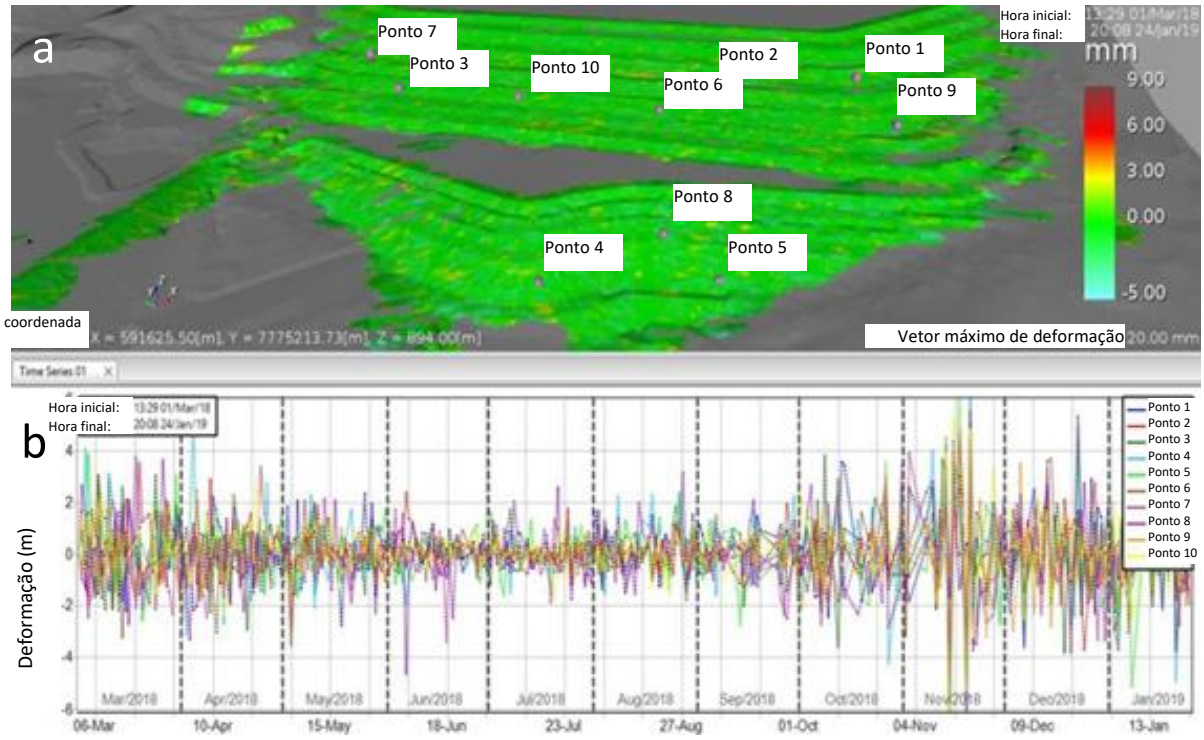


Figura 28: (a) Mapa de deformação cumulativa em "movimento lento" de 1 de março de 2018 a 24 de janeiro de 2019 e (b) Série temporal de deformação de pontos selecionados (conforme localizado no mapa de deformação cumulativa)

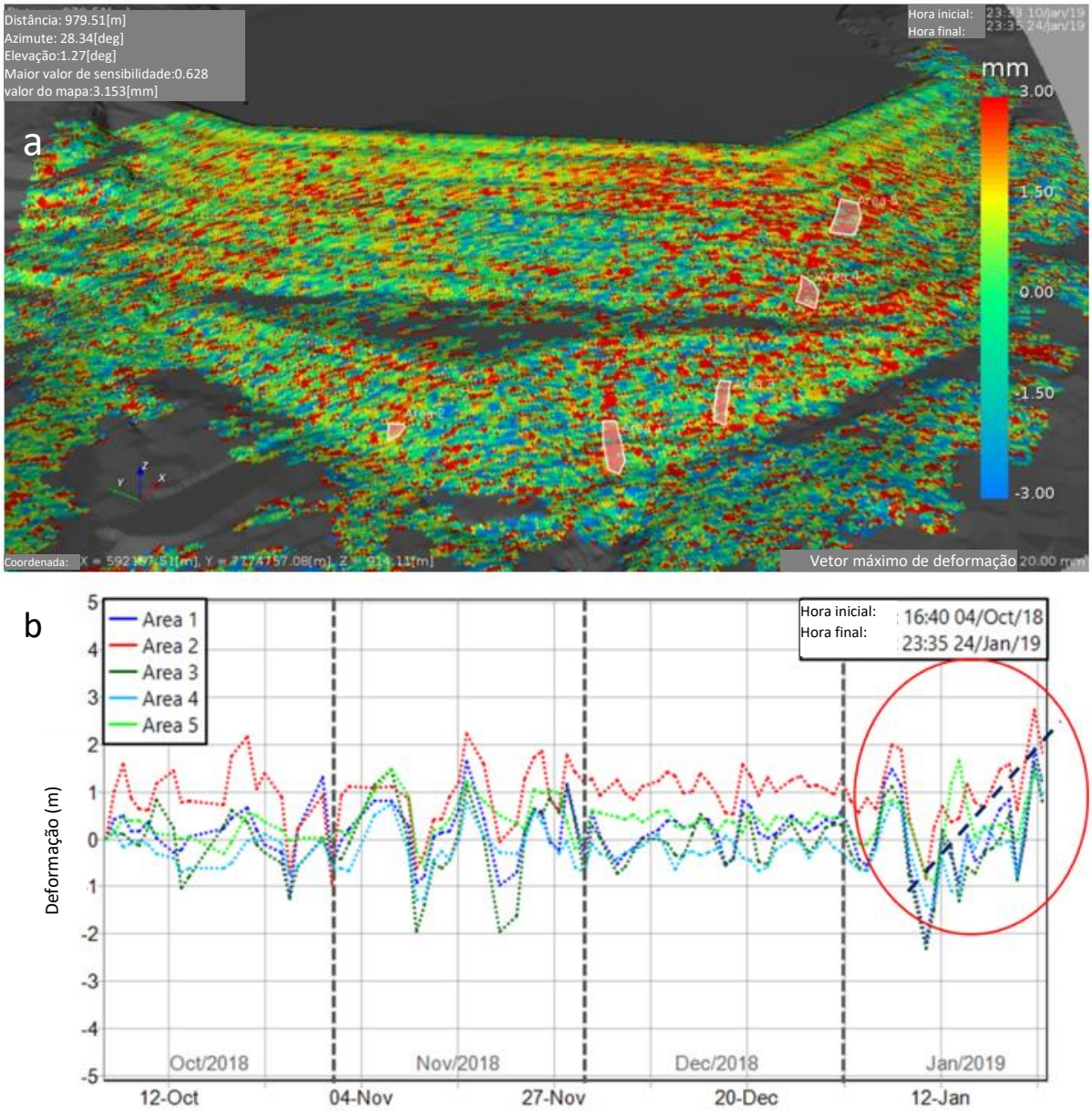


Figura 29: (a) Mapa de deformação cumulativa em "movimento lento" de 4 de outubro de 2018 a 24 de janeiro de 2019 e (b) Série temporal de deformação de pontos selecionados (conforme localizado no mapa de deformação cumulativa)

6. ANÁLISE DO SATÉLITE INSAR

O principal objetivo desta análise foi revisar os dados fornecidos pelo satélite InSAR no ano anterior ao rompimento da Barragem I, para entender se as deformações de superfície foram detectadas e, em caso afirmativo, analisar suas distribuições espaciais e temporais. Os dados do InSAR também foram comparados com dados pluviométricos, a fim de avaliar potenciais correlações.

Os diferentes conjuntos de dados analisados do InSAR [órbitas descendentes (norte a sul) do Sentinel-1, órbitas ascendentes (sul a norte) do TerraSAR-X e órbitas ascendentes e descendentes do CosmoSkyMed] são considerados de boa qualidade, tanto em termos de densidade de pontos/cobertura de área quanto precisão dos dados de deformação. A partir de geometrias únicas de satélite (órbitas ascendentes ou descendentes), são fornecidos dados de deformação ao longo da linha de visão dos satélites. Ao combinar dados de linha de visão fornecidos por órbitas ascendentes com aqueles fornecidos por órbitas descendentes coletadas no mesmo período, foi possível estimar vetores de deformação em seus componentes verticais e L-O. O InSAR não mede a componente N-S do vetor de deformação, porque as linhas de visão ascendente e descendente são quase perpendiculares à direção N-S e assim a sensibilidade a esta direção é muito baixa (~10%).

Os dados descendentes do Sentinel-1 e os dados ascendentes do TerraSAR-X mostram uma boa cobertura de quase todo o maciço da barragem e de dentro dos rejeitos armazenados. O conjunto de dados do CosmoSkymed InSAR mostra uma boa cobertura nas partes central e superior da barragem e de dentro dos rejeitos, mas nenhum ponto de medição está presente na parte inferior da barragem. Esta falta de dados pode ser atribuível ao ruído nos dados de radar com sinal da banda X, induzidos pela cobertura de vegetação na face da barragem com do tempo de revisitação do satélite mais longo (16 dias), se comparado ao TerraSAR-X (mesma banda de frequência, mas com tempo de revisitação de 11 dias).

O Sentinel-1 tem o conjunto de dados de InSAR mais informativo, devido à cobertura de pontos quase contínua sobre toda a área de interesse. A Figura 30 mostra o mapa de velocidade média estendendo todo o período coberto pelo conjunto de dados (3 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019) para todos os pontos disponíveis na área (Figura 26a) e apenas para os pontos em movimento (mais que +/- 15 mm/ano, Figura 26b).

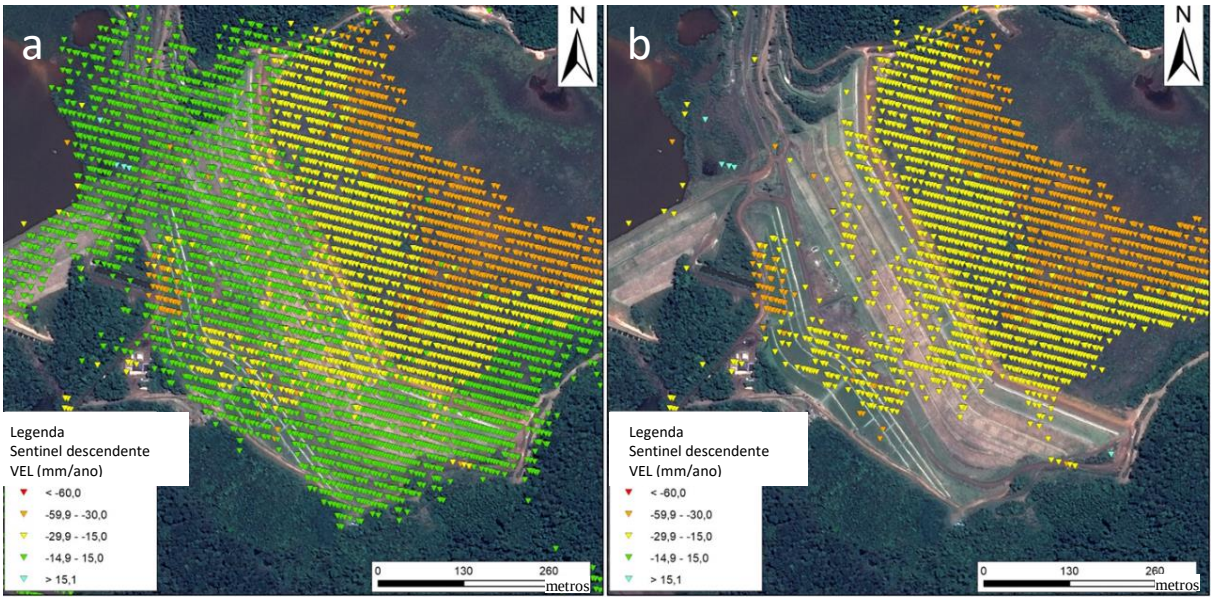


Figura 30: Mapa de velocidade do conjunto de dados InSAR Sentinel 1, de 3 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019, mostrando (a) todos os pontos e (b) apenas os pontos em movimento

6.1 Parte Inferior e Central da Barragem I

Deformações na linha de visão afastadas do satélite foram detectadas na parte inferior da barragem em três áreas diferentes, com componentes verticais e L-O. As três áreas em movimento na parte inferior da barragem mostram velocidades médias durante o período analisado, variando entre 17 mm/ano e 35 mm/ano ao longo da linha de visão descendente (Figura 31).

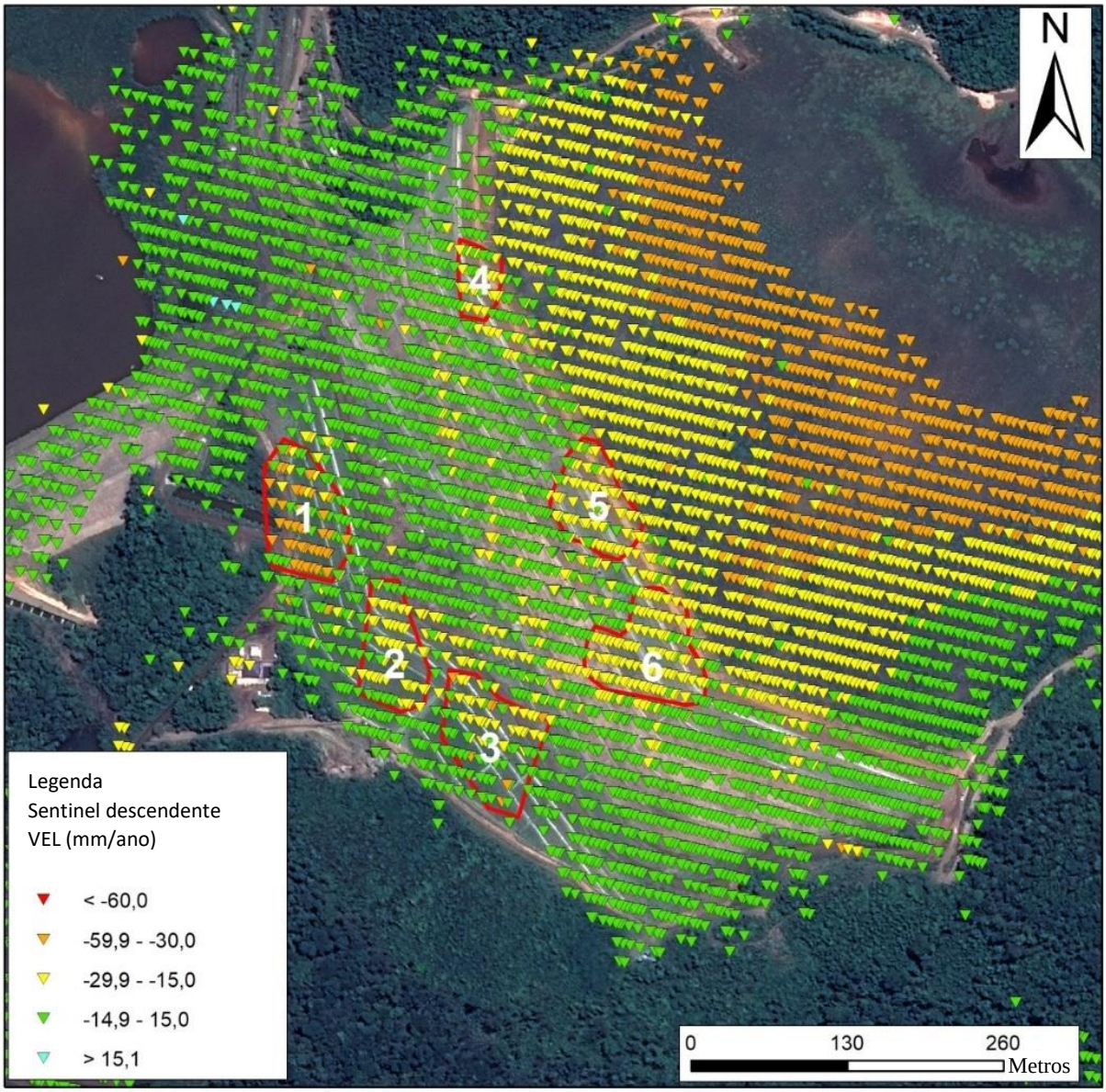


Figura 31: Mapa de velocidade do conjunto de dados InSAR Sentinel 1, de 3 de Janeiro de 2018 a 22 de Janeiro de 2019 (polígonos de setores em movimento da Barragem I estão identificados em vermelho)

As deformações notadas são compatíveis com: (i) recalque verticais, (ii) deformações com componentes horizontais em direção a oeste (O) ou (iii) deformações com componentes verticais e em direção a oeste. Os dados InSAR fornecidos pelo conjunto de dados TerraSAR-X, ao longo das

geometrias ascendentes, confirmam a presença de deformações na parte inferior da Barragem I (Figura 32). Ao combinar suas medições de linha de visão com aquelas do Sentinel-1, conforme mostrado na Figura 33, é possível confirmar a presença de deformações com componente vertical e para oeste na parte inferior da Barragem I (Figura 34).

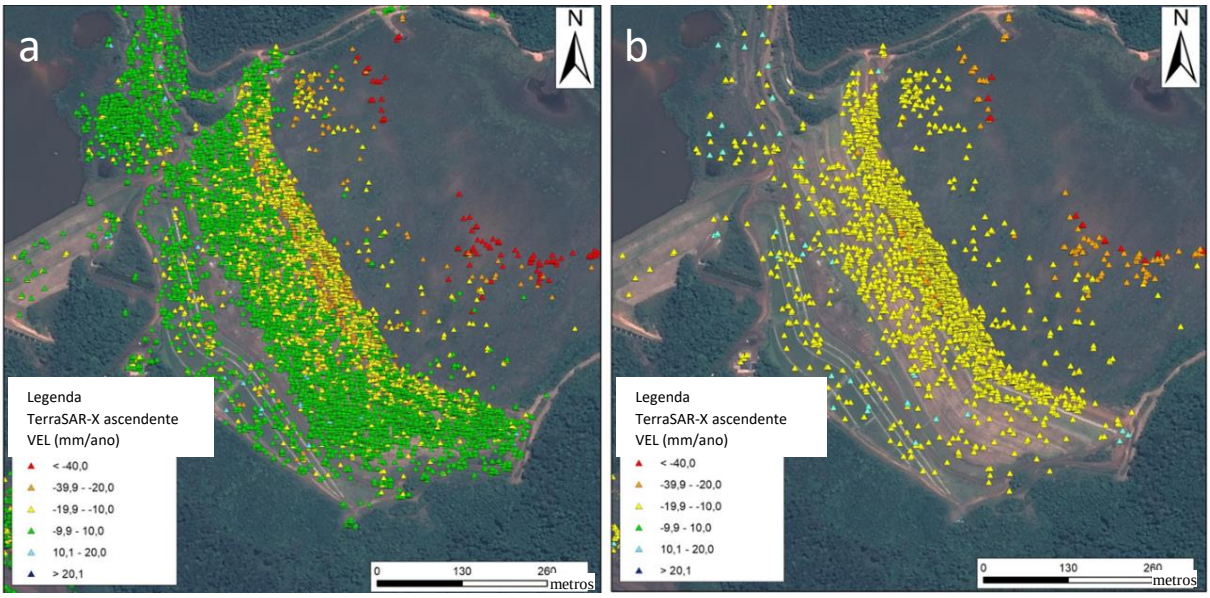


Figura 32: Mapa de velocidade do conjunto de dados InSAR Terrasar-X de 8 de Fevereiro de 2018 a 15 de Janeiro de 2019, mostrando (a) todos os pontos e (b) apenas os pontos em movimento

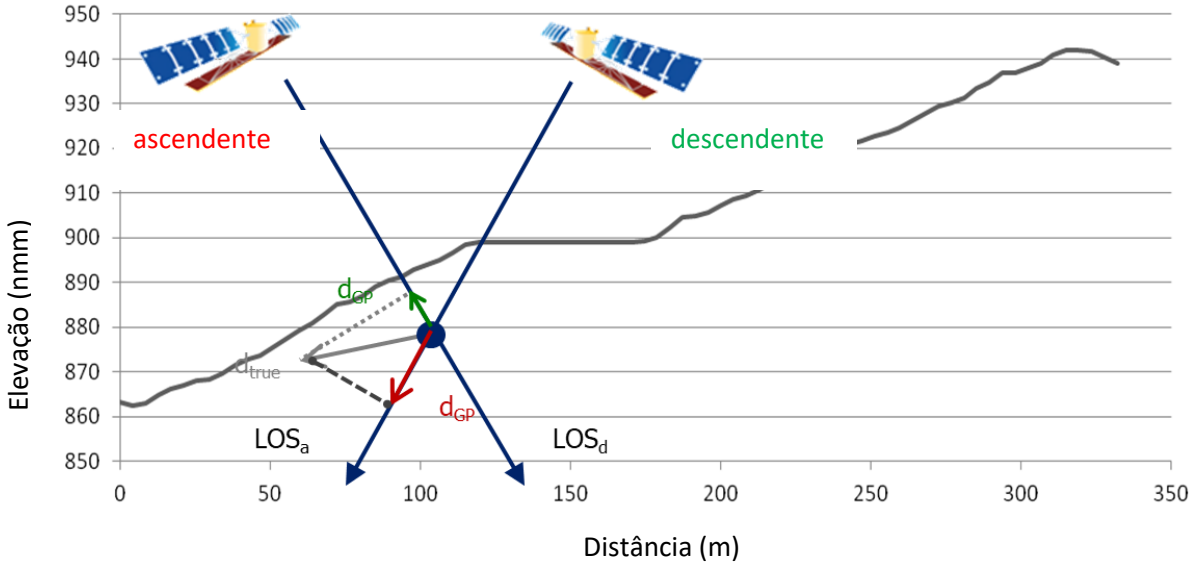


Figura 33: Esboço com combinação de dados InSAR de órbitas ascendentes e descendentes, ao longo do perfil da Barragem I

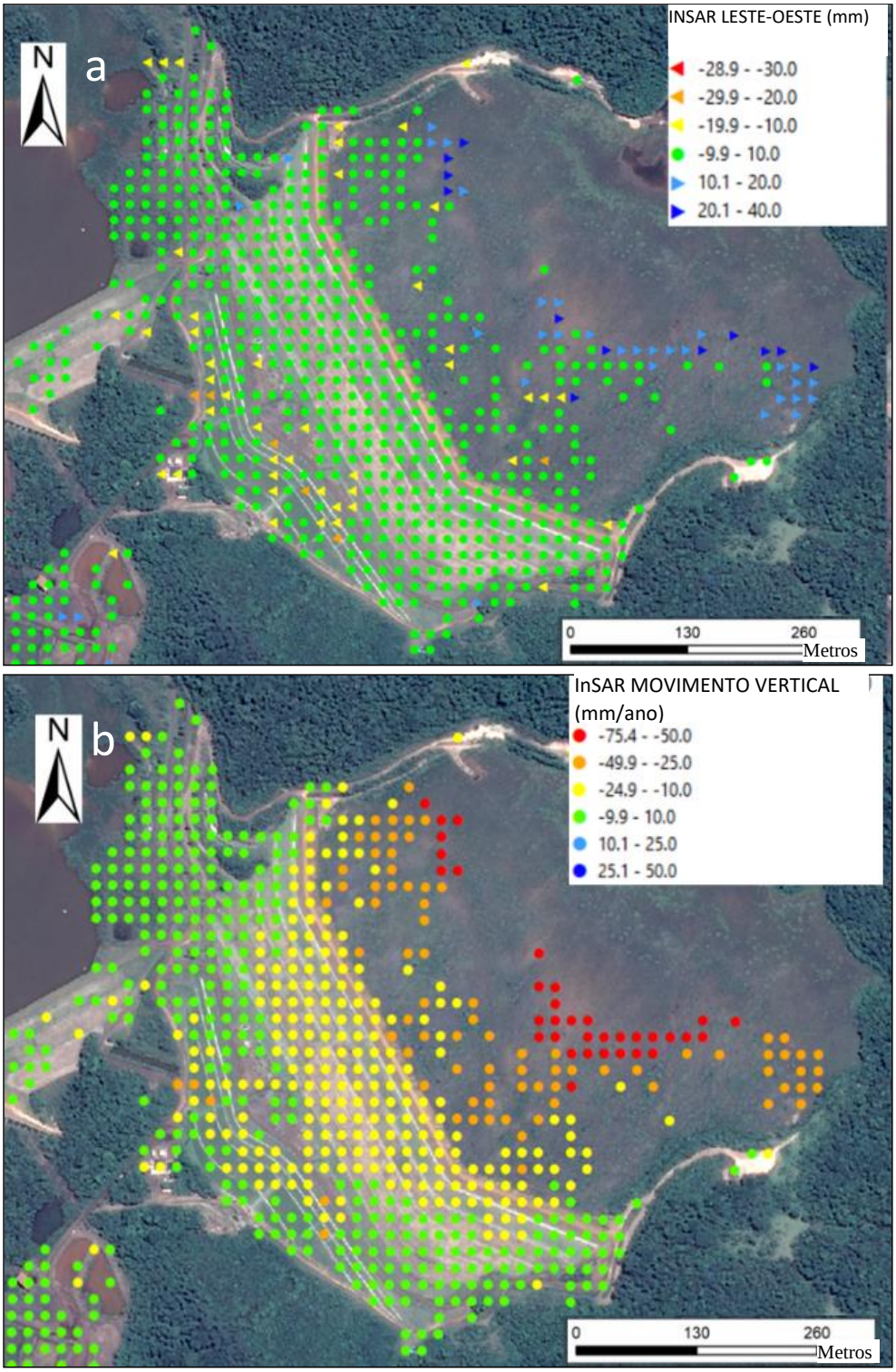


Figura 34: Mapa de velocidade a partir de dados decompostos InSAR Terrasar-X – Sentinel-1: (a) para componentes L-O e (b) componentes verticais

Na parte inferior da barragem, as deformações medidas por satélite InSAR eram em grande parte menos do que 10 mm/ano, mas incluíam as áreas onde as deformações horizontais variavam de 10 a

30 mm/ano nos 12 meses antes do rompimento. Não foi possível confirmar as deformações horizontais detectadas pelos conjuntos de dados combinados Sentinel-TerraSAR-X neste setor da Barragem I através dos conjuntos de dados ascendentes e descendentes CosmoSkyMed, por conta da falta de pontos de medição na parte inferior da barragem (Figura 35).

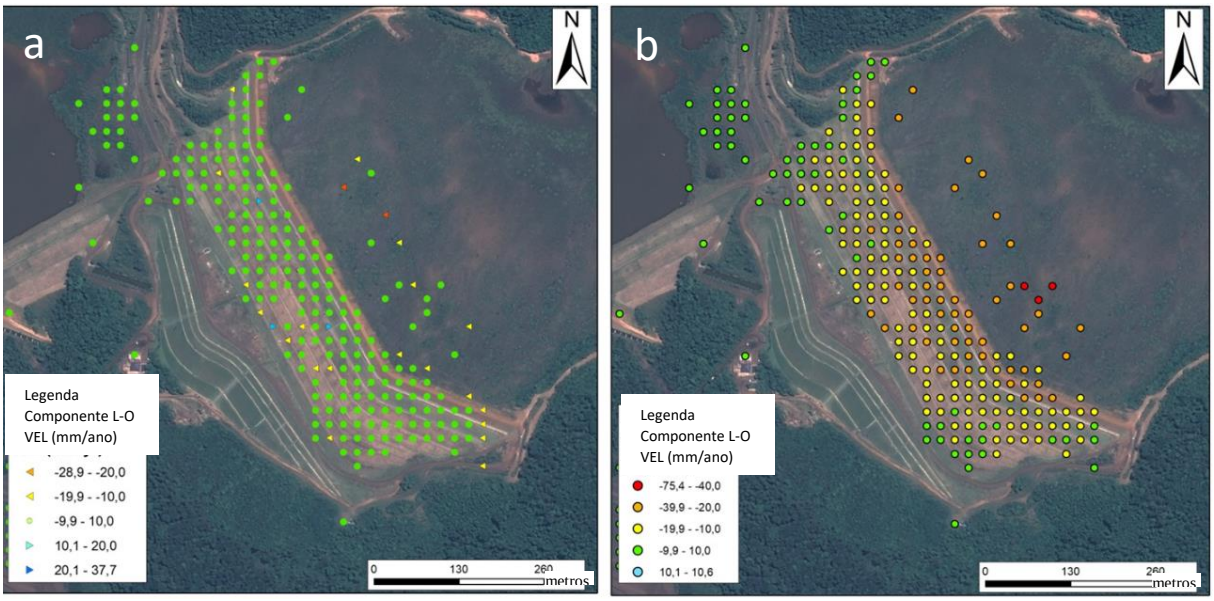


Figura 35: Mapa de velocidade a partir de dados decompostos InSAR Cosmoskymed para (a) componentes L-O e (b) componentes verticais

Da Figura 36, é evidente que a maioria das deformações medidas na Barragem I ocorreram na segunda parte do período analisado (ou seja, de agosto de 2018 a janeiro de 2019).

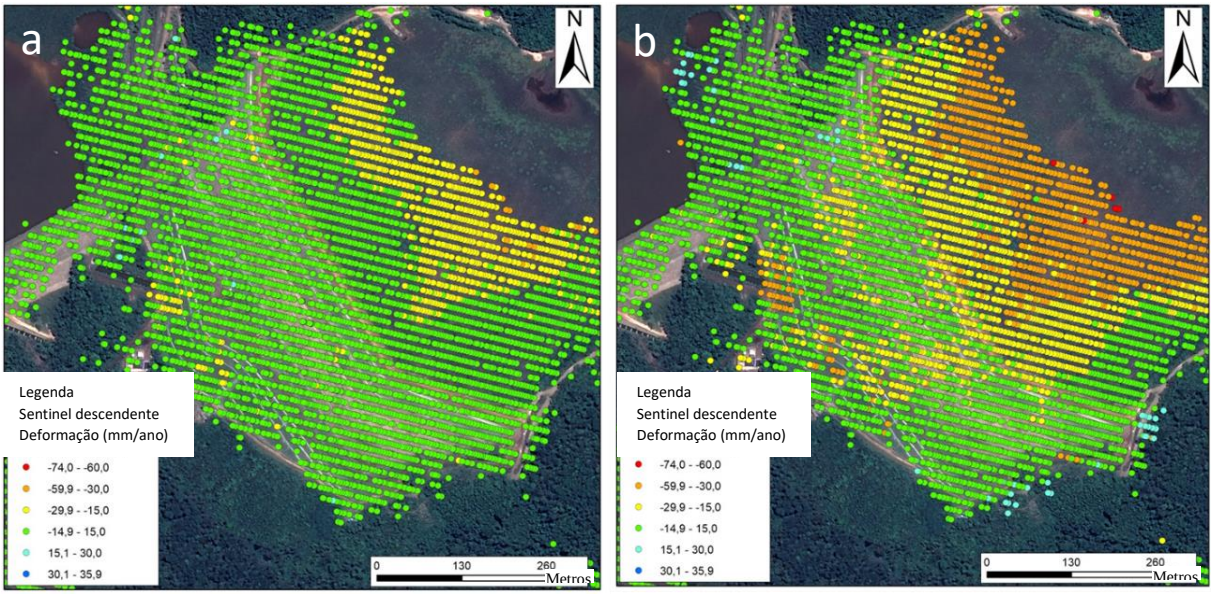
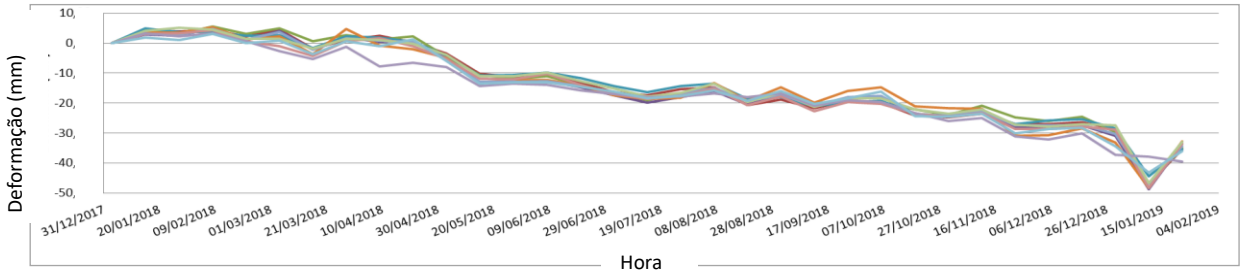


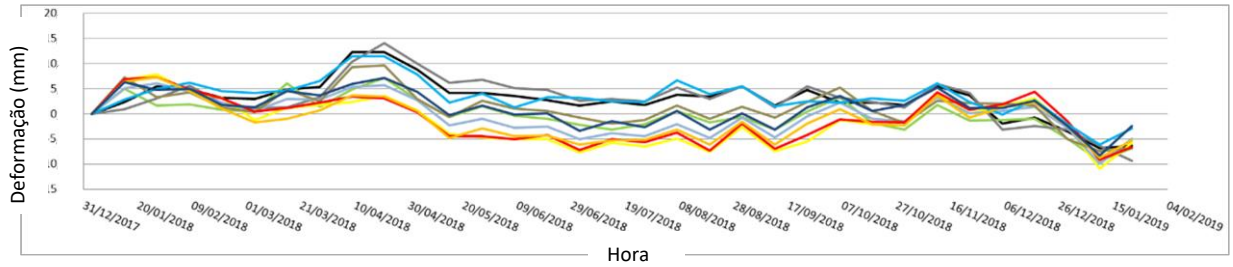
Figura 36: Comparação entre conjuntos de dados de deformações cumulativas medidas pelo Sentinel-1 (a) de 3 de janeiro de 2018 a 7 de agosto de 2018 e (b) de 3 de janeiro de 2018 a 22 de janeiro de 2019

Ao analisar a série temporal dos pontos de medição InSAR localizados na parte inferior da barragem, deformações são primeiro identificadas no final de março a abril de 2018, com certas fases de aceleração em outubro e novembro de 2018. Uma aceleração final ocorreu de dezembro de 2018 a janeiro de 2019. Estas acelerações foram observadas na maioria dos pontos InSAR nesta área (Figura 37).

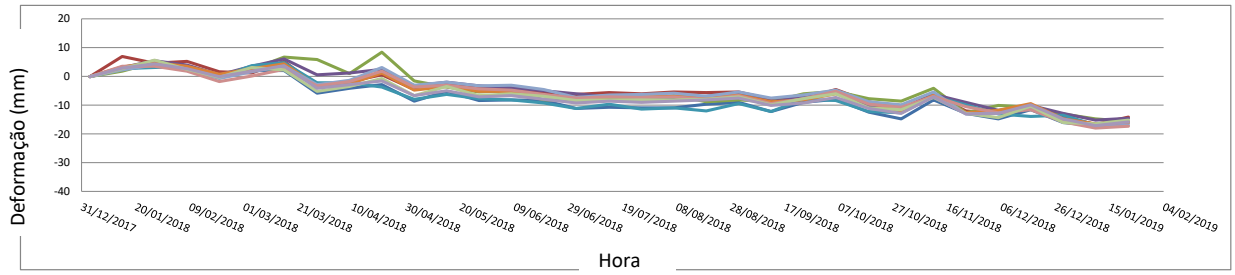
Na parte central da Barragem I, deformações estimadas de todos os conjuntos de dados indicam principalmente componentes verticais, mostrando um aumento de velocidades, iniciando entre setembro e outubro de 2018 até o momento do rompimento.



(a)



(b)



(c)

Figura 37: Série temporal de deformações de pontos InSAR para dados do Sentinel-1, localizados na parte inferior da Barragem I (na Figura 31) para: (a) Área 1, (b) Área 2, e (c) Área 3

Embora as deformações tenham aumentado ligeiramente de setembro a outubro de 2018, nenhum dos pontos mostrou uma aceleração progressiva clara da deformação antes do rompimento, que seria potencialmente útil para prever empiricamente o momento do rompimento (ou seja, usando o inverso da velocidade com o tempo).

6.2 Parte Superior da Barragem I

Na parte superior da barragem, deformações com principalmente componentes verticais e algumas pequenas componentes horizontais (perto do nível de ruído nos dados) foram detectadas por todos os conjuntos de dados InSAR (Figura 34 e Figura 35), com velocidades máximas de 20 mm/ano até 22 mm/ano.

As deformações medidas na parte superior da barragem são lineares, sem acelerações evidentes, além de um aumento de velocidade a partir de outubro de 2018 e um segundo aumento de velocidade a

partir de meados de dezembro de 2018 até a aquisição do conjunto de dados descendente do Sentinel-1 de 10 de janeiro de 2019 (

Figura **38**). As duas últimas aquisições do Sentinel-1 antes do rompimento (10 de janeiro de 2019 e 22 de janeiro de 2019) não indicaram nenhuma aceleração evidente, mas confirmaram que a deformação registrada pelo radar de solo a18 de janeiro de 2019 (discutida acima) não era uma deformação real.

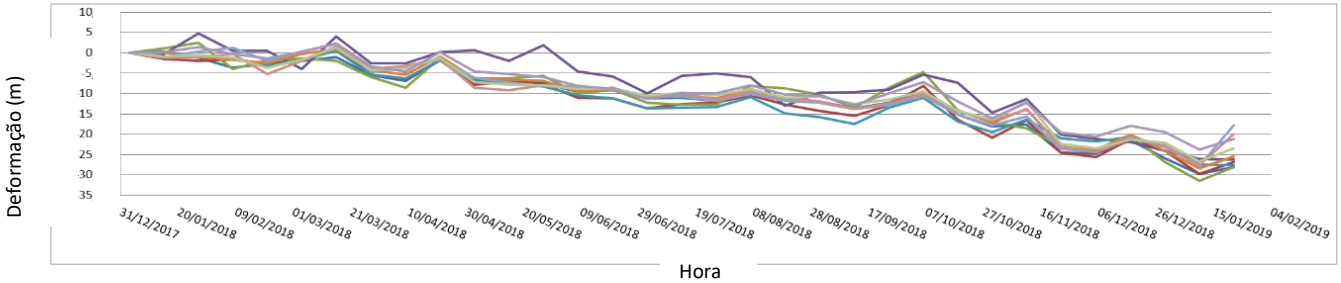


Figura 38: Série temporal de deformação de pontos InSAR para o conjunto de dados do Sentinel-1 na parte superior da Barragem I, pertencente à Área 5 da Figura 31

6.3 Rejeitos

Nos rejeitos, as deformações máximas medidas nos conjuntos de dados InSAR foram de até 140 mm/ano, ao longo da linha de visão descendente, com principalmente componentes verticais e um gradiente em crescimento quase linear, afastando-se da crista da barragem. As deformações estavam inclinadas ligeiramente em direção a oeste perto da barragem, e em direção a leste, longe da barragem.

As deformações medidas em todos os conjuntos de dados InSAR de rejeitos se alinham em termos de geometria e magnitude. As deformações dominantes nos rejeitos podem ser atribuídas ao adensamento, com algumas acelerações possivelmente associadas à estação chuvosa de 2018.

As deformações máximas medidas nos rejeitos ao longo do ano anterior ao rompimento não coincidiram com a profundidade máxima de rejeitos, mas estavam localizadas longe da crista da barragem. É difícil separar o contínuo adensamento dos rejeitos da deformação da barragem, com base no período de tempo dos dados InSAR disponíveis. Espera-se que o adensamento contínuo diminua com o tempo, enquanto se espera que a deformação da barragem acelere até o momento do rompimento. Uma vez que não há aceleração presente aqui, parece que as deformações detectadas estão associadas ao processo de adensamento.

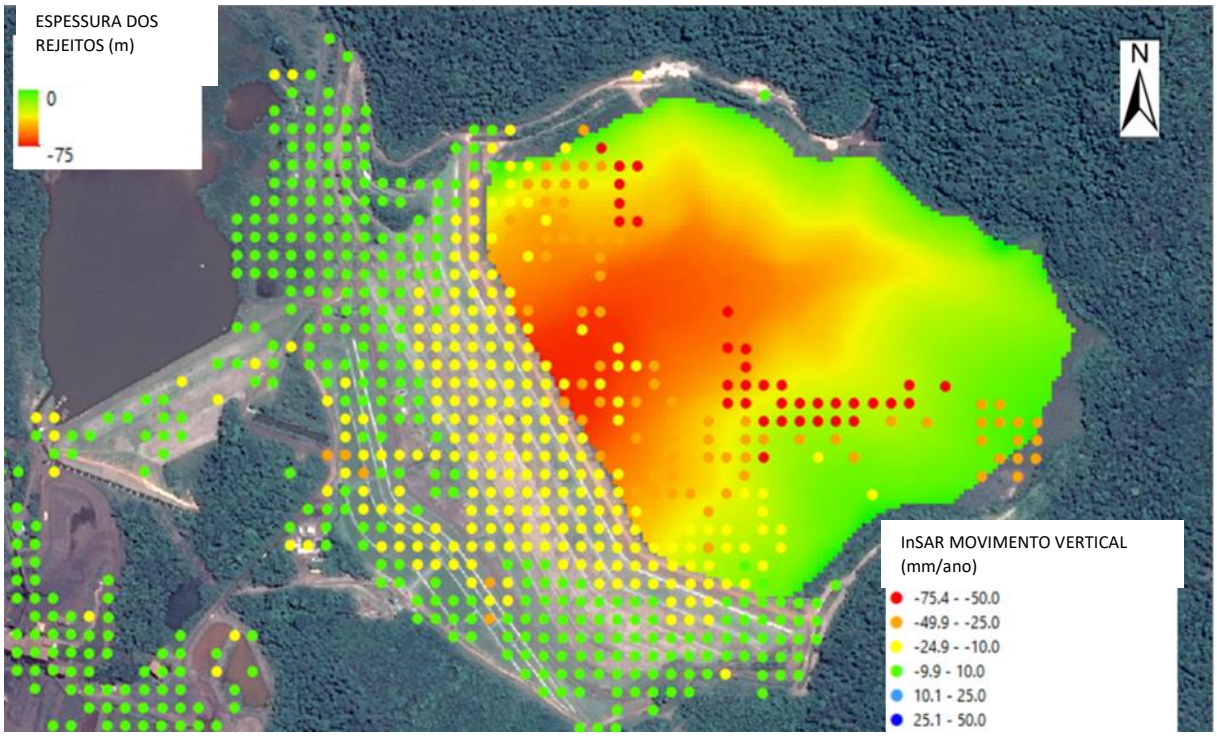


Figura 39: Mapa de velocidade vertical do InSAR, visualizado sobre a espessura dos rejeitos

6.4 Seções Transversais

Para obter uma melhor compreensão da geometria das deformações indicadas pelos conjuntos de dados do satélite InSAR, três seções transversais da barragem foram traçadas na topografia pré-rompimento (Figura 40) e os vetores de deformação foram medidos usando o InSAR, combinando os dados da linha de visão ascendente e descendente, conforme visualizado na Figura 41 até Figura 43. Os vetores de deformação inferidos pelo InSAR não incluem o componente N-S, uma vez que a linha de visão das órbitas ascendente e descendente é quase perpendicular àquela direção que, considerando a direção das seções transversais, poderia introduzir um viés na direção dos vetores.

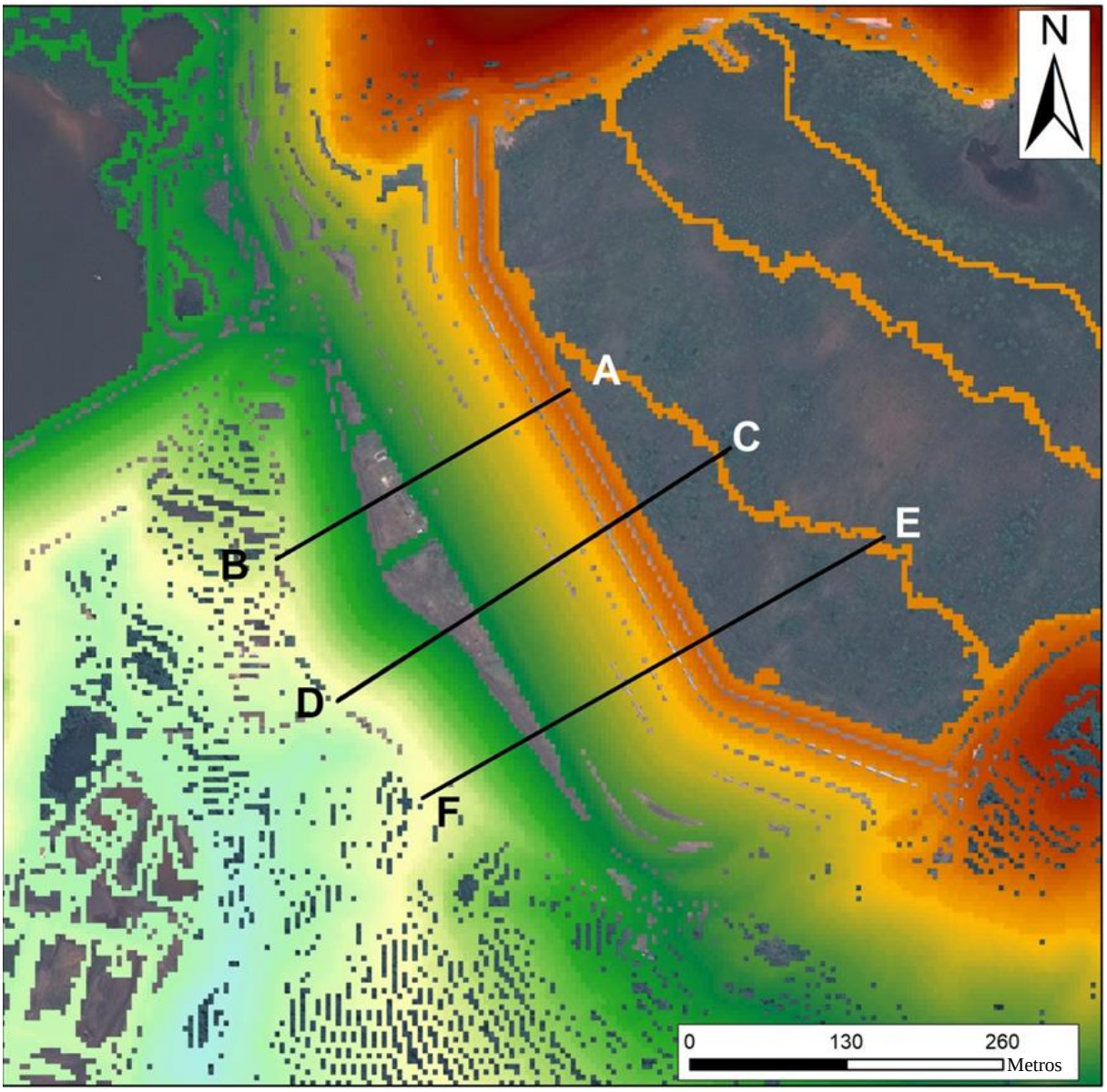


Figura 40: Topografia da Barragem I antes do rompimento mostrando as localizações de três seções transversais

Em todas as seções transversais, a deformação da crista da barragem é principalmente vertical, enquanto em direção ao pé da barragem os vetores mergulham em direção a oeste e sua inclinação aumenta gradualmente até um ângulo máximo de ~60° da vertical, conforme mostrado na seção transversal EF (Figura 43).

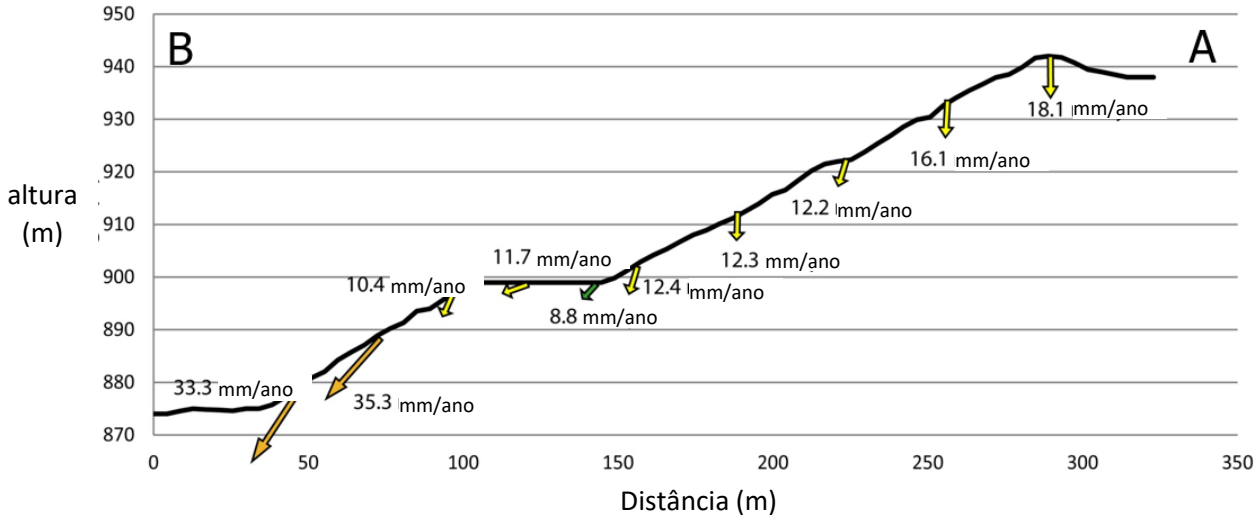


Figura 41: Seção transversal AB, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR TerraSAR-X-Sentinel-1

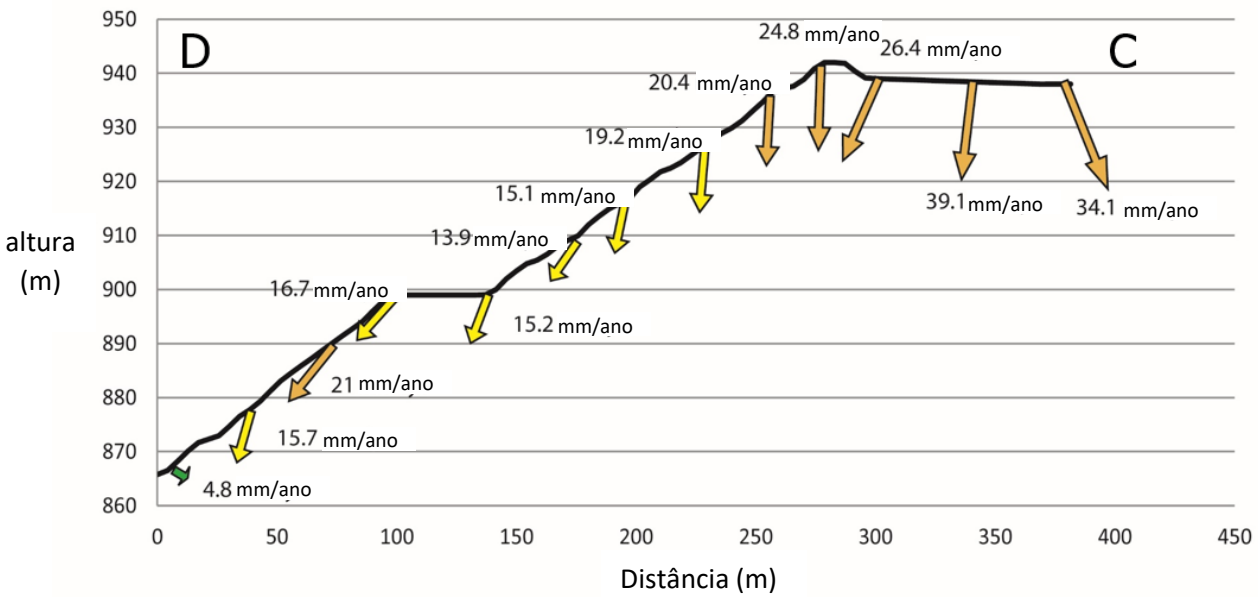


Figura 42: Seção transversal CD, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR TerraSAR-X-Sentinel-1

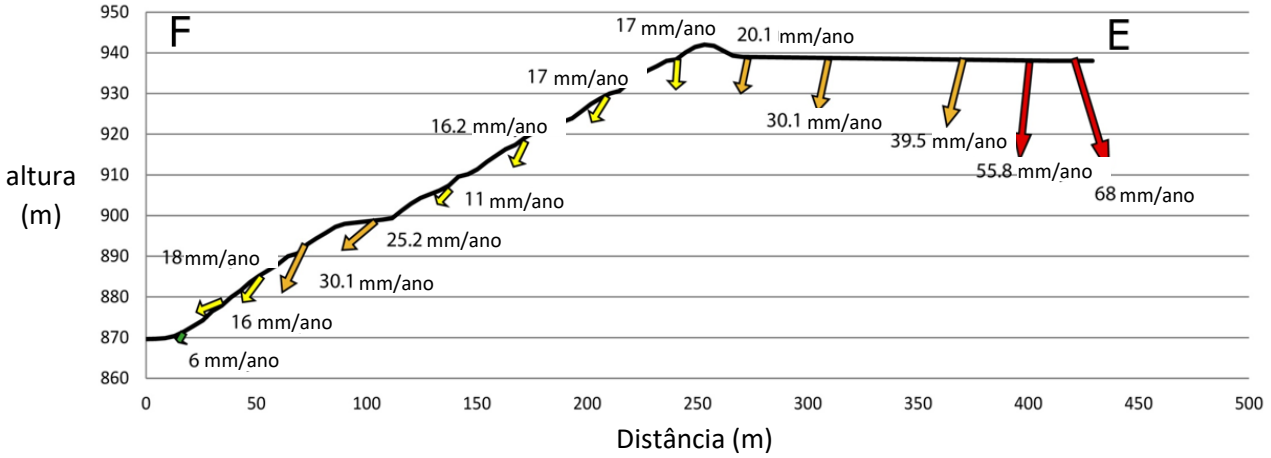


Figura 43: Seção transversal EF, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR TerraSAR-X-Sentinel-1

Ao analisar a deformação cumulativa obtida dos dados InSAR ao longo das seções transversais, dividida em quatro subconjuntos temporais de todo o período coberto pelos dados, é possível visualizar a evolução temporal das deformações com um aumento na deformação cumulativa mais evidente nos últimos três meses (Figura 44).

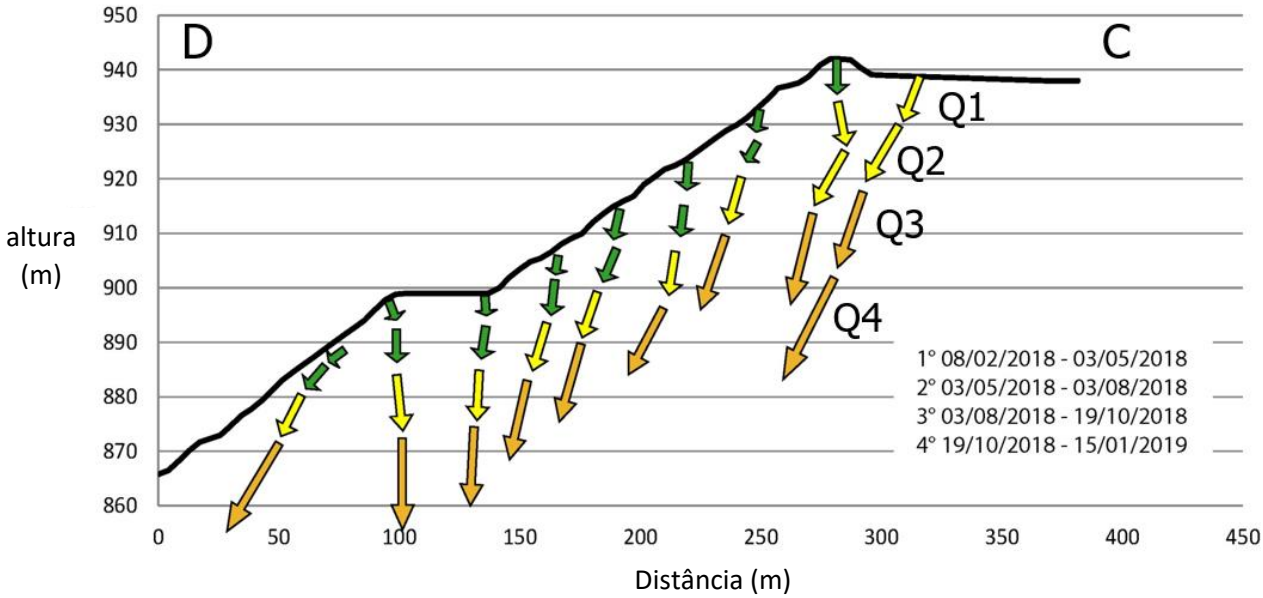


Figura 44: Seção transversal EF, mostrando os vetores de deformação obtidos de dados InSAR TerraSAR-X-Sentinel-1, para diferentes subperíodos de todo o período de tempo coberto pelos conjuntos de dados

6.5 Comparação Entre InSAR e TWI

Os dados InSAR foram comparados ao TWI. TWI foi calculado com base na topografia pré-barragem, a fim de estimar o fluxo de água antes da construção da barragem. Valores altos de TWI indicam que a água está se acumulando. A distribuição espacial dos valores do TWI na área analisada

revela que o acúmulo de fluxo, obtido ao calcular o TWI com a topografia original, está concentrado na parte sul do pé da barragem, onde a face da barragem está virada para SO. Ao comparar os valores de TWI com os dados InSAR (Figura 45), é possível observar que a maioria das deformações identificadas pela análise InSAR antes do rompimento, na parte inferior da barragem, estão localizadas no mesmo setor da topografia pré-barragem, onde foram identificados os valores mais altos de TWI.

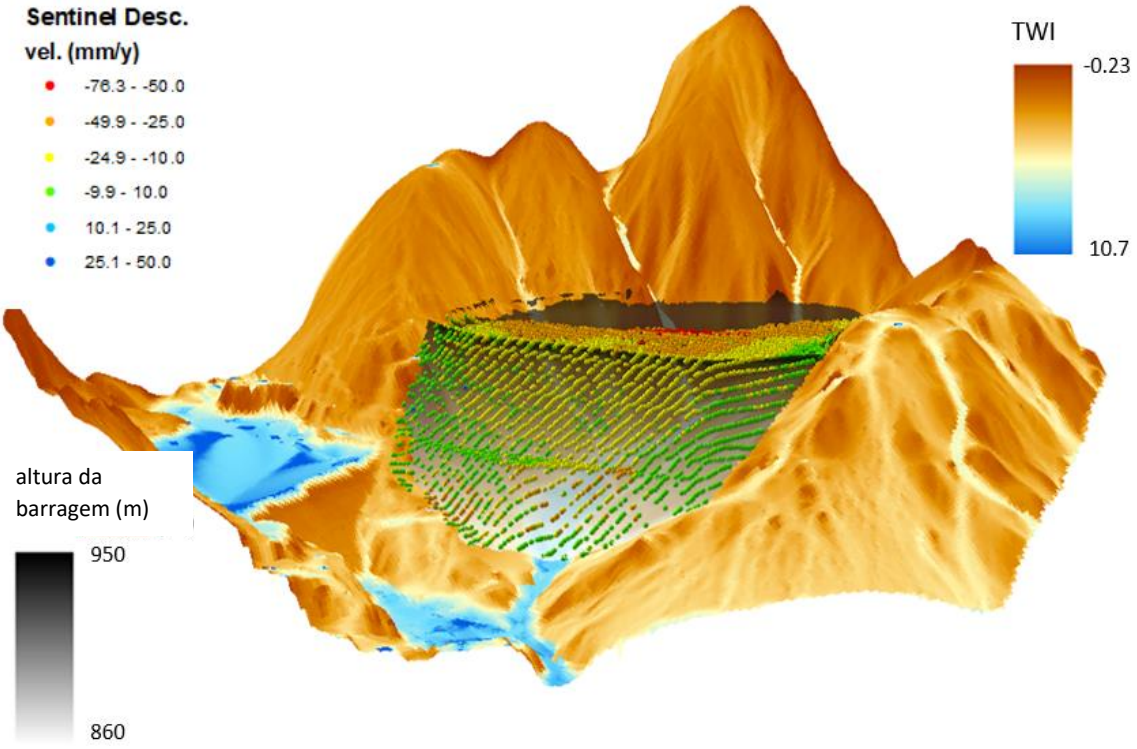


Figura 45: Vista tridimensional dos dados do satélite InSAR, visualizados sobre a Barragem e TWI

6.6 Comparação Entre InSAR e Precipitação

Os dados pluviométricos do pluviômetro F18 (detalhes incluidos no Apêndice C) foram comparados com dados InSAR, a fim de identificar possíveis correlações temporais entre as deformações medidas desde o início de 2018 até aquelas medidas no momento do colapso (incluindo a estação chuvosa).

A comparação foi feita usando os conjuntos de dados do Sentinel-1 e os L-O e componentes verticais obtidos do Sentinel-1 e TerraSAR-X. Estes conjuntos de dados foram escolhidos como os mais representativos das deformações detectadas antes do evento, principalmente na parte inferior da barragem.

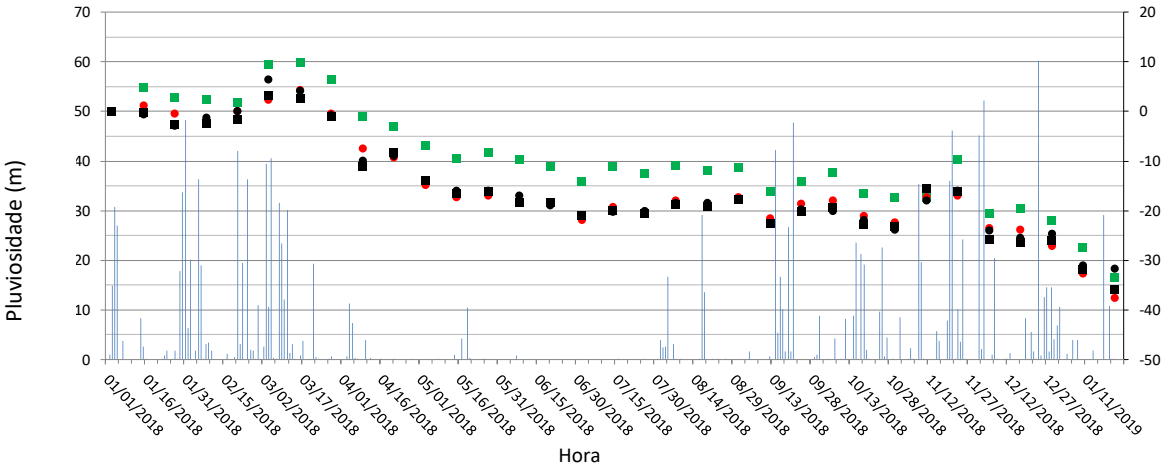
Séries temporais de deformações consideradas representativas dos diferentes setores da área de interesse foram comparadas com:

- precipitação diária;
- precipitação mensal; e

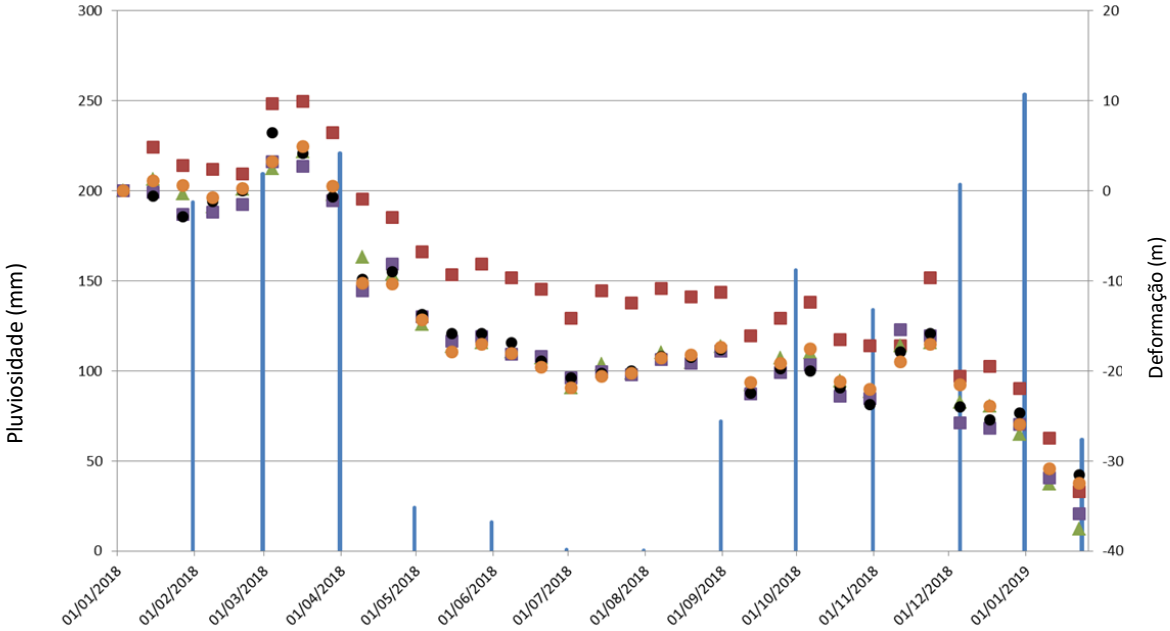
- precipitação cumulativa.

A comparação entre os dados InSAR e os dados pluviométricos mostra uma boa correlação entre os períodos de precipitação intensa e as acelerações medidas nos dados InSAR para os pontos de medição pertencentes à barragem (na parte inferior e na crista).

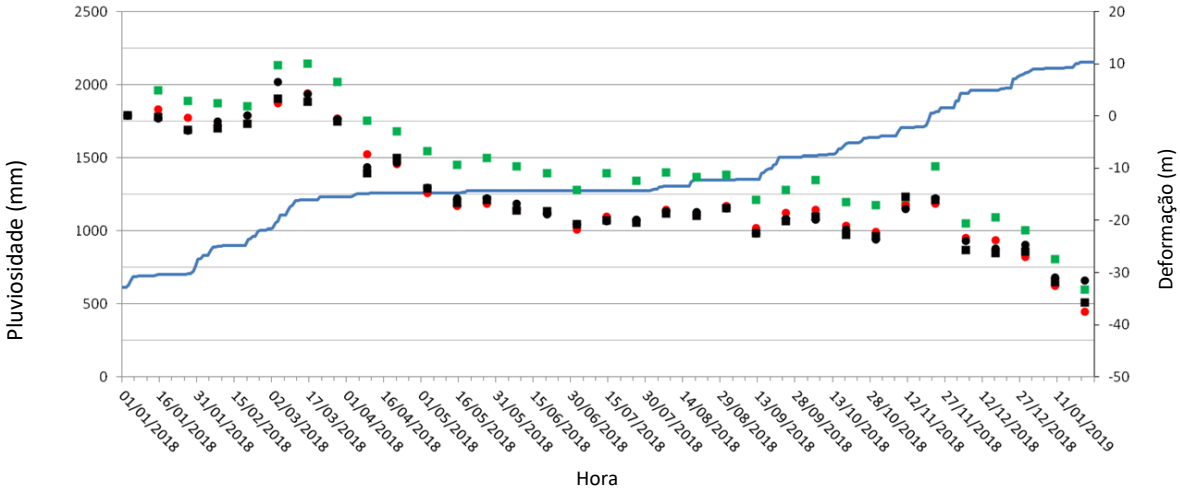
Em particular, a maioria dos pontos na parte inferior (Figura 46) e na crista da barragem (Figura 47) mostra que onde a precipitação foi baixa, de maio a setembro de 2018, houve uma deformação limitada. Durante o período que inicia em outubro de 2018, quando a precipitação aumentou, acelerações foram gravadas. As deformações nos rejeitos estão menos correlacionadas com a precipitação que aquelas na barragem, mostrando uma tendência quase linear, com poucos períodos de leve aceleração, associados apenas parcialmente com eventos de precipitação (Figura 48).



(a)

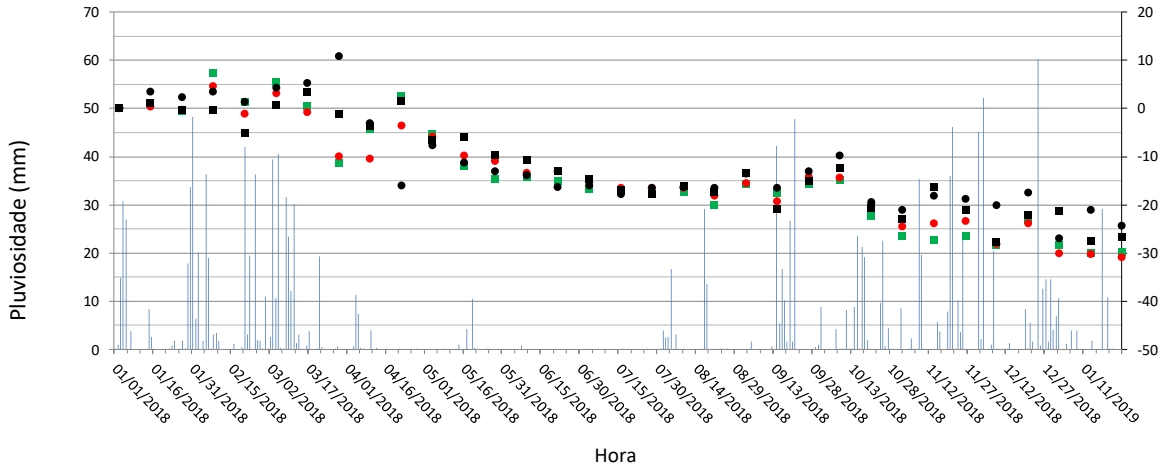


(b)

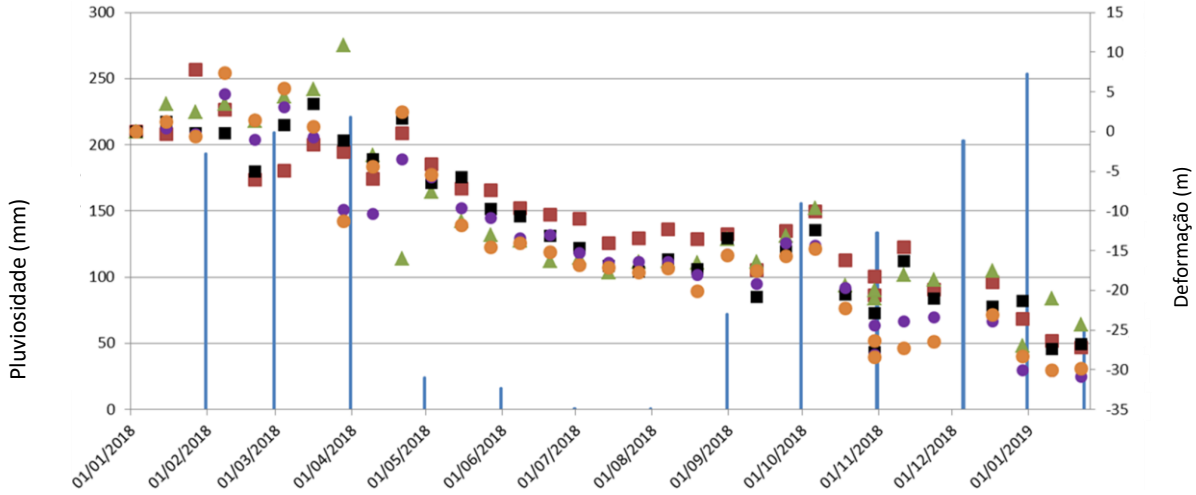


(c)

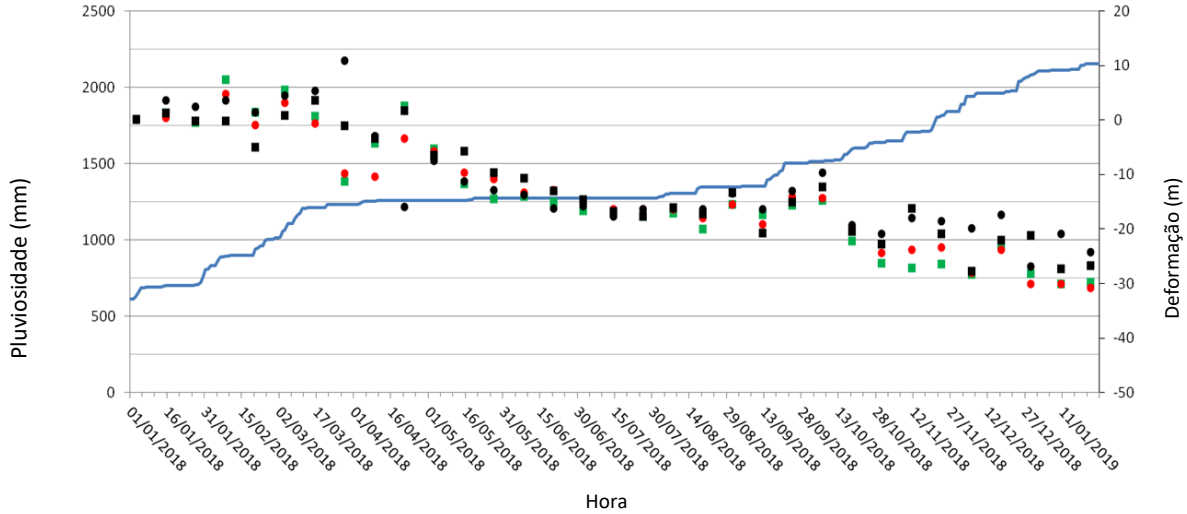
Figura 46: Comparação entre: (a) dados InSAR e precipitação diária, (b) dados InSAR e precipitação mensal, e (c) dados InSAR e precipitação cumulativa para os pontos localizados no pé da Barragem I



(a)



(b)



(c)

Figura 47: Comparação entre: (a) dados InSAR e precipitação diária, (b) dados InSAR e pluviosidade mensal, e (c) dados InSAR e precipitação cumulativa para os pontos localizados na crista da Barragem I

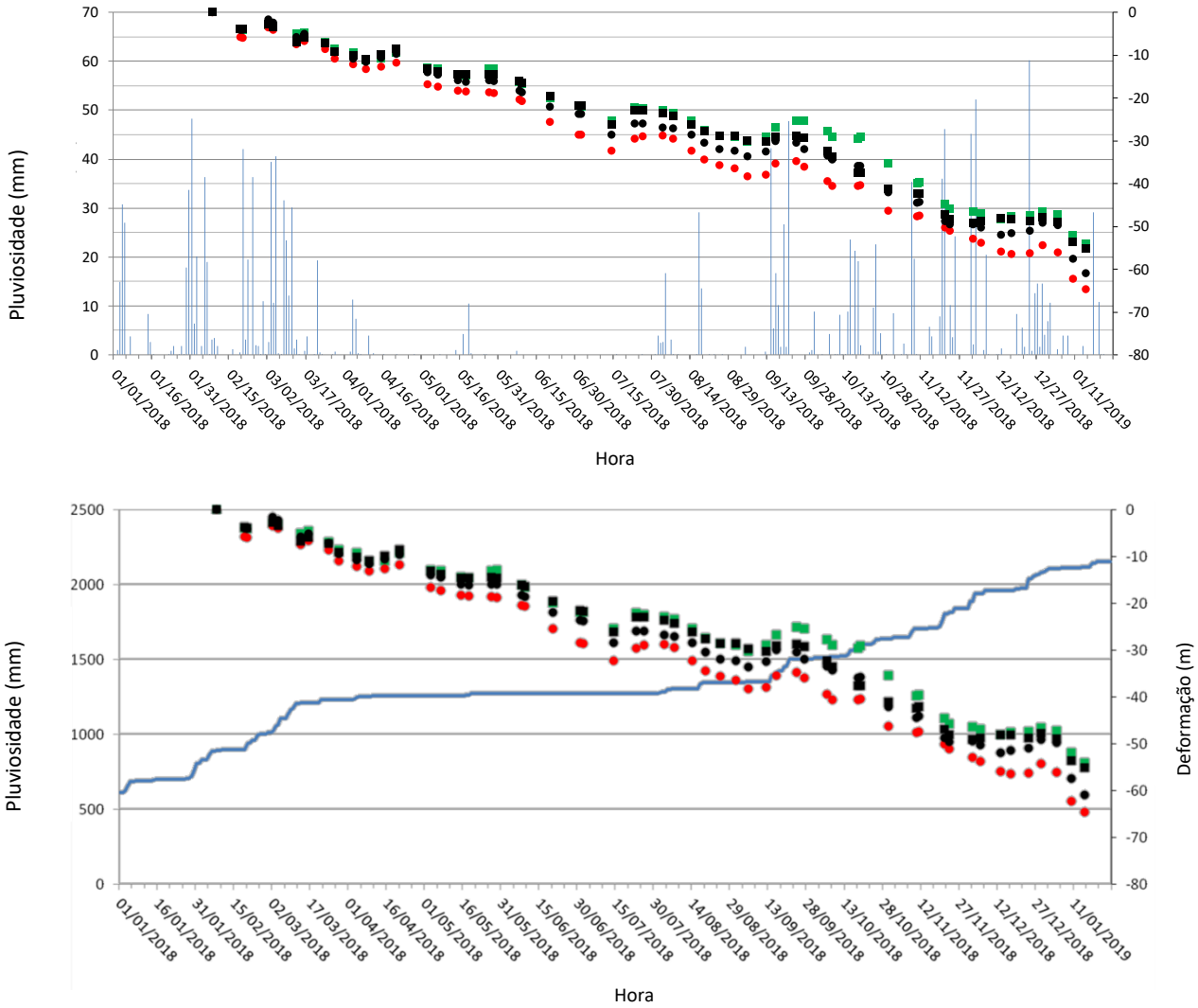


Figura 48: Comparação entre: (a) dados InSAR e precipitação diária e (b) dados InSAR e precipitação cumulativa para os pontos localizados dentro dos rejeitos

7. ANÁLISE DO SENTINEL-2

O objetivo da análise do Sentinel-2 foi investigar a dinâmica e as mudanças na superfície da Barragem I durante todo o ano anterior ao colapso. O foco da análise foi a dinâmica:

- do lago de decantação e das áreas úmidas nos rejeitos; e
- dos solos e da vegetação na face da barragem, dos rejeitos e adjacências, para uma análise indireta dos níveis de umidade durante o tempo.

Foram usadas imagens do satélite Multispectral Copernicus Sentinel-2 (S2), adquiridas do Centro de Dados Científicos Sentinel, da Agência Espacial Europeia (ESA). As imagens do Sentinel-2 são derivadas de dois satélites idênticos (2A e 2B), dispostos em órbita heliossíncrona. O Sentinel-2 incorpora uma resolução inovadora de faixa ampla (290 km), altamente espacial (10 m a 60 m) e temporal (~5 dias ou ~10 dias). O sensor do Sentinel-2 opera em 13 bandas espectrais, cobrindo os

domínios de frequência eletromagnética visíveis, quase infravermelhos ("NIR") e infravermelhos de ondas curtas ("SWIR").

A partir do Centro da ESA, 19 imagens do Sentinel-2 foram selecionadas de janeiro de 2018 a janeiro de 2019. Na Tabela 1, é mostrada a lista de imagens com a data de aquisição.

Tabela 1: Dados do Sentinel-2A e Sentinel-2B

N°.	Satélite	Data	N.	Satélite	Data
1	S2B	22 de janeiro de 2018	**11**	S2B	20 de agosto de 2018
2	S2B	13 de março de 2018	**12**	S2A	9 de setembro de 2018
3	S2A	27 de abril de 2018	**13**	S2B	24 de setembro de 2018
4	S2B	2 de maio de 2018	**14**	S2A	14 de outubro de 2018
5	S2B	22 de maio de 2018	**15**	S2B	18 de janeiro de 2018
6	S2A	1 de junho de 2018	**16**	S2A	23 de dezembro de 2018
7	S2B	16 de junho de 2018	**17**	S2B	7 de janeiro de 2019
8	S2A	6 de julho de 2018	**18**	S2B	17 de janeiro de 2019
9	S2B	21 de julho de 2018	**19**	S2A	22 de janeiro de 2019
10	S2A	15 de agosto de 2018			

Os conjuntos de dados foram pré-processados para correção atmosférica, para obter os valores de refletância. O fluxo de processamento seguinte consiste na seleção das bandas com resolução de 10 m e 20 m e da reamostragem de todos os dados para uma resolução maior. A análise e interpretação foram realizadas em diferentes composições de cores e em três diferentes índices calculados (Índice de Umidade, Índice de Água com Diferença Normalizada – NDWI e Índice de Vegetação com Diferença Normalizada – NDVI).

7.1 Lago de Decantação Dentro dos Rejeitos e Áreas Úmidas

As composições mais úteis foram selecionadas para destacar e seguir a evolução dos lagos de decantação e das áreas úmidas dentro dos rejeitos na Barragem I, para as quais as bandas de quase infravermelha – NIR e infravermelha de ondas curtas – SWIR foram usadas (RGB 8-4-3; RGB 12-8-3; RGB 8A-11-12).

7.1.1 Lago de Decantação

- De janeiro a junho de 2018: um lago de decantação foi detectado em todas as imagens (Figura 49a-b), localizado quase na mesma posição, perto do desemboque da captação acima. O NDWI de 27 de abril de 2018 confirma claramente a presença de um corpo d'água na parte

central da área úmida (Figura 51). Na Figura 51, o lago de decantação é mostrada em azul (a água tem o valor máximo) na parte central da área úmida (colorida em verde para o valor mínimo do índice de umidade).

- Em julho de 2018, o lago de decantação desaparece completamente, à medida que a superfície dos rejeitos seca (Figura 49c).
- Em agosto de 2018, o lago de decantação é detectado novamente (Figura 49d).
- A imagem no final de setembro de 2018 mostra uma extensão do lago de decantação e a presença de um segundo lago de decantação na parte sudeste (SE) da barragem (Figura 49e).
- Em outubro de 2018, os dois lagos de decantação visíveis em setembro de 2018 desaparecem.
- Em 18 de dezembro de 2018, os dois lagos de decantação estão visíveis novamente, e toda a superfície dos rejeitos está mais úmida se comparada com o final de setembro de 2018 (Figura 49f). No NDWI correspondente e no Índice de Umidade, o lago de decantação central é menos evidente que em abril de 2018, mas os valores negativos no NDVI indicam a presença de água.
- Em 7 de janeiro de 2019, a superfície do lago de decantação parece ter aumentado ainda mais desde dezembro de 2018, como confirmado pela elaboração do NDWI e Índice de Umidade. Por outro lado, nos 10 dias seguintes (17 de janeiro de 2019), o lago de decantação é altamente reduzido e tanto o NDWI e o Índice de Umidade confirmam a diminuição dos níveis de umidade na área. Até 22 de janeiro de 2019, em todas as imagens compostas, a situação parece inalterada e um lago de decantação perto do emboque permanece visível, conforme foi confirmado pela elaboração do NDWI e índice de umidade (Figura 53).

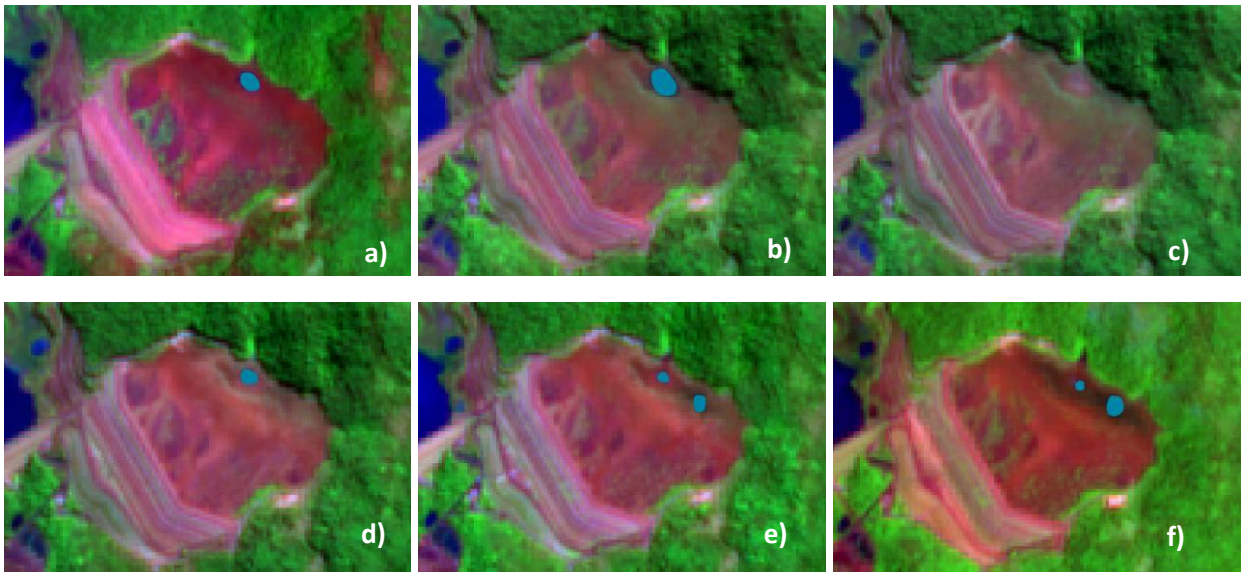


Figura 49: Dinâmica do lago de decantação (retratada em azul) na Barragem I em S-2: (a) 22 de janeiro de 2018, (b) 1 de junho de 2018, (c) 21 de julho de 2018, (d) 15 de agosto de 2018, (e) 23 de setembro de 2018, e (f) 18 de dezembro de 2019

7.1.2 Áreas Úmidas

Uma área úmida foi detectada na parte norte dos rejeitos. A extensão da área úmida mudou durante o período de monitoramento, chegando ao máximo em meados de março de 2018, e então diminuindo e permanecendo relativamente constante nos meses seguintes (abril a junho de 2018) (Figura 50a-b).

- Em julho de 2018, os limites da área úmida nos rejeitos (Figura 50c) parecem estáveis, se comparados com junho de 2018.
- Agosto e setembro de 2018 mostram um aumento na extensão da área úmida nos rejeitos, com relação a julho de 2018, mas não na extensão vista de abril a junho de 2018.
- Em outubro de 2018, foi observada uma acentuada diminuição na extensão da área úmida, enquanto em dezembro de 2018 e janeiro de 2019 é mostrada a área úmida alcançando quase sua extensão espacial máxima, principalmente em 18 de dezembro de 2018 e 7 de janeiro de 2019 (Figura 50d-e).

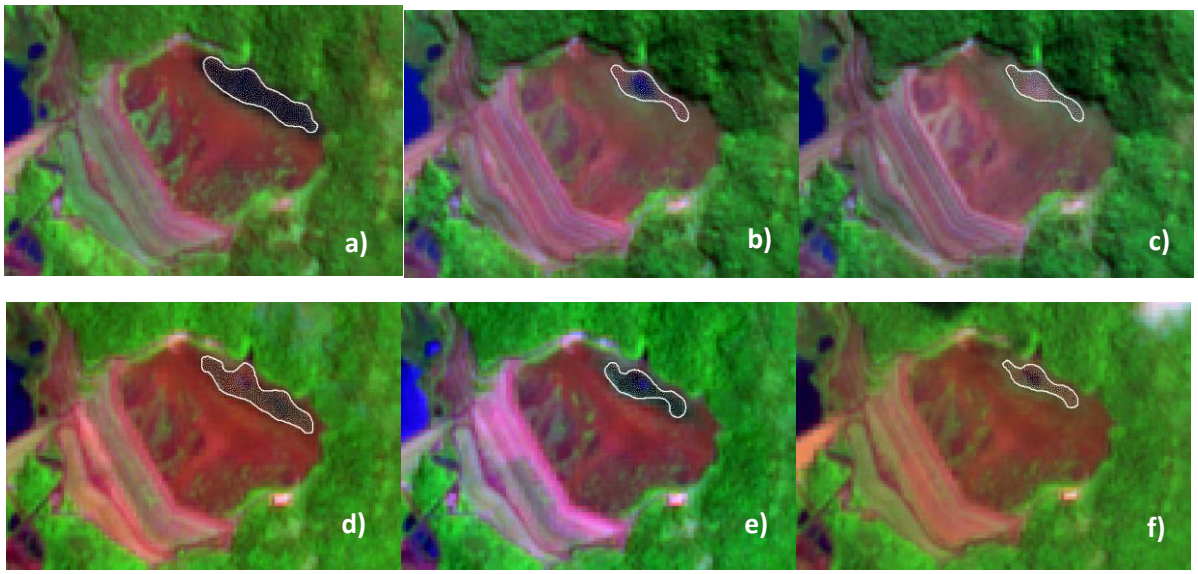


Figura 50: Dinâmica da área úmida (contorno branco) na Barragem I em S-2: (a) 13 de março de 2018, (b) 1 de junho de 2018, (c) 21 de julho de 2018, (d) 18 de dezembro de 2018, (e) 7 de janeiro de 2019, e (f) 22 de janeiro de 2019

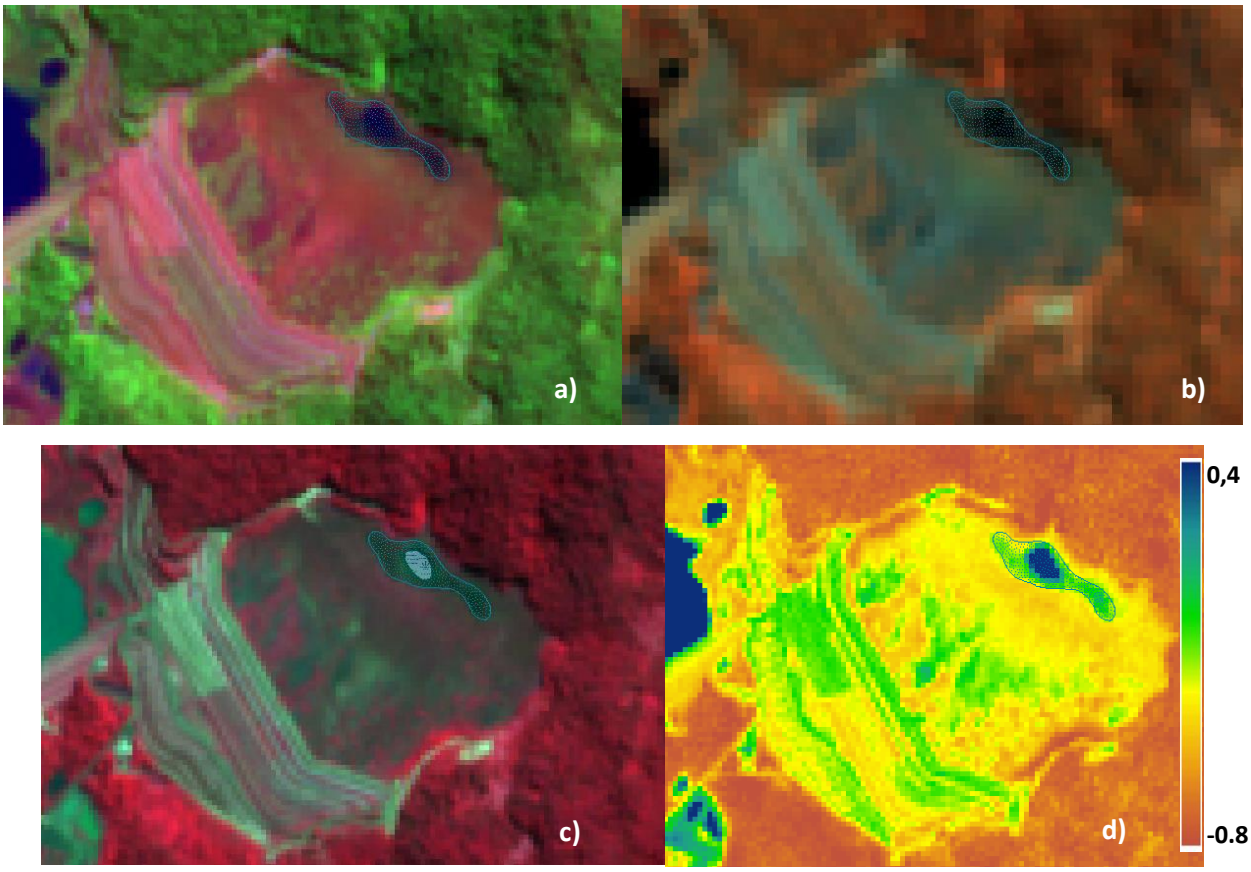


Figura 51: Dados S-2 para 27 de abril de 2018. elaborações usadas para identificar a área úmida e lago de decantação na parte de dentro. (a) RGB 12-8-3; (b) RGB 8a-11-12; (c) RGB 8-4-3; (d) NDWI

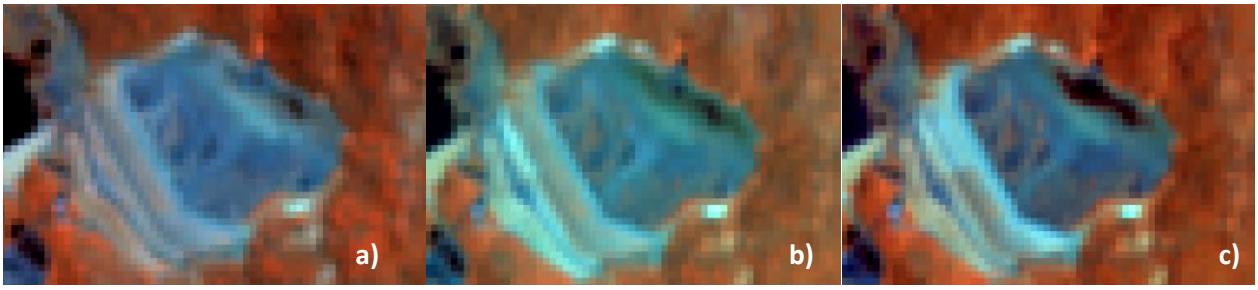


Figura 52: Comparação entre (a) 24 de setembro de 2018, (b) 18 de dezembro de 2018, (c) e 7 de janeiro de 2019, composições s-2 rgb 8a-11-12. É possível detectar a presença de um segundo lago de decantação em (a) 24 de setembro de 2018, (b) a presença de dois lagos de decantação em 18 de dezembro de 2018, e (c) o aumento geral da superfície de água em 7 de janeiro de 2019

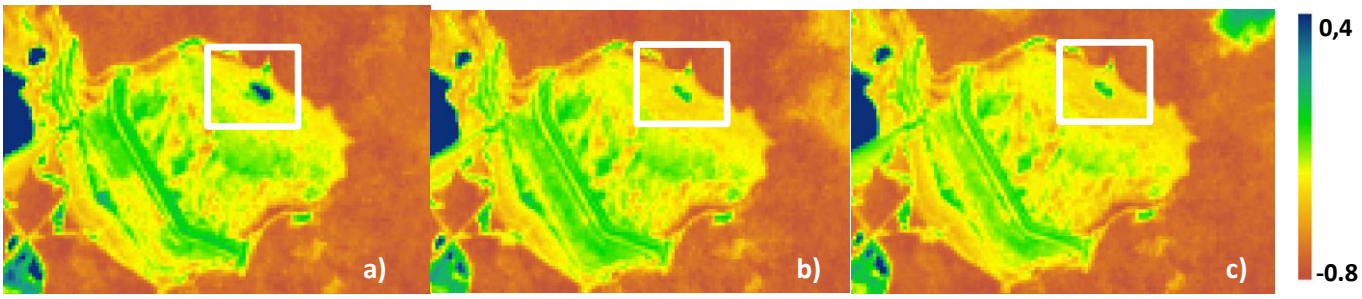


Figura 53: Comparação entre elaborações S-2 NDWI que mostram a diminuição progressiva da superfície da água na parte norte da Barragem I para (a) 7 de janeiro de 2019, (b) 17 de janeiro de 2019, e (c) 22 de janeiro de 2019

7.2 Área do Recuo

A elaboração e análise do NDWI destacam valores particularmente altos do NDWI na área do recuo de dezembro de 2018 a janeiro de 2019, indicando altos níveis de umidade neste setor da barragem durante esse período. Em particular:

- 18 de dezembro de 2018: A imagem NDWI (Figura 54) mostra a área centro-sul com valores mais altos de umidade em relação às adjacências e em relação aos meses anteriores. Embora o Índice de Umidade da mesma data seja incapaz de mostrar esta diferença relativa (possivelmente devido ao tipo de composição do solo), o NDVI confirma a ausência de vegetação. Isso indica que os valores mais altos de umidade não estão associados à presença da vegetação, mas mais provavelmente à presença de solo úmido.
- 7 de janeiro de 2019: Valores altos de NDWI semelhantes, conforme a imagem de 18 de dezembro de 2018.
- 17 de janeiro de 2019: A imagem do NDWI mostra valores mais baixos nesta área que os mostrados nas aquisições de imagens anteriores em dezembro de 2018 e janeiro de 2019.
- 22 de janeiro de 2019: A imagem do NDWI mostra valores baixos semelhantes à aquisição de imagem em 17 de janeiro de 2019 (Figura 53).

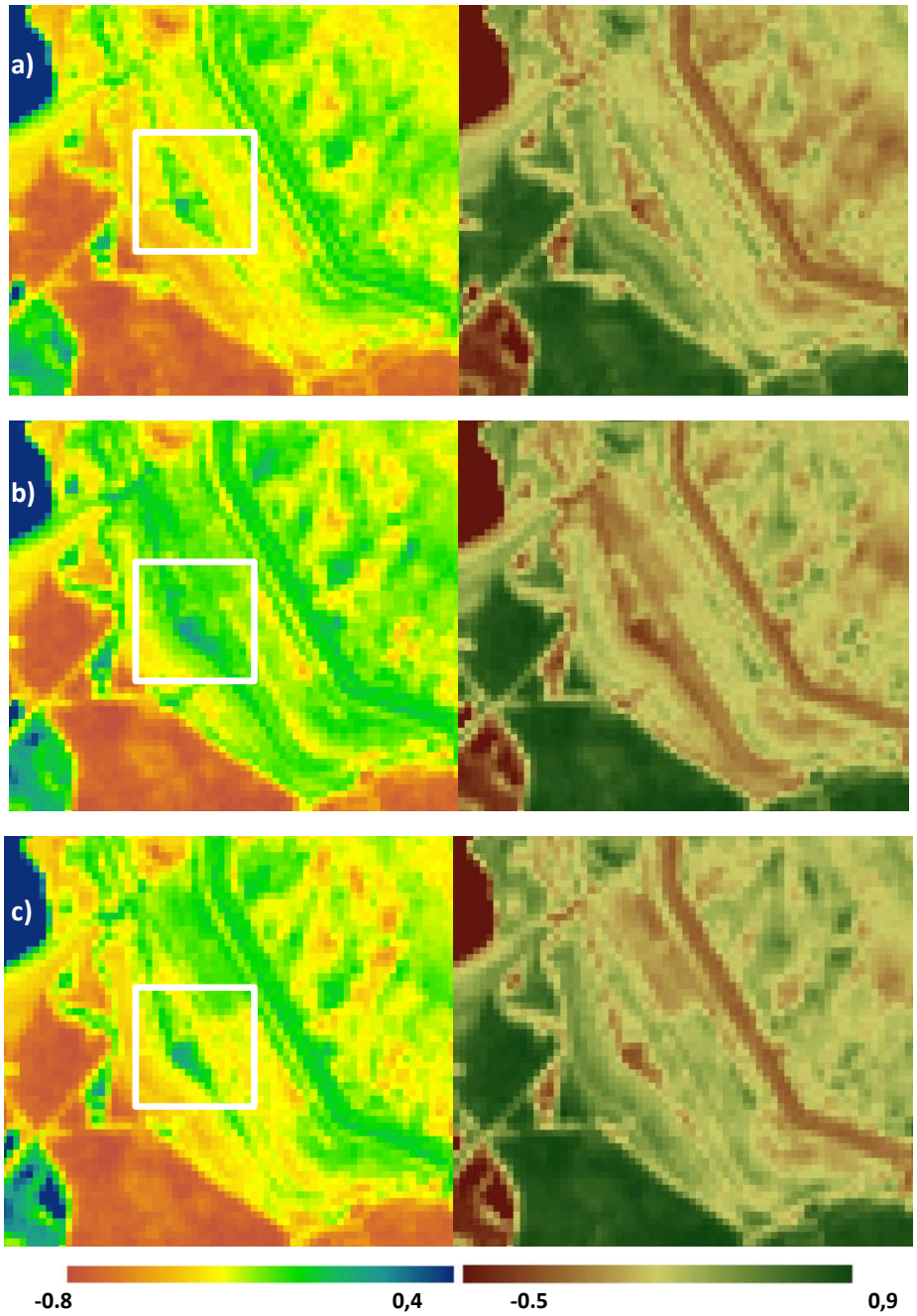


Figura 54: Comparação entre as elaborações S-2 NDWI E NDVI, mostrando o teor de umidade na área do recuo da barragem de dezembro de 2018 ao início de janeiro de 2019, com relação aos valores de outubro de 2018: (a) 14 de outubro de 2019, (b) 18 de dezembro de 2019, e (c) 7 de janeiro de 2019

7.3 Diferenças de Vegetação nos Rejeitos e na Frente da Barragem

Os dados multiespectrais do Sentinel-2 também forneceram informações sobre a dinâmica da vegetação na face da Barragem I. Em particular, a análise dos dados do Sentinel-2 na cobertura vegetal pode ser resumida como se segue:

- Em janeiro de 2018, a face da barragem não tem vegetação ou apresenta cobertura vegetal limitada, embora a superfície dos rejeitos tenha alguma área vegetada, principalmente grama.
- Em março de 2018, a face da barragem e os rejeitos mostram altas respostas de sinal associadas à presença da vegetação.
- Em abril de 2018, a vegetação da face da barragem parece ter sido cortada (linha reta entre as áreas vegetadas (parte sul) e sem vegetação (parte norte)). Nos rejeitos, a resposta da vegetação é semelhante à imagem de março de 2018. O índice NDWI destaca duas zonas distintas com diferenças relevantes de umidade (provavelmente devido à vegetação) (Figura 51).
- Em maio de 2018, a vegetação na face da barragem e rejeitos têm a mesma distribuição que em abril de 2018.
- Em junho de 2018, a vegetação da face da barragem parece ter sido cortada e a rebrota é visível. A vegetação sobre os rejeitos não mudou com relação a maio de 2018.
- Em julho de 2018, em toda a área, há uma resposta mais fraca da vegetação e os rejeitos próximos à crista da barragem estão muito mais secos que nos meses anteriores. Estas condições são provavelmente o resultado de baixa precipitação.
- Em agosto de 2018, a vegetação está muito baixa e os rejeitos próximos à crista da barragem estão muito mais secos que em julho de 2018 (apesar da presença do lago de decantação).
- Em setembro de 2018, não há alterações na resposta da vegetação na face da barragem em comparação com agosto de 2018. A rebrota da vegetação é visível nos rejeitos.
- Em outubro de 2018, a face da barragem e os rejeitos têm uma resposta muito alta da vegetação.
- Em 18 de dezembro de 2018, a parte inferior da face da barragem não está vegetada, com a grama aparentemente tendo sido cortada. Os rejeitos estão apresentando vegetação semelhante à de outubro de 2018. O NDWI mostra uma segunda área com valores mais altos de umidade na face da barragem. O NDVI confirma a ausência de vegetação. O índice de umidade não consegue mostrar esta diferença relativa, possivelmente devido aos altos níveis de umidade do solo. A imagem de 22 de dezembro de 2018 mostra uma evidente mudança na face da barragem: a vegetação da parte norte foi completamente cortada (linha reta).
- Em 7 de janeiro de 2019, muito mais vegetação é observada sobre os rejeitos. A parte norte da face da barragem ainda não está vegetada. Em 17 de janeiro de 2019, parece que a situação se inverteu: a parte norte mostra a rebrota da vegetação enquanto a parte sul está completamente cortada (Figura 55). Similarmente, em 22 de janeiro de 2019, a parte sul mostra algumas evidências de rebrota de vegetação, confirmadas pelo NDVI. O índice de umidade mostra um aumento gradual de secura na face da barragem e rejeitos, devido à falta de chuvas em janeiro. A imagem NDVI mostra uma rebrota limitada da vegetação na face da barragem.

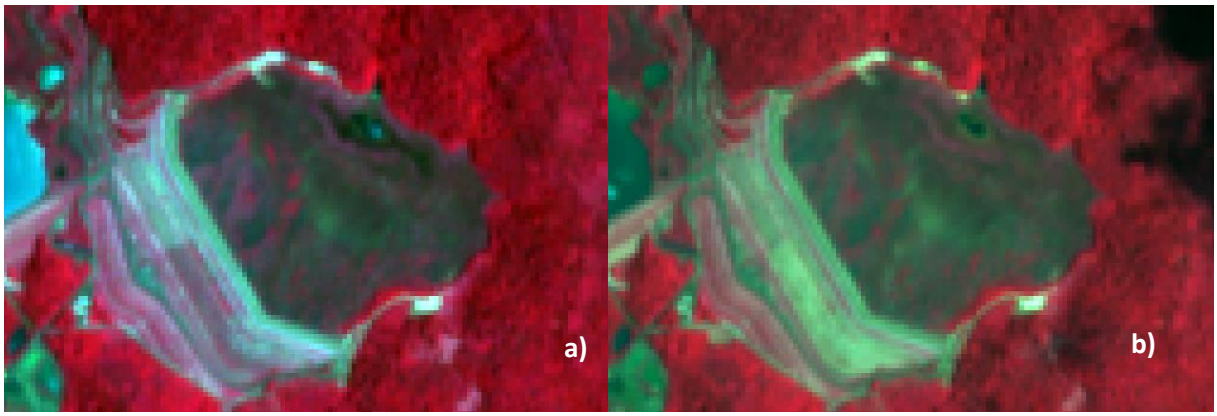


Figura 55: Comparação entre as aquisições do S-2 em (a) 7 de janeiro de 2019 e (b) após 10 dias (17 de janeiro de 2019). Observe a redução da área úmida na parte norte da Barragem I

8. ANÁLISE DE IMAGEM ÓPTICA DE SATÉLITE COM VHR

O objetivo da análise da imagem óptica por satélite de altíssima resolução (VHR), juntamente com os resultados do Sentinel-2 na Seção 7, foi investigar a dinâmica e as mudanças na superfície da barragem durante o ano anterior ao rompimento.

As imagens foram coletadas pelos seguintes satélites comerciais:

- O satélite GeoEye-1, da Digital Globe. O sensor opera em quatro bandas, do visível ao quase infravermelho, e simultaneamente na banda pancromática. A resolução é de 1,65 m para as imagens multiespectrais e 0,41 m para as imagens pancromáticas.
- O WorldView-3 (WV-3), da Digital Globe, é o primeiro sensor comercial de satélite de múltiplas cargas, superespectral e de alta resolução. Os sensores do WV-3 coletam as bandas pancromáticas e multiespectrais padrão, SWIR de oito bandas e imagens 12 CAVIS. O satélite WorldView-3 fornece resolução pancromática de 0,31 m, resolução multiespectral de 1,24 m, SWIR de 3,7 m e resolução CAVIS de 30 m.
- A constelação Pléiades pela Airbus Defense & Space. Pléiades 1A e 1B têm especificações idênticas, com aquisição de imagem de 0,5 m no modo pancromático e 2 m no modo multiespectral (azul, verde, vermelho e NIR).

As quatro imagens de grupos de satélites (conjunto de dados pancromático e multiespectral) analisadas foram obtidas nas seguintes datas:

- 2 de junho de 2018, WV-3, 8 bandas multiespectrais; 1 banda pancromática;
- 21 de julho de 2018, WV-3, 8 bandas multiespectrais; 1 banda pancromática;
- 23 de setembro de 2018, GE-1, 4 bandas multiespectrais; 1 banda pancromática; e
- 18 de janeiro de 2019, Pleaides, 4 bandas multiespectrais; 1 banda pancromática.

Os dados multiespectrais foram analisados por diferentes processamentos, incluindo correção radiométrica e conversão para radiância espectral de topo de atmosfera ("TOA"), co-registração e sub-configuração de todas as imagens multiespectrais e pancromáticas, configuração de diferentes composições de cores e processos de alongamento de descorrelação e cálculo de dois índices (NDWI e NDVI).

Os dados em VHR, que abrangem o período de junho de 2018 a janeiro de 2019, confirmam todas as observações feitas com o Sentinel-2, proporcionando uma resolução mais alta na definição de objetos e características.

Todos os dados ópticos de satélite foram comparados com as séries temporais de dados pluviométricos, para apoiar sua interpretação.

8.1 Lago de Decantação Dentro dos Rejeitos e Áreas Úmidas

O lago de decantação dentro dos rejeitos e a área úmida foram analisadas e mapeadas. Se comparadas com as imagens do Sentinel-2, todas as características observadas anteriormente foram confirmadas.

8.1.1 Lago de Decantação

- Na aquisição de junho de 2018 do WV-3 (2 de junho de 2018), o lago de decantação (retratada em azul na coluna direita da Figura 56) tem a mesma extensão projetada nos dados do Sentinel- 2 do mesmo período (1 de junho de 2018). A posição e o tamanho da superfície da água são confirmados pelos índices NDWI e NDVI.

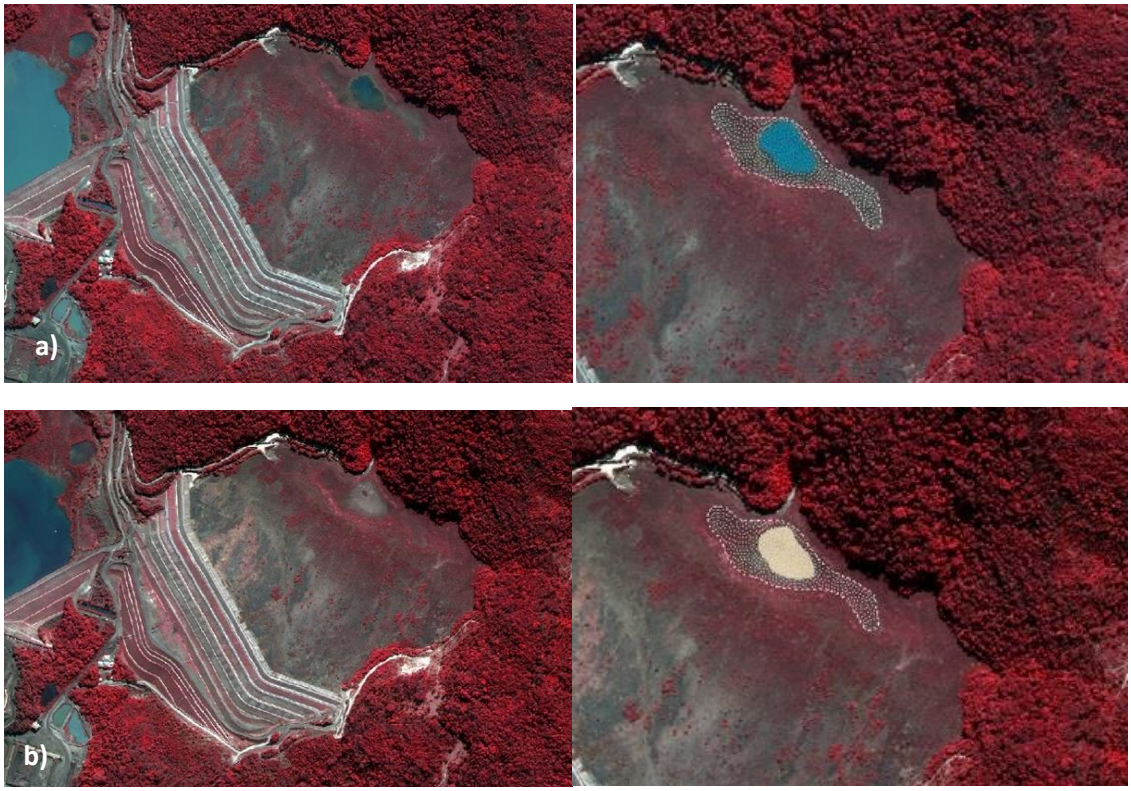
- Na aquisição de julho de 2018 do WV-3 (22 de julho de 2018), o lago de decantação desapareceu completamente similarmente aos dados do Sentinel-2 (21 de julho de 2018). Devido à ausência de água superficial, os sedimentos do lago de decantação são claramente visíveis (alta refletividade em todas as bandas) (retratados em marrom claro na Figura 56b, coluna da direita).

- Na aquisição de setembro de 2018 do GE-1 (23 de setembro de 2018), o lago de decantação, conforme observado nos dados do Sentinel-2, está novamente visível e confirmada pelos índices NDWI e NDVI. Um segundo lago de decantação é detectado na parte SE da área úmida (retratada em azul na Figura 56c, coluna da direita). A resolução aumentada, em particular o modo pancromático de 0,5 m, forneceu detalhes adicionais para as adjacências da área do lago de decantação (Figura 57). Uma característica interessante é o possível represamento do emboque principal da Barragem I por uma berma de terra visível pela primeira vez em setembro de 2018 (Figura 57b).

- Na aquisição de janeiro de 2019 do Pleaides (18 de janeiro de 2019), o lago de decantação central está presente e mais largo que na imagem em VHR de setembro de 2018 (Figura 56d). A segunda na parte SE da área úmida não está mais visível. O represamento ainda está presente e completo em janeiro de 2019, provavelmente causando concentração de água a montante, confirmada pelo índice NWVI (Figura 57d).

8.1.2 Área Úmida

- Na aquisição de junho de 2018 do WV-3 (2 de junho de 2018), a área úmida (contorno branco na Figura 56a, coluna da direita) tem a mesma extensão projetada nos dados do Sentinel-2 do mesmo período (1 de junho de 2018). O tamanho da área úmida também é confirmado pelos índices NDWI e NDVI.
- Na aquisição de julho de 2018 do WV3 (22 de julho de 2018), o contorno da área úmida (contorno branco na Figura 56b) é igual ao mês anterior e aos dados do Sentinel-2 do mesmo período (21 de julho de 2018).
- Na aquisição de setembro de 2018 do GE-1 (23 de setembro de 2018), a área úmida tem uma extensão mais ampla do que aquela de julho de 2018, mas similar aos dados do Sentinel-2 (24 de setembro de 2018). O tamanho da área úmida é confirmado pelos índices NDWI e NDVI GE-1.
- Na aquisição de janeiro de 2019 do Pléaides (18 de janeiro de 2019), a área úmida tem a mesma extensão que os dados do Sentinel-2 (17 de janeiro de 2019).



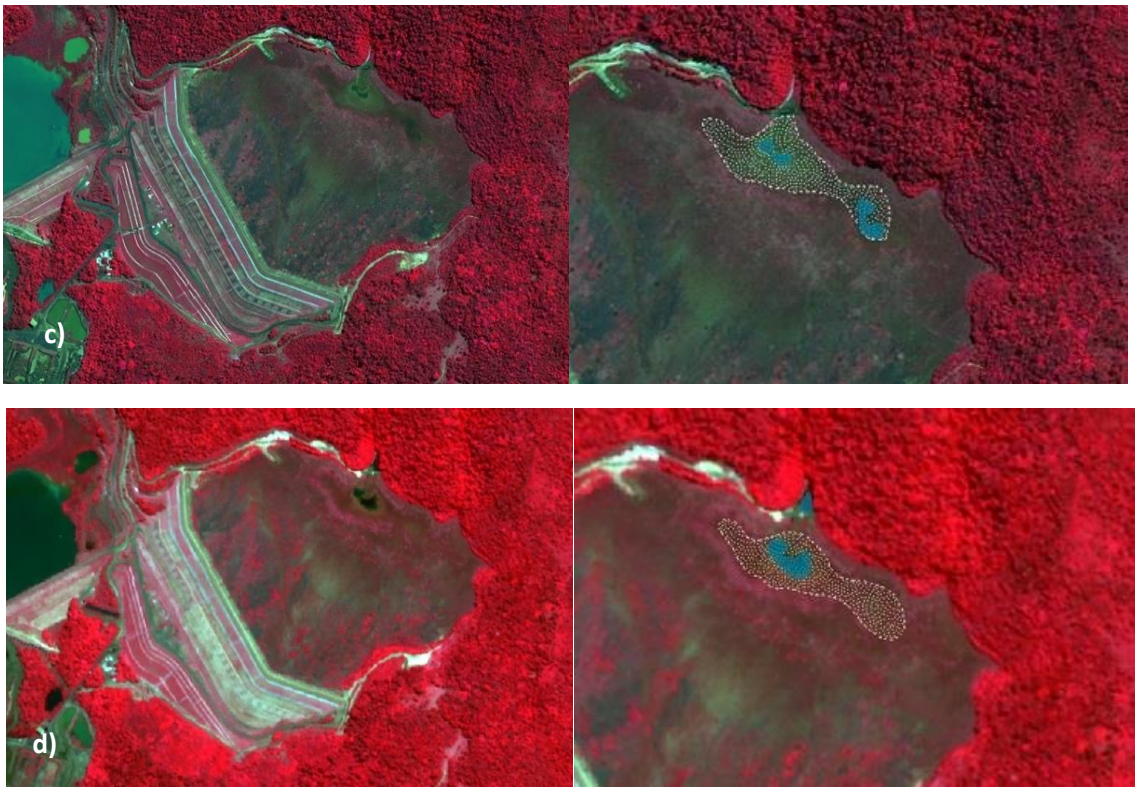


Figura 56: Coluna da esquerda: dinâmica do lago de decantação e da área úmida de junho de 2018 a janeiro de 2019: (a) 2 de junho de 2018, WV3 RGB 654; (b) 22 de Julho de 2018, WV3 654; (c) 23 de Setembro de 2018, GE-1 RGB 432; (d) 18 de janeiro de 2019, Pléiades RGB 432. Coluna da direita: detalhe da área úmida (linha branca) e lago de decantação (polígono azul)

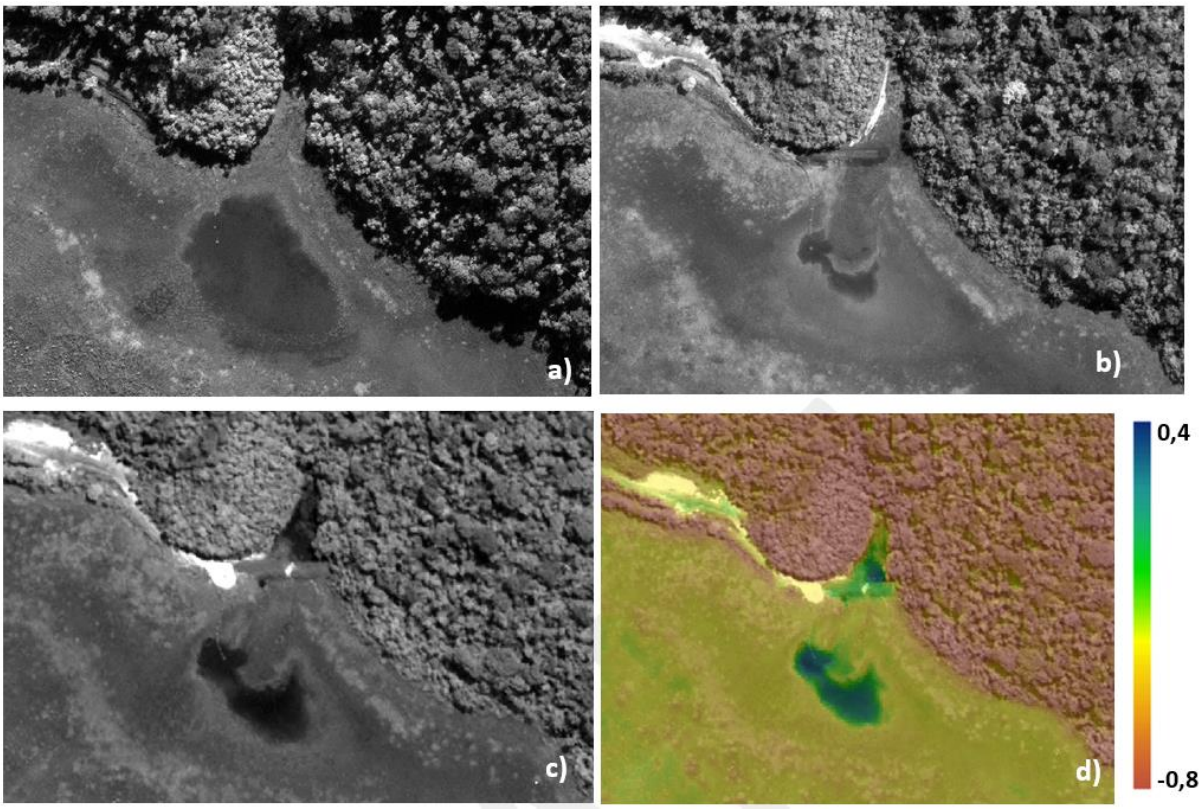


Figura 57: Possível represamento do emboque principal da Barragem I por uma berma de terra. (a) área em junho de 2018; (b) início do represamento do emboque em setembro de 2018; (c) o represamento está completo em janeiro de 2019; e (d) a água se concentra a montante, o que é confirmado pelo índice NWVI

8.2 Diferenças de Vegetação na Face da Barragem e Sobre os Rejeitos

A análise da vegetação na face da barragem e rejeitos foi conduzida principalmente através do NDVI, NDWI e alongamento de descorrelação de todas as composições de cores.

Dois padrões de vegetação diferentes são observados na face da barragem. A parte inferior da face da barragem mostra grama e vegetação que são homogêneas e estáveis (Figura 58). O índice NDVI e a composição de cores diferem apenas na aquisição de julho de 2018 (Figura 58b).

A parte superior da frente da barragem não é vegetada homogeneamente e é majoritariamente nua (amarelo a marrom claro no NDVI), com apenas pequenas manchas de grama (verde claro no NDVI) mais visíveis em junho de 2018 e setembro de 2018 (Figura 58a-c). Em janeiro de 2019 Figura 58d), esta área da face da barragem foi caracterizada por duas zonas diferentes: a zona norte é esparsamente vegetada, e a zona sul está quase completamente limpa (corte de vegetação). A mesma situação é identificada na imagem do Sentinel-2 de 17 de janeiro de 2019.

Ao comparar as quatro datas em VHR, é possível identificar três zonas diferentes nos rejeitos próximos à crista da barragem (Figura 59): a primeira ("1" na Figura 59a) é caracterizada por uma vegetação esparsa e estável na forma de um "Y" invertido; a segunda área ("2" na Figura 59a) é menos vegetada e caracterizada por rejeitos muito escuros, provavelmente associados a um nível de

umidade relacionada ao NDWI; a terceira área ("3" na Figura 59a), na parte SE, parece estar seca e brilhante. Estas três áreas permanecem estáveis ao longo do tempo, exceto em julho de 2018, quando passam por mudanças devido a condições mais secas (Figura 59b-d).

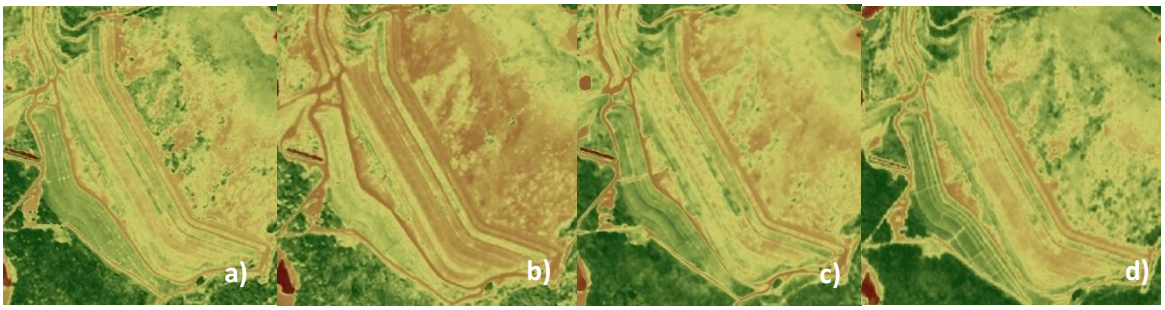


Figura 58: Comparação entre os índices NDVI de junho de 2018 a janeiro de 2019: (a) 2 de junho de 2019; (b) 22 de julho de 2018; (c) 23 de setembro de 2018; (d) 18 de janeiro de 2019

Em particular, em junho de 2018, área "1" é caracterizada pela presença de vegetação; a área adjacente "2" tem menos vegetação e solos escuros; e a área "3" pode ser distinta por solos brilhantes e secos. Em julho, toda a área tem mudanças evidentes: a vegetação na área "1" desaparece, conforme confirmado pelos índices NDVI (Figura 59d); a área "2" com solo escuro aparece também mais seca e menos vegetada; e a área "3" aparece mais brilhante e menos vegetada.

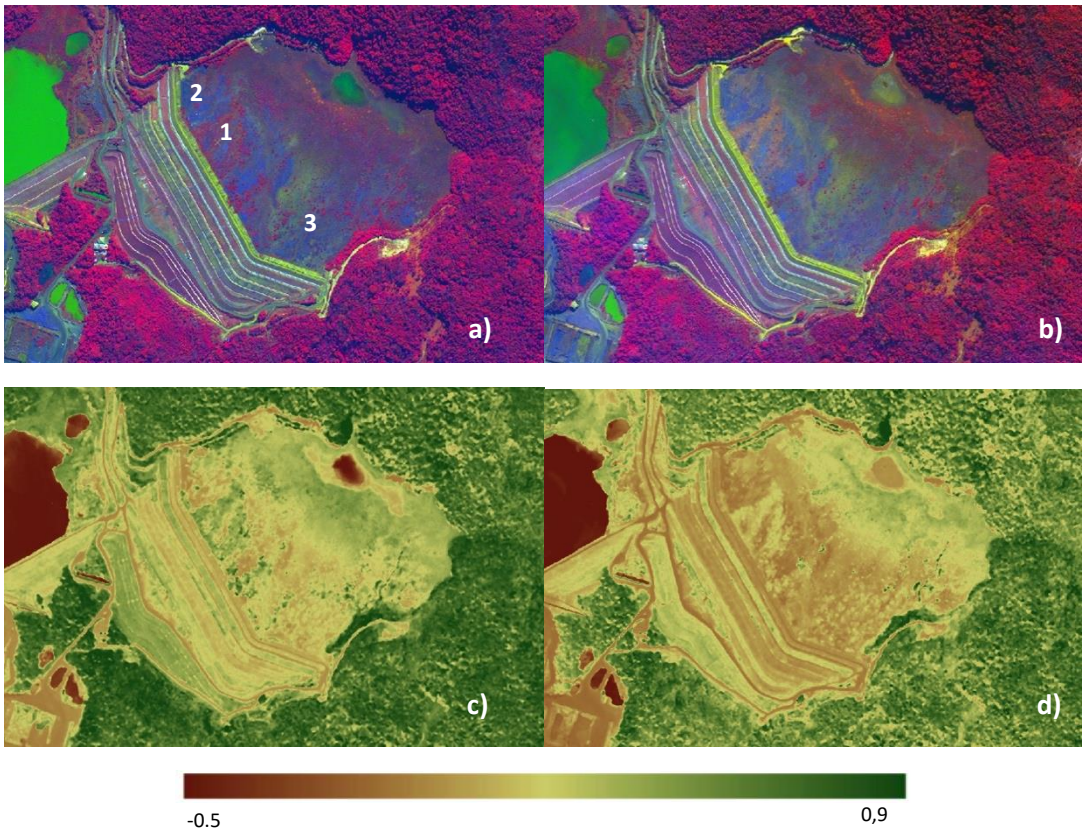


Figura 59: Comparação entre principais condições sazonais: (esquerda) imagem de junho de 2018 do WV-3 (DS 641 e NDVI) e (direita) imagem de julho de 2018 do WV-3 (DS 641 e NDVI)

Com relação às imagens do Sentinel-2 de 10 m, a maior resolução destes dados multiespectrais (de 1,2 m a 2 m) suportados pela banda pancromática (0,3 m a 0,5 m), permite enxergar alguns detalhes sobre a face da barragem que não eram visíveis antes ou só podiam ser presumidos.

Em particular, na imagem de 2 de junho de 2018 do WV-3, na parte lisa central da face da barragem, é possível ver uma área com resposta espectral diferente, se comparada com os arredores. O valor mais alto do NDWI (provável anomalia de umidade), se comparado com os arreadores, e a alta absorção na Composição de Falsa Cor (FCC) e em imagem pan (pixels pretos), são provavelmente associados à presença de água (Figura 60).

Figura 60: WV-3 de 2 de junho de 2018. Esquerda para a direita: composição de falsa cor RGB 654, pan, e NDWI

Em 22 de julho de 2018, uma área com resposta espectral diferente persiste com o mesmo valor de NDWI mais alto, em comparação com os arredores.

Na imagem de 23 de setembro de 2018, a anomalia destacada em junho e julho de 2018 é mascarada por fatores antropogênicos. Existem alojamentos e instalações de trabalho na área. É possível observar a construção de uma nova canaleta de drenagem (Figura 61c).

Na imagem de 18 de janeiro de 2019, a anomalia e as instalações de trabalho não estão mais presentes (Figura 61d).

8.3 Atividade Antrópica/Alterações

A análise da imagem em VHR permitiu observações de mudanças específicas na barragem e nos rejeitos, incluindo:

- a presença de uma provável anomalia de umidade na parte central do recuo da barragem, observável entre junho e julho de 2018 (Figura 60 e Figura 61a-b); em julho de 2018, parece que a construção de uma canaleta suplementar começou (Figura 61b);
- modificações na mesma área na imagem de setembro de 2018, incluindo a construção de canaletas de drenagem com instalações de apoio (Figura 61c); em janeiro de 2019, este canal não está presente (situação inversa a junho de 2018), nem estão as instalações e alojamentos (Figura 61d);
- outras modificações, principalmente concernentes ao sistema de drenagem frontal da barragem, ocorridas de setembro de 2018 a janeiro de 2019 (Figura 62); a partir da comparação da imagem pan, parece que o sistema de drenagem com canaletas foi modificado

na área. A canaleta inferior no círculo vermelho, visível em setembro de 2018, foi removida em janeiro de 2019 e, no lado direito, uma nova canaleta está presente (F1). À esquerda do círculo vermelho, parece que existem novos trabalhos na canaleta esquerda (F2). F3 indica que o canal horizontal não é claramente visível devido a uma possível modificação da superfície ou à menor resolução de imagem do Pleaides com relação ao Geoeye-1 (0,4 m a 0,5 m); e

- possível represamento do emboque principal da Barragem I por uma berma de terra começando em setembro de 2018. Esse represamento ainda está presente em janeiro de 2019 e provavelmente gera concentração de água a montante (Figura 57).

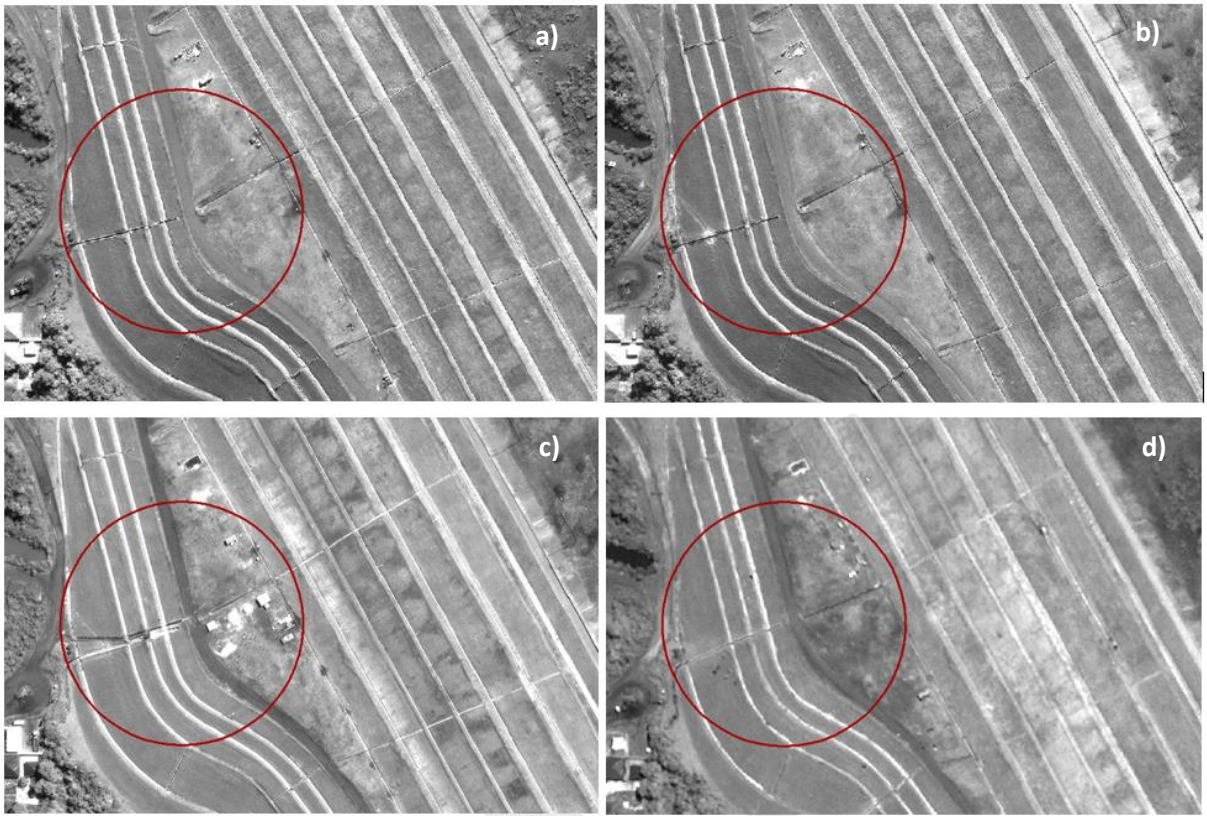


Figura 61: Imagens pan de todas as quatro datas em VHR: (a) 2 de junho de 2018, (b) 22 de julho de 2018, (c) 23 de setembro de 2018, e (d) 18 de julho de 2019

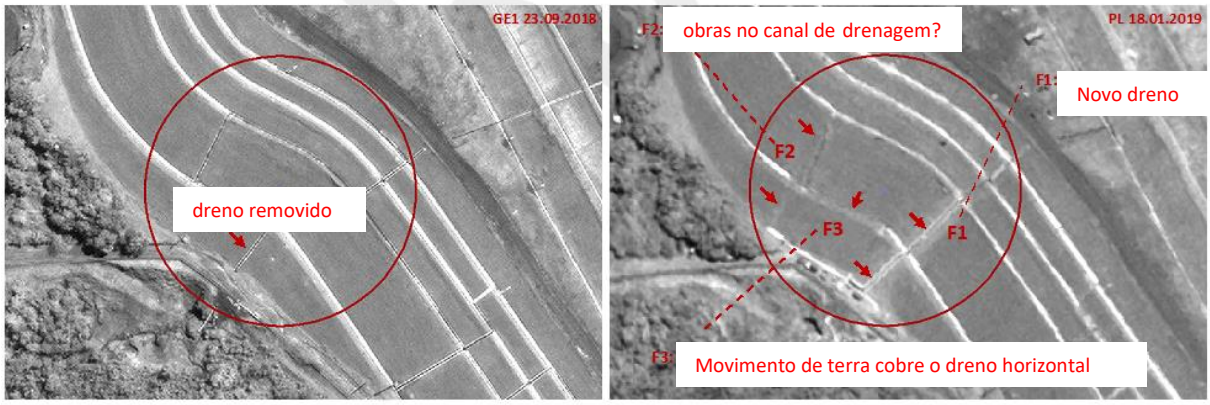


Figura 62: Comparação entre imagens pan do Pleaides e GE-1 de 23 de setembro de 2018 e 18 de janeiro de 2019

8.4 Correlação com dados pluviométricos

Os dados pluviométricos diários de 2018 a janeiro de 2019 coletados do pluviômetro F18, conforme gravado no Apêndice C, foram comparados com os dados do Sentinel-2 e em VHR.

De janeiro a final de junho de 2018 (Figura 63), a maior parte da precipitação está concentrada nos primeiros três meses do ano. O alto nível de umidade destacado na imagem do Sentinel-2 de 13 de março de 2018 é provavelmente a consequência desse período chuvoso. Apesar da queda progressiva das chuvas de abril a junho de 2018, todas as imagens mostram uma situação estável concernente à presença do lago de decantação nos rejeitos.

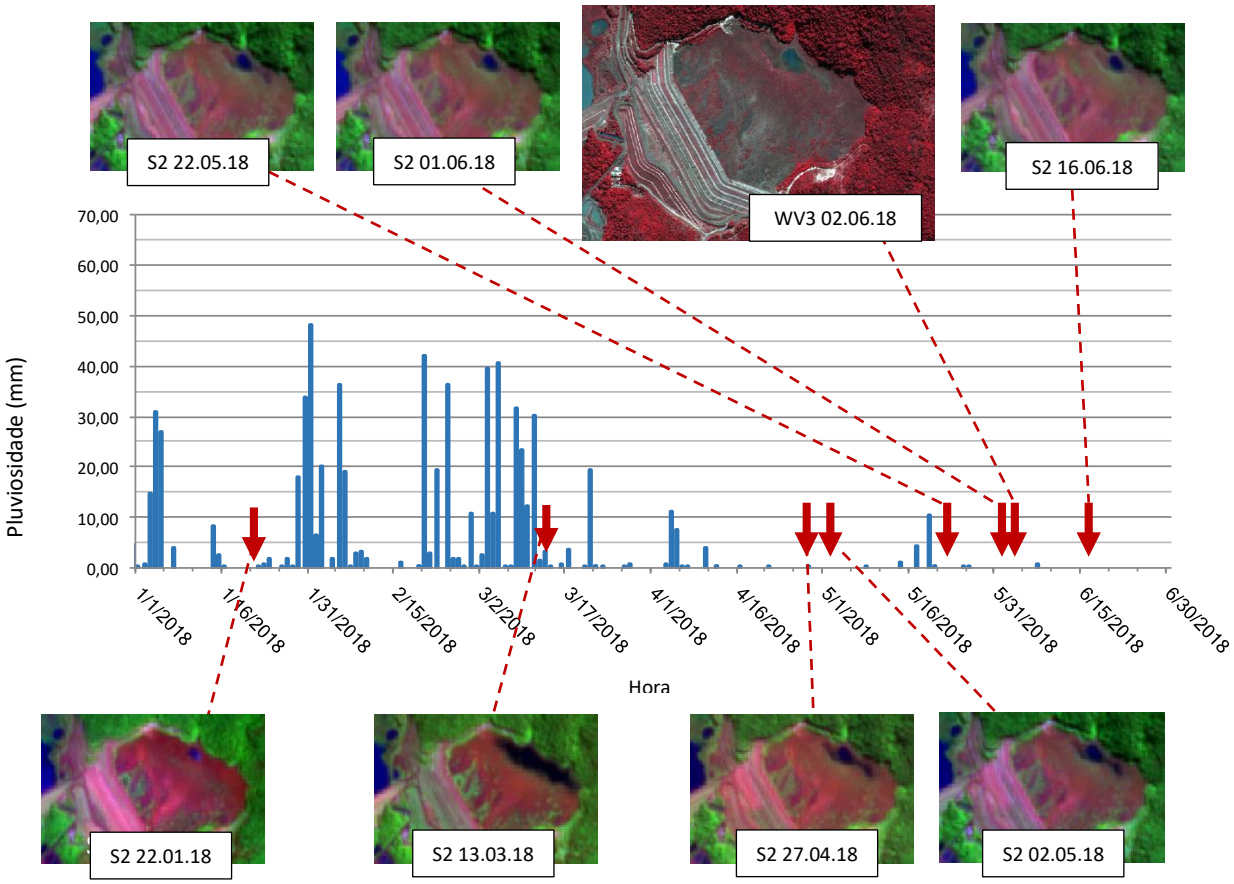


Figura 63: Dados Pluviométricos diários (barras azuis) de 1 de janeiro de 2018 a 30 de junho de 2018. A posição cronológica das imagens de satélite é mostrada pelas setas vermelhas

De julho de 2018 até o final de setembro de 2018 (Figura 64), a precipitação se concentra após meados de setembro. Todas as imagens para julho de 2018 confirmam o período seco, com a ausência do lago de decantação e condições geralmente secas da barragem (rejeitos, solos e vegetação). Em agosto de 2018, apesar da falta de precipitação intensa, o lago de decantação está presente na imagem do Sentinel-2. A consequência da precipitação em meados de setembro de 2018 é provavelmente mostrada nas imagens pela presença de dois lagos de decantação nos rejeitos.

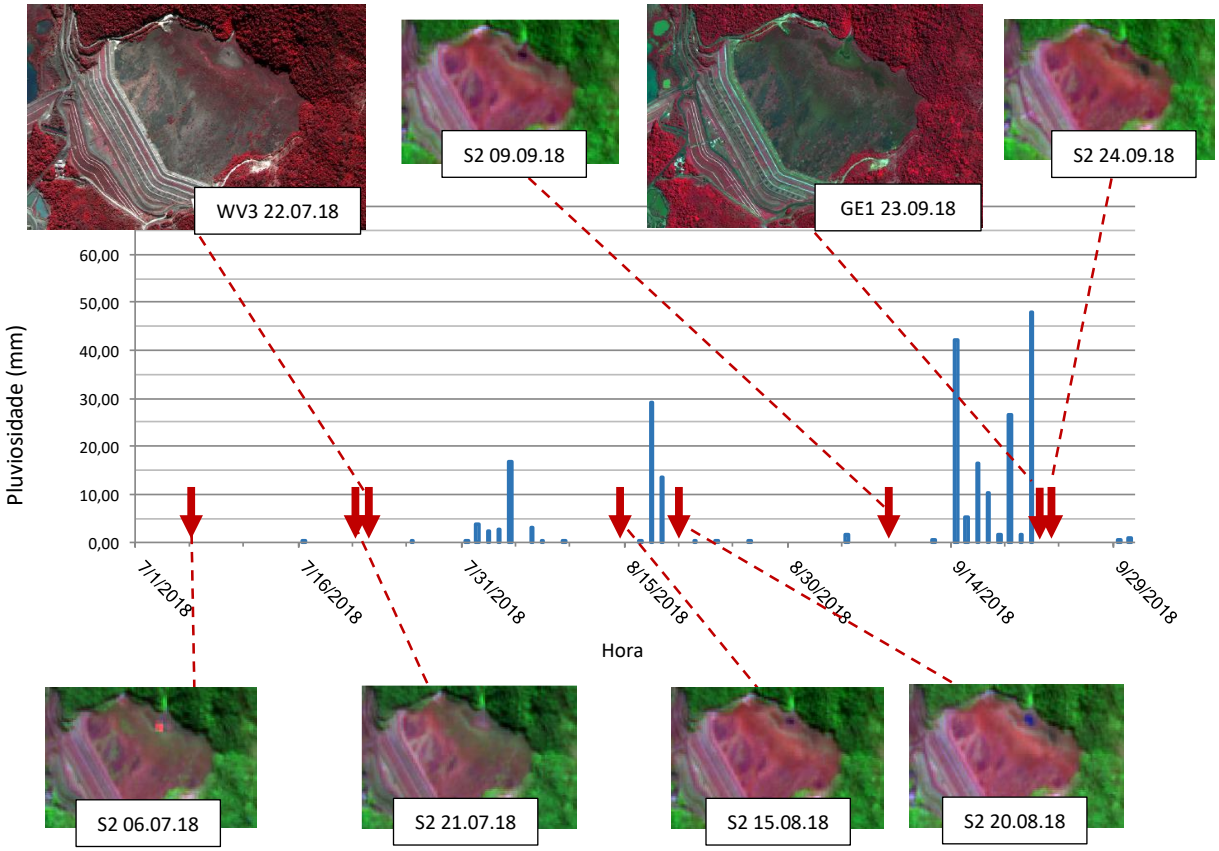


Figura 64: Dados pluviométricos diários (barras azuis) de 1 de julho de 2018 a 30 de setembro de 2018. A posição cronológica das imagens de satélite é mostrada pelas setas vermelhas

O período de outubro de 2018 até o início de janeiro de 2019 (Figura 65) é caracterizado por um padrão pluviométrico mais homogêneo. Mas, apesar disto, a imagem de 14 de outubro de 2018 não mostra o lago de decantação do final de setembro (GE-1 em 23 de setembro de 2018 e S-2 em 24 de setembro de 2018). O lago de decantação nos rejeitos está novamente visível em dezembro de 2018.

A extensão do lago de decantação está em um máximo na imagem do S-2 de 7 de janeiro de 2019 e diminui ao longo das duas semanas seguintes (imagem do S-2 de 17 de janeiro de 2019), aparentemente devido à falta de chuva. A partir das mesmas imagens, é possível observar a redução da área úmida. Essa dinâmica é confirmada pelas elaborações do NDWI do S-2 que mostram a diminuição progressiva da superfície da água na parte norte da Barragem I em janeiro de 2019 (Figura 53).

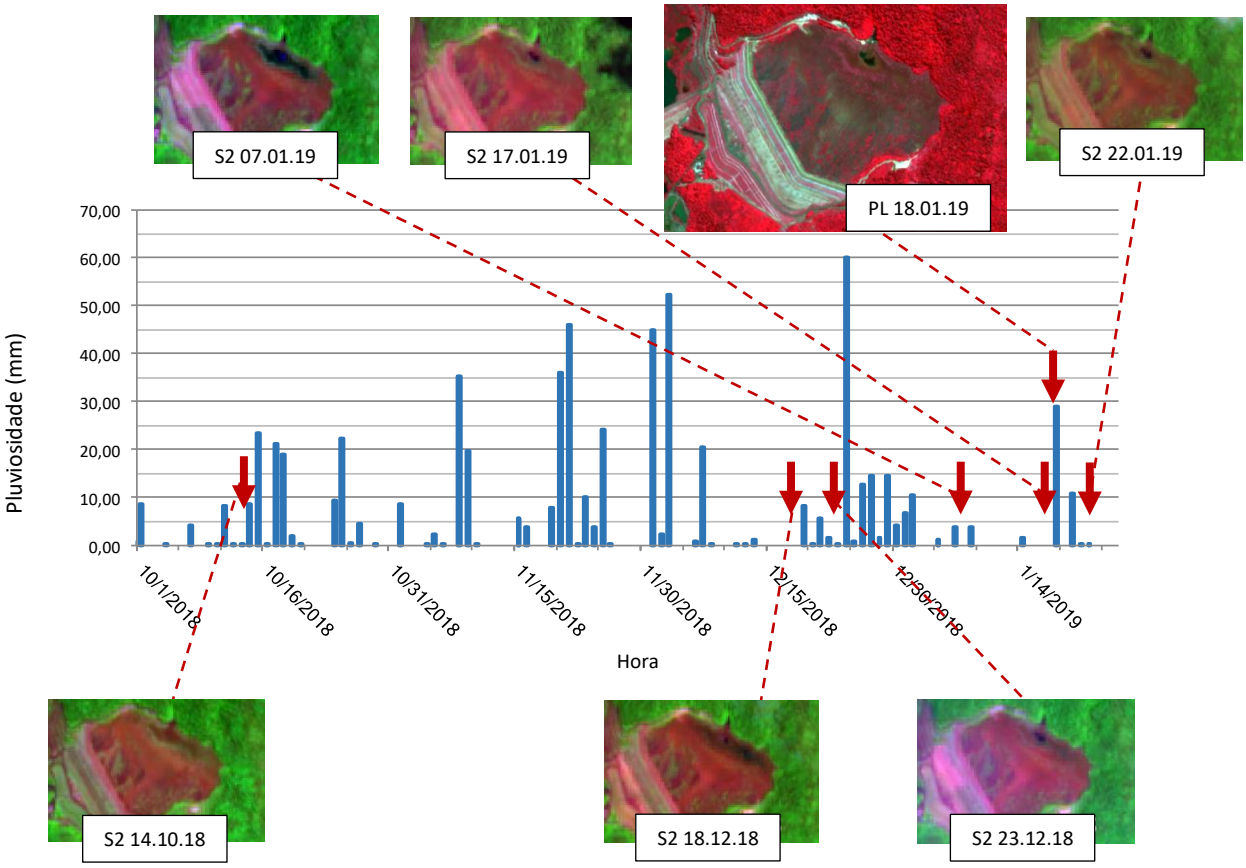


Figura 65: Dados pluviométricos diários (barras azuis) de 1 de outubro de 2018 a 25 de janeiro de 2019. A posição cronológica das imagens de satélite é mostrada pelas setas vermelhas

9. ANÁLISE DE VÍDEO

O principal objetivo deste trabalho foi modelar, analisar e interpretar os dados de imagens de vídeo das câmeras capacitadas na Barragem I durante o rompimento. A análise se baseou principalmente na câmera em frente à barragem (Figura 68).

Uma vez que a câmera não estava conectada a uma antena do sistema de posicionamento global ("GPS"), foi necessário verificar a diferença entre o horário da câmera e horário UTC. O horário da câmera foi verificado através do seguinte procedimento:

- Em 14 de agosto de 2019, um portal online que mostrava a transmissão da câmera ao vivo foi visualizado e comparado com as configurações da câmera, bem como com uma *webpage* mostrando o horário universal coordenado (UTC).
- Uma captura de tela retratando ambos os horários (Figura 66) foi feita.
- Este procedimento demostrou um retardo de um segundo (s) entre o horário UTC (ajustado para a diferença de horário) e a marcação de horário no vídeo. Isso também mostrou uma diferença de 1 segundo entre o horário UTC e o horário refletido nas configurações da câmera (Figura 67).

O procedimento descrito acima não confirma definitivamente que o horário da câmera no dia do rompimento estava com a mesma configuração de tempo como foi verificado em 14 de agosto de 2019.

As especificações técnicas do vídeo são as que se seguem:

- Duração: 15.30 s
- Bits por pixel: 24, Velocidade: 30 fps
- Altura: 1080 pixels, Largura: 1920 pixels
- Formato do vídeo: RGB24, mp4

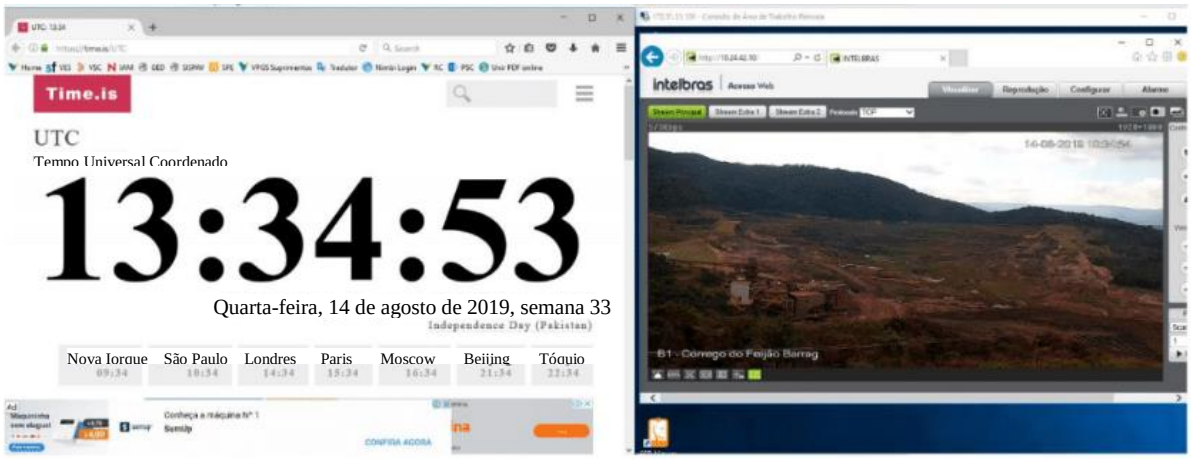


Figura 66: Captura de tela verificando o horário da câmera, com relação ao horário UTC

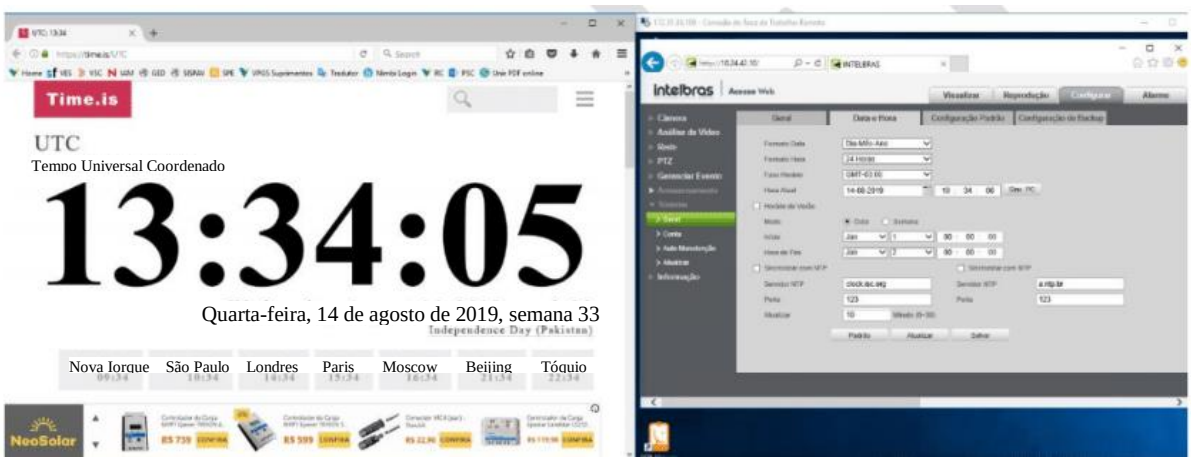


Figura 67: Captura de tela verificando a diferença entre o horário UTC e o horário refletido nas configurações da câmera

Figura 68: Exemplo de um único quadro extraído da câmera em frente à Barragem I antes do rompimento

Para calibrar as imagens de vídeo, um modelo digital da topografia da barragem e dos rejeitos foi usado (design de concepção assistida por computador ("CAD") das varreduras de dados de LiDAR). A análise foi feita de aproximadamente 12h28m23,90 a 12h28m27,70 em 25 de janeiro de 2019, cobrindo ~4 s da iniciação visível do rompimento. Nenhuma imagem pré ou pós-rompimento foi incluída na análise, para evitar efeitos de descorrelação. Quadros únicos foram extraídos do vídeo a uma frequência de 30 fps (1/30 de um segundo entre os quadros).

9.1 Métodos

A filmagem em vídeo foi analisada primeiro aplicando-se um esquema computadorizado de elementos finitos, capaz de modelar o meio contínuo de tensão-deformação específica dentro da frente da barragem, durante a iniciação do rompimento e seus estágios iniciais. Isto foi feito para revelar possíveis mecanismos de início e rompimento.

A modelagem com correlação de imagem digital ("DIC") é a melhor ferramenta para analisar padrões de deformação específica de sequências de imagens, com medição indireta da deformação na direção horizontal ("*U*") e na direção vertical ("*V*") (Figura 69). Os componentes da deformação específica *U* e *V* foram analisados separadamente durante as simulações de modelagem.

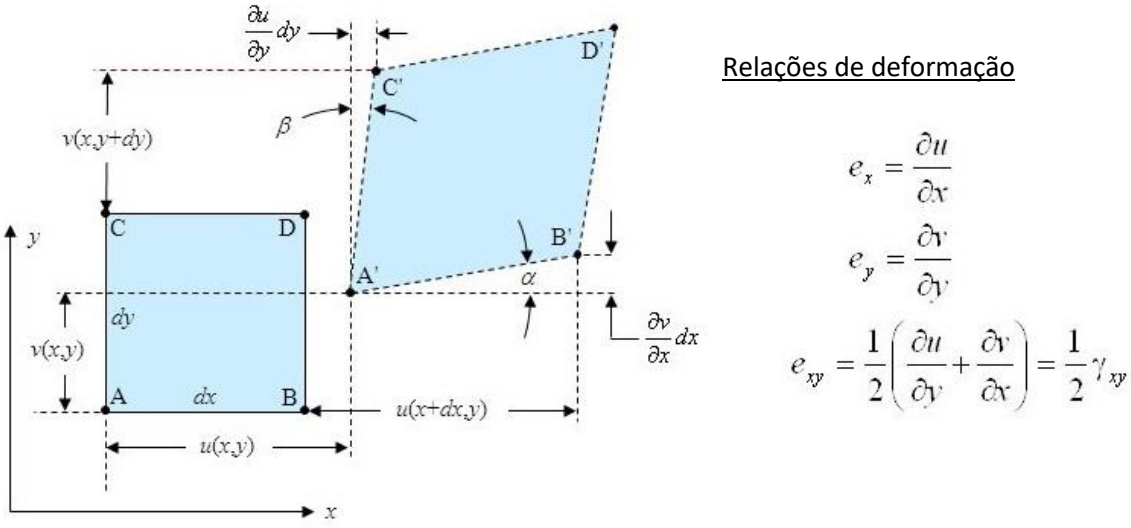


Figura 69: Esboço dos componentes da deformação específica relativa horizontal e vertical e sua formulação matemática, de acordo com uma origem de referência arbitrária

O procedimento aplicado para a análise de DIC foi:

- após a análise preliminar da filmagem em vídeo, quadros únicos foram extraídos e salvos como imagens de mancha para a análise de DIC;
- uma imagem de referência foi definida com pontos fixos;
- a imagem de referência foi calibrada em medidas métricas, usando o conjunto de dados de topografia de LiDAR disponível;
- uma malha de elementos discretos ("DEM") foi definida através de um procedimento iterativo, para de otimizar o tamanho do elemento de malha e reduzir o ruído;
- parâmetros de modelagem foram ajustados durante a calibração;
- o modelo foi executado com modelagem dinâmica de componentes de deformação específica durante a rompimento;

- o resultado foi um mapa mostrando a deformação quadro a quadro (não acumulada) ao longo das duas direções perpendiculares para a linha de visão da câmera;
- um conjunto de pontos de rastreamento foi definido dentro da área frontal da barragem, com o posicionamento direcionado pela análise de deformação DIC;
- a análise de modelagem de deformação específica foi executada com rastreamento de pontos para todos os pontos; e
- foram gerados arquivos de dados e plotagens com rastreamento de pontos.

As especificações do modelo são uma grade com malha de elementos finitos ("FEM") com pontos de referência calibrados (com base nos dados de DEM) (Figura 70); um subconjunto com ponderação de Gauss e uma interpolação 8-tap otimizada com diferenças quadradas normalizadas em zero; um limite de consistência de 0,20; um intervalo de confiança de 0,200; um limite da capacidade de correspondência (*matchability threshold*) de 0,60; um tamanho de filtro de 11; tensores Lagrange; e aplicação de pontos de rastreamento e modelagem de extensômetro vertical (ver abaixo).

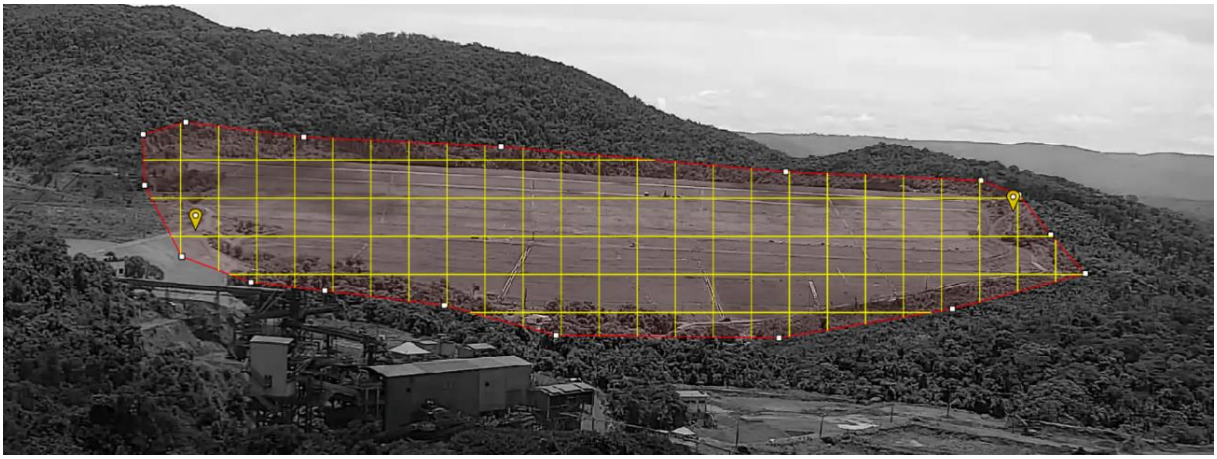


Figura 70: Ambiente de modelagem com grade FEM, pontos de referência e contornos de modelagem

Uma segunda abordagem também foi utilizada, envolvendo uma análise de diferença progressiva, que se baseia em uma implementação simples, mas poderosa, de diferenciação de imagem dentro do ambiente computadorizado Matlab. A análise de diferenças tem a vantagem de revelar mudanças visíveis de padrões de refletância de imagem, destacando diferenças que de outra forma seriam difíceis de ver.

O procedimento aplicado para a análise de diferença progressiva foi:

- após a análise preliminar da filmagem em vídeo, quadros únicos foram extraídos e salvos como imagens de RGB únicas para a análise;
- uma imagem de referência foi definida como a primeira imagem com refletância de referência;

- cada imagem foi comparada à imagem de referência em um ambiente de análise de imagem da Matlab, pela aplicação a diferenciação de imagem "imshowpair," com filtragem de ruído; e
- uma matriz de mudança de azul (sem diferença) para branco (diferença máxima) foi criada para cada par de quadros.

9.2 Resultados da análise de vídeo

Os principais resultados dos dois diferentes métodos de análise de vídeo 2D de superfície são apresentados em paralelo para melhor destacar suas diferenças. O esquema de apresentação segue a lógica descrita na Figura 71. Os horários discutidos abaixo se correlacionam com o horário da câmera de vídeo (ou seja, eles não são ajustados ao horário UTC ou para refletir a diferença de 1 segundo com o horário UTC). A imagem do topo da Figura 71 representa um simples quadro RGB de alta resolução, conforme extraído das imagens de vídeo no momento dado, para ser usado como uma referência visual. A imagem central apresenta os resultados da modelagem em termos de deformação específica vertical relativa *V* (expressa em *m*) sobreposta em um quadro com escala de cinza. A imagem inferior da Figura 71 representa os resultados da diferenciação da imagem com referência ao horário da análise inicial (o tempo zero é definido em 25 de janeiro de 2019, às 12h28m23,83). A modelagem é baseada em 120 quadros adquiridos entre 12h28m23,83 e 12h28m26,70 da filmagem da câmera frontal de 30 fps.

A primeira indicação de deformação foi no quadro 003 (Figura 72). Naquele estágio, o componente *V* da deformação específica é negativo, denotando um abaixamento desta porção da crista da barragem em cerca de 0,1 m na direção vertical. Nenhuma outra deformação é mensurável no restante da frente da barragem.

Após 0,2 s, no quadro 009, parece iniciar um abaulamento na parte central direita da frente da barragem (com referência ao ponto de vista de observação). Conforme é visível na Figura 73, neste caso o componente *V* da deformação específica é positivo, com um valor de ~0,15 m. Isto indica uma deformação vertical, possivelmente devido ao efeito da geometria da linha de visão no vetor de deformação real.

A imagem de diferenciação, em uma escala de cor azul a branco na parte inferior da Figura 73, não mostra claramente a forma do abaulamento. Ela destaca deformações na mesma área que estão majoritariamente relacionadas à mudança na refletividade das canaletas de drenagem e outras características lineares ao longo do talude.

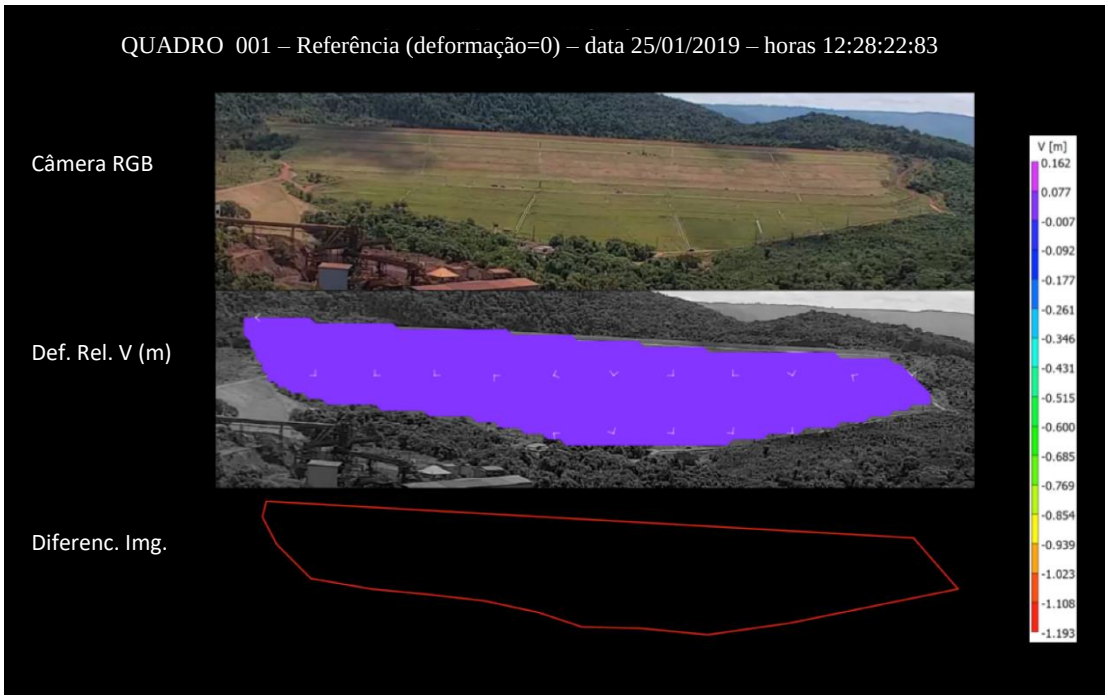


Figura 71: Análise de deformação e detecção de mudanças quadro a quadro da Barragem I

Figura 72: Quadro 003. A deformação específica inicial se desenvolve na parte central superior da Barragem I

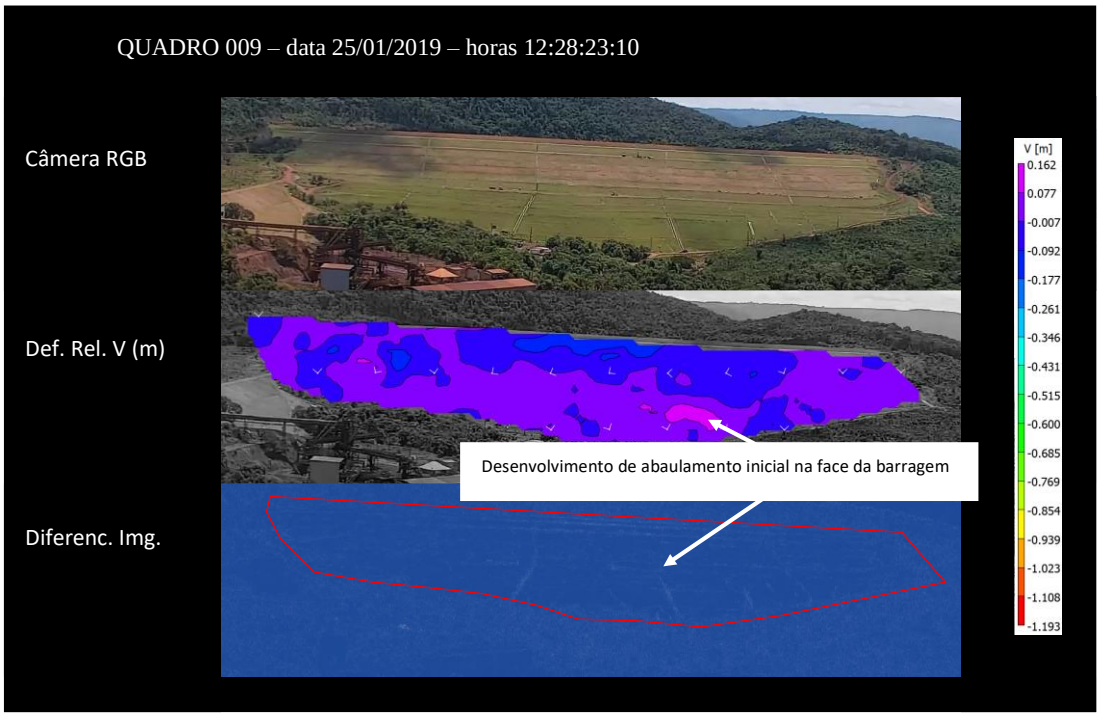


Figura 73: Após 0,2 s do início da deformação na crista da barragem, um abaulamento começa a se desenvolver na parte central direita da face da Barragem

Após 1 segundo completo, no quadro 045, a Figura 74 mostra a deformação na crista da barragem acelerando rapidamente de uma área limitada altamente deformada no centro. O padrão de deformação está se desenvolvendo principalmente horizontalmente, envolvendo progressivamente mais da crista da barragem. O componente *V* da deformação específica é de cerca de -1 m no centro até zero, a uma distância de ~120 m em ambos os lados da Barragem I. A largura da área deformada é de ~30 m.

Ao mesmo tempo, o abaulamento na parte central direita da face da barragem também está se desenvolvendo e se expandindo, principalmente na horizontal. O componente *V* da deformação específica relativa ainda é positivo, e a deformação parece estar limitada a 0,15 m. No entanto, conforme já foi observado, o componente *V* é a soma vetorial de três componentes ao longo da linha de visão da câmera. Assim sendo, a cor/valor representada é apenas a combinação de diferentes efeitos que se desenvolvem na face da barragem. Possivelmente, o componente positivo vertical ainda está dominando, mas é compensado, nesta fase, pelo desenvolvimento inicial de um componente do rompimento vertical que ainda não é predominante.

O estágio final desta fase de deformação é visível na Figura 75, na qual a deformação da crista se desenvolveu para envolver quase 80% da largura da crista da barragem, com uma deformação máxima de metros e o abaulamento que agora ocupa a maioria da porção inferior da face da barragem.

O sinal positivo do componente *V* no abaulamento muda para negativo repentinamente no quadro 081 (12h28m26,40) (Figura 76). Esta é uma indicação clara de que o componente *V* resultante é

principalmente descendente, conduzido pela gravidade. A deformação ao longo desta direção é superior a 1 m.

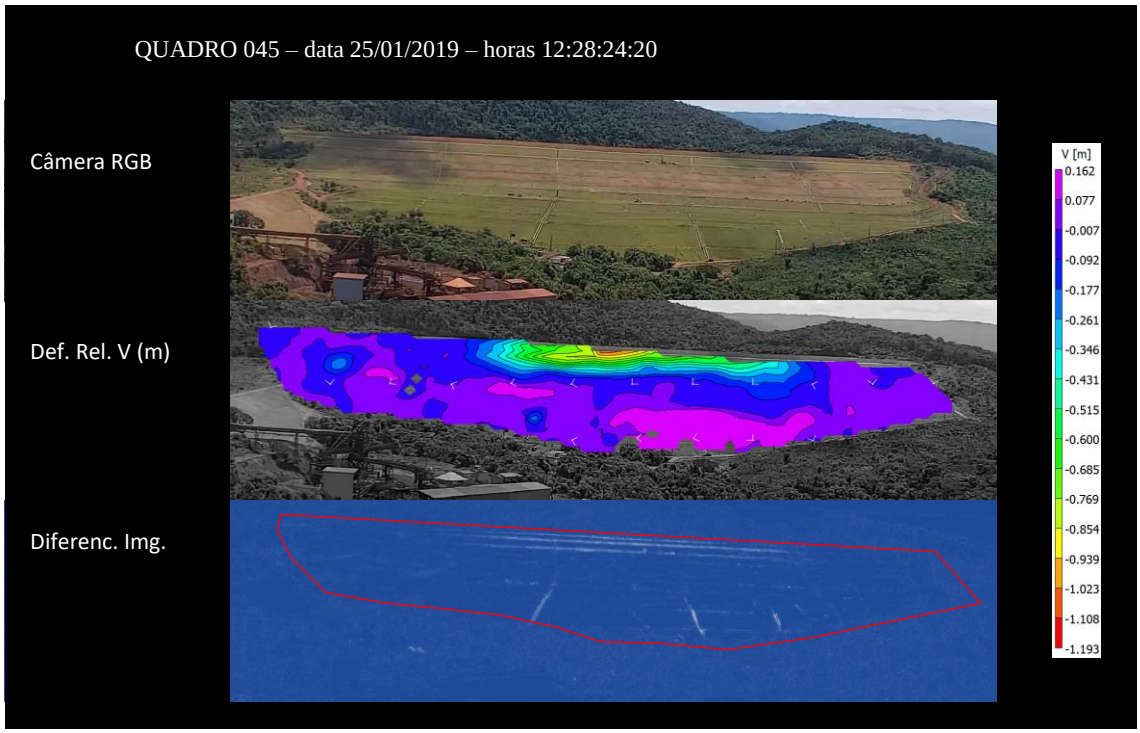


Figura 74: Após 45 quadros, a deformação na crista da barragem está se acelerando rapidamente, enquanto o abaulamento da face da barragem está maior e ainda é positivo

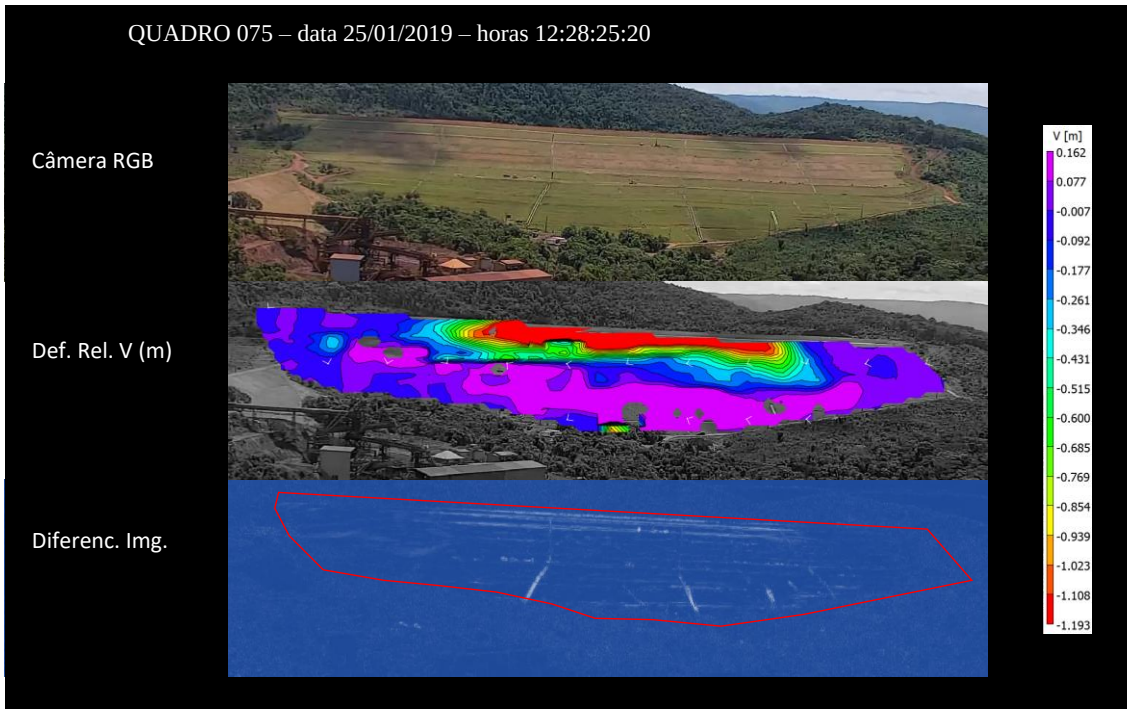


Figura 75: Estágio final da fase de deformação 1, na qual o abaulamento ainda é positivo e a crista da barragem está desmoronando amplamente

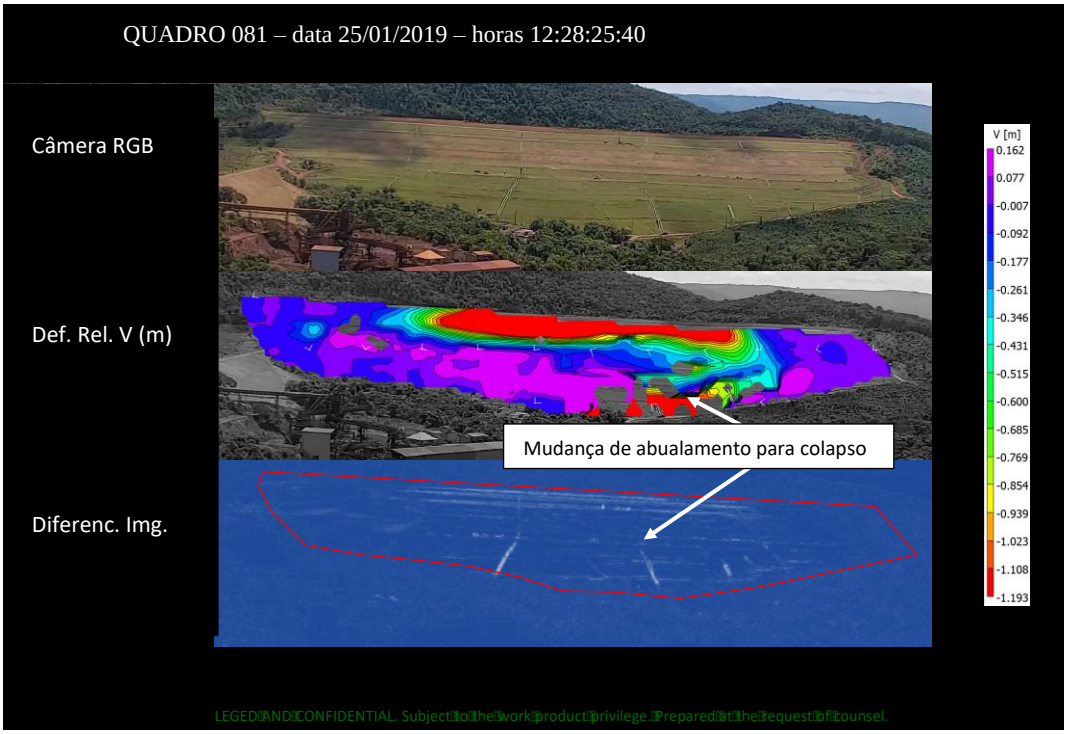


Figura 76: Mudança de predominantemente abaulamento para predominantemente colapso vertical na parte central direita da face da barragem

Após outro 1,30 s, às 12h28m26,70, o rompimento que se iniciou na crista da barragem se juntou ao colapso na face central da barragem (Figura 77), seguida pelo rompimento geral, a qual ocorreu alguns segundos mais tarde, às 12h28m30.

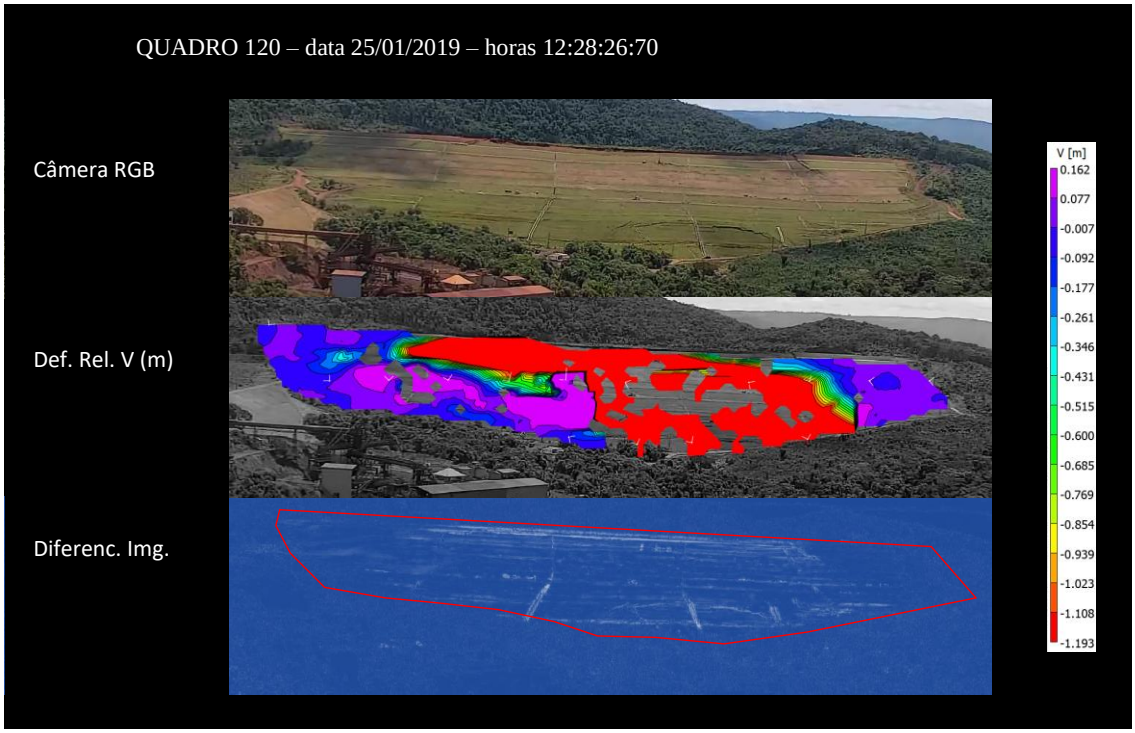


Figura 77: No quadro 120, as duas zonas do rompimento se juntam e inicia o rompimento geral da barragem

De acordo com os resultados da análise de imagens DIC e de diferença progressiva, há duas zonas do rompimento principais. A primeira, localizada na parte central da crista da barragem, precede a segunda, na parte central direita da face da barragem, em alguns décimos de segundo. As ferramentas de rastreamento de pontos na análise DIC foram selecionadas para destacar os vetores de deformação nestas duas áreas.

Figura 78 mostra o resumo da série temporal de deformação do componente *V* para os pontos selecionados no período de 4 segundos. Os pontos rastreados P11, P13 (na crista) e P17, P8 (na face central da barragem) mostram as maiores taxas e magnitudes de deformação. Figura 79 sugere que o componente *V* de deformação começou ao mesmo tempo nas duas porções diferentes da barragem para os dois pontos de levantamento selecionados. Isto não se reflete no campo de deformação contínua, no entanto, e pode significar que apenas a deformação local estava ativa naquele estágio na face central da barragem.

Figura 80 e Figura 81 mostram que o componente *U* de deformação da face central da barragem direita não é visível, sugerindo predominantemente deformações para cima e para fora (em direção à câmera).

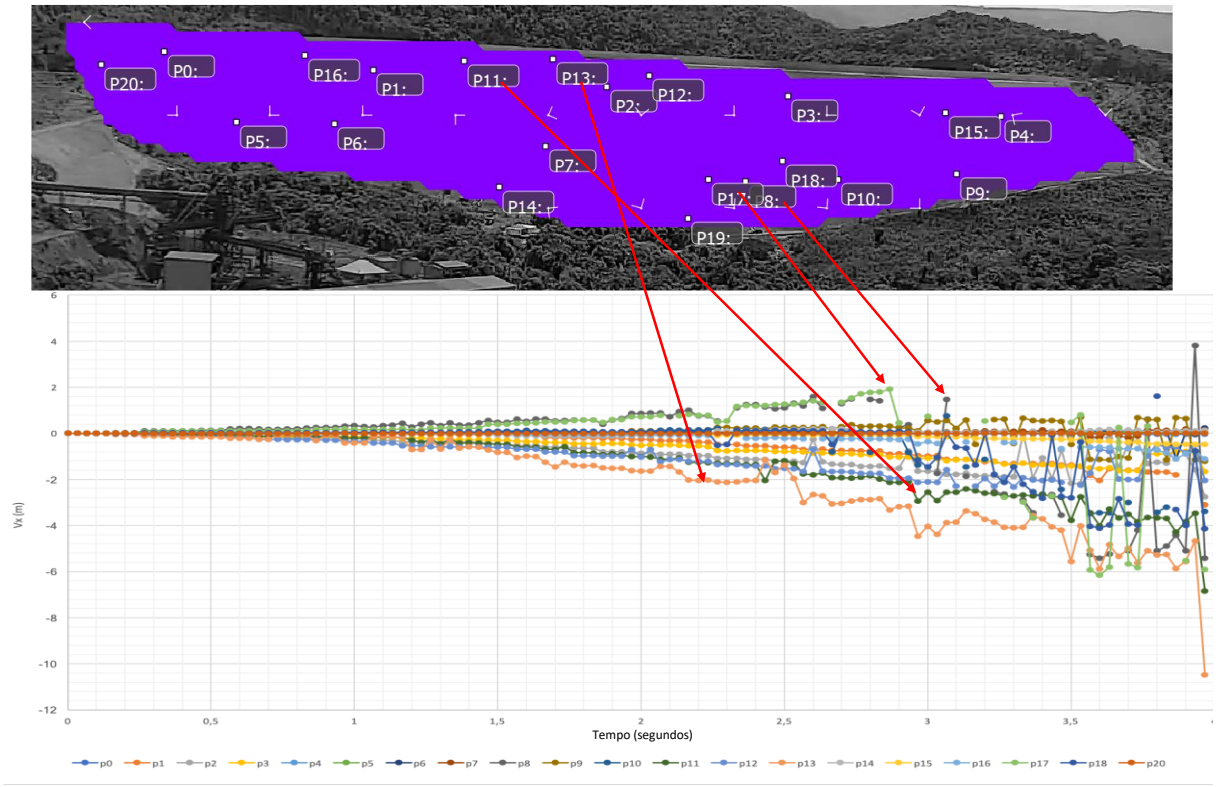


Figura 78: Resumo da análise de rastreamento de pontos do quadro 0 (tempo = 0 S) até o quadro 120 (tempo = 4 S) do componente *V* modelado

O início do rompimento é observado primeiro na crista da barragem e depois no lado inferior direito da barragem, com alguns décimos de segundo entre eles. Depois disso, deformação também se desenvolve na parte central da face da barragem.

A deformação na crista da barragem mostra um aumento constante do componente *V* negativo da deformação específica (compatível com um rompimento gravitacional; ou seja, colapso dentro do corpo da barragem). A deformação na parte central da face da barragem começa com um componente *V* positivo (provavelmente indicando abaulamento), seguido de inversão para valores negativos (rompimento gravitacional) cerca de 2 segundos após o início do rompimento.

As considerações acima podem ser influenciadas pela sensibilidade do método para as direções perpendiculares à linha de visão da câmera. Isso, no entanto, não é provável de mudar o significado geral das conclusões, uma vez que o viés da linha de visão tende a subestimar as medições, de modo que as deformações diferenciais reais possam ser ainda mais acentuadas do que aquelas destacadas na análise.

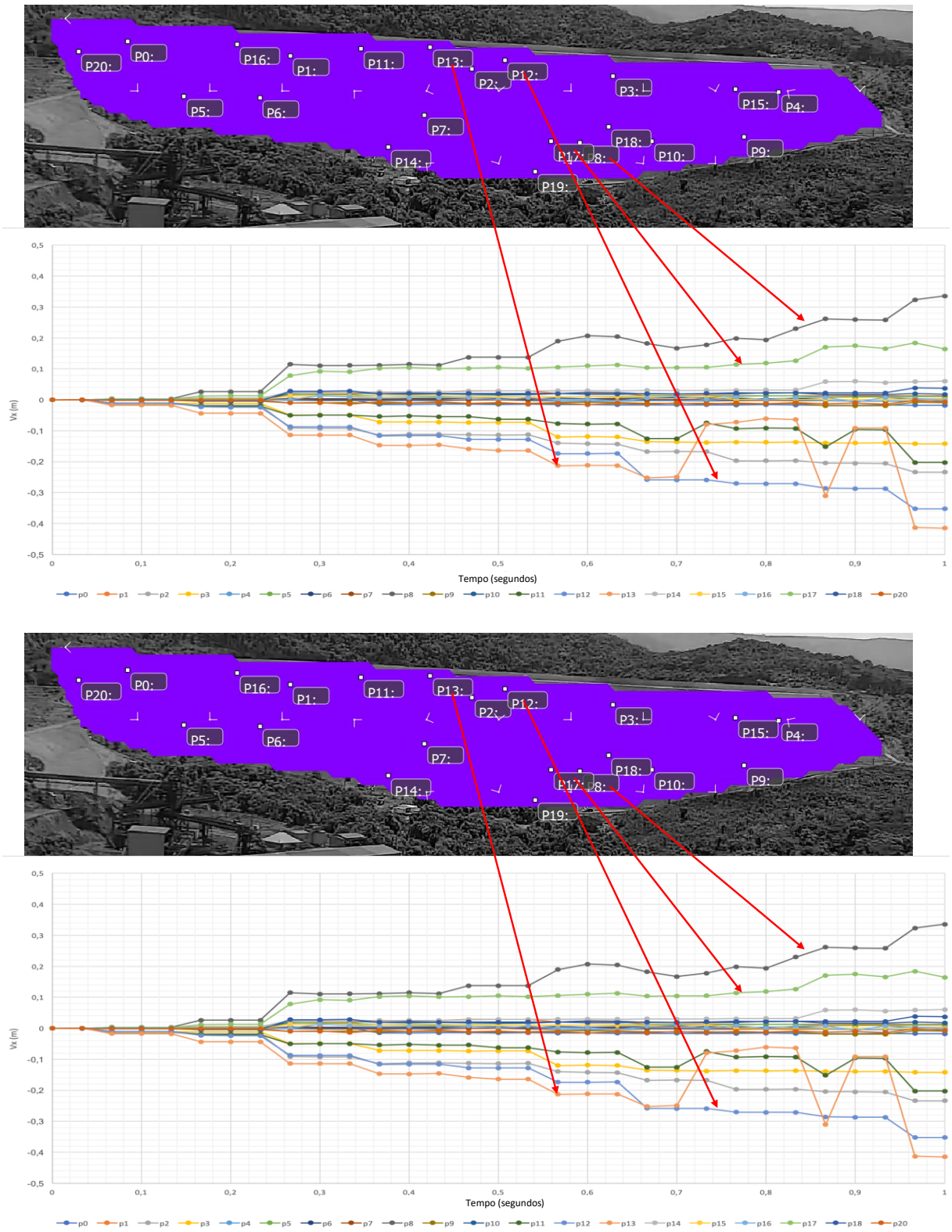


Figura 79: Análise detalhada de rastreamento de pontos do quadro 0 (hora = 0 S) ao quadro 30 (hora = 1 S) do componente *V* modelado

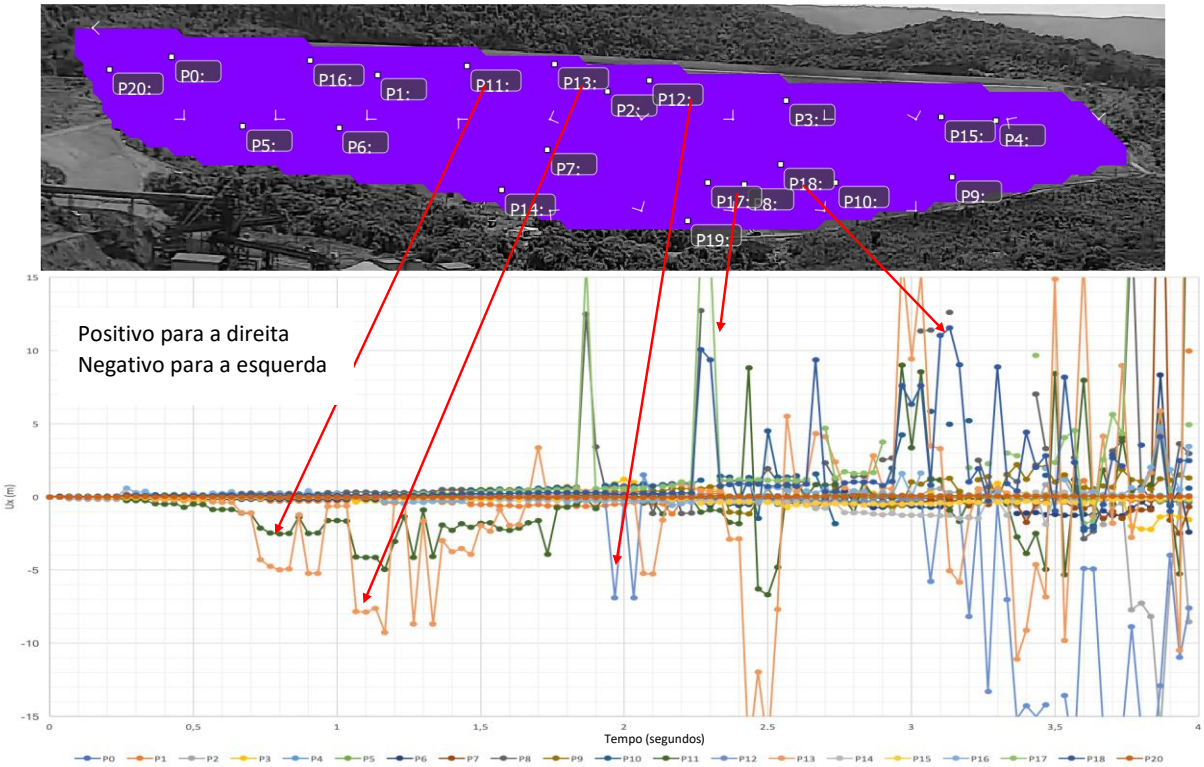


Figura 80: Resumo da análise de rastreamento de pontos do quadro 0 (hora = 0 S) ao quadro 120 (hora = 4 S) do componente *U* modelado

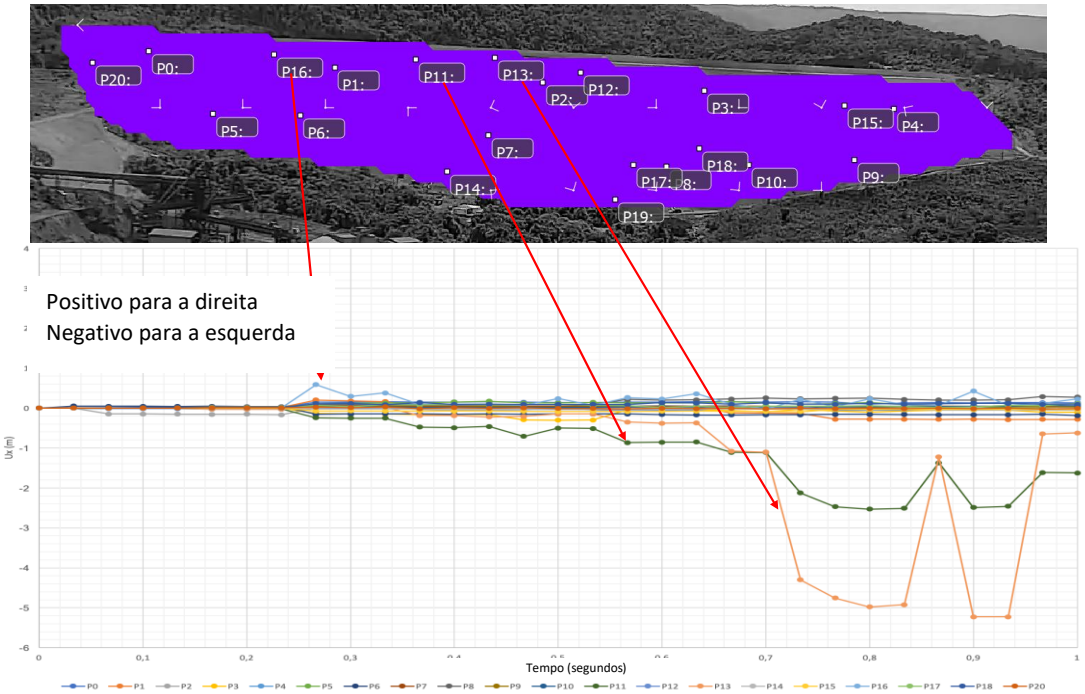


Figura 81: Análise detalhada de rastreamento de pontos do quadro 0 (hora = 0 S) ao quadro 30 (hora = 1 S) do componente *U* modelado

Algumas considerações metodológicas devem ser notadas. Primeiro, a análise de DIC destaca como o rompimento se desenvolveu nos estágios iniciais, conforme se vê na geometria da câmera. Segundo, o rastreamento de pontos, apesar de ser cumulativo e pontual, pode fornecer maior precisão para os estágios iniciais do rompimento em alguns locais específicos. As imagens de diferenciação podem fornecer uma fácil visualização das mudanças reais na filmagem da câmera, mas elas são provavelmente mais precisa próximas de estruturas lineares (como a linha da crista da barragem e o sistema de drenagem superficial) devido a alterações na refletância do cruzamento dos pixels.

10. ANÁLISE DO VÍDEO DO DRONE

O principal objetivo da análise da filmagem do drone foi a identificação de qualquer evidência de superfície de deformações contínuas ou anteriores na superfície da barragem no momento da coleta de filmagem (janeiro de 2019), visível pelo drone. Além disso, a análise teve como objetivo identificar qualquer sinal superficial potencialmente relevante com relação à estabilidade da barragem (áreas úmidas, anomalias na cobertura vegetal, presença ou ausência de água nas canaletas de drenagem, etc.).

Dois vídeos foram filmados em 18 de janeiro de 2019. Durante a operação do vídeo, o drone voou paralelamente aos alteamentos da barragem, da crista para a parte inferior da barragem. O primeiro vídeo (DJI_0142.mov) cobre a parte superior da barragem e dura 15 min, enquanto o segundo vídeo (DJI_0143.mov) cobre a parte inferior da barragem e dura 7 minutos e 35 segundos. A visibilidade era muito boa devido ao tempo ensolarado.

Através da análise visual dos dois vídeos, foi possível fazer as seguintes observações:

- Cobertura vegetal: a grama foi cortada recentemente na barragem, sem áreas de vegetação anômala. No geral, a parte superior da barragem tinha condições mais secas do que a parte inferior (ou seja, grama mais verde na parte inferior da barragem) (Figura 82). Nenhuma água estava visível no setor dos rejeitos visível no vídeo.

- Áreas úmidas: Nenhuma área úmida estava visível na filmagem do drone no momento do voo.

- Canaletas de drenagem: Havia canaletas de drenagem limpas e secas na parte superior e central da barragem (Figura 83), mas as canaletas na parte inferior da barragem tinham água corrente que tinha cor marrom (provavelmente lama úmida) (Figura 84).

- Morfologia: Ao voar ao longo da crista e dos diferentes alteamentos, não foram identificadas morfologias nem convexas nem côncavas potencialmente associadas a deformações passadas ou em progresso (Figura 85). Alguns setores localizados da parte central da barragem com morfologia acidentada, irregular e abaulada podem estar associados a deformações superficiais passadas ou a vacas andando na barragem (03:30 do segundo vídeo) (Figura 86).

- Evidências de instabilidade: Não havia sinal de rachaduras, valas ou qualquer evidência clara de instabilidade em andamento. No sétimo alteamento, uma característica linear, com alguns metros de comprimento, foi identificada (Figura 87). Esta característica parece ser um

recalque local do aterro associado à construção da canaleta de drenagem de concreto adjacente.

A análise das filmagens do drone não mostra nenhuma deformação recente ou ativa na barragem, incluindo a suposta deformação de 18 de janeiro de 2019 reportada pelo radar de solo.

Figura 82: Filmagem do drone aos 06:50 do vídeo DJI_0143.mov, mostrando vegetação mais verde na parte inferior da barragem, se comparada com as porções central e superior

Figura 83: Filmagem do drone aos 06:20 do vídeo DJI_0142.mov

Figura 84: Filmagem do drone aos 05:32 do vídeo DJI_0143.mov, mostrando a canaleta de drenagem com lama marrom e água corrente

Figura 85: Filmagem do drone aos 02:10 do vídeo DJI_0142.mov

Figura 86: Filmagem do drone aos 01:48 do vídeo DJI_0143.mov, mostrando uma morfologia irregular na parte central da barragem

Figura 87: Filmagem do drone aos 09:30 do vídeo DJI_0142.mov, mostrando uma característica linear paralela à parte inferior do sétimo alteamento

11. CONCLUSÕES

A análise dos dados do LiDAR facilitou o cálculo do volume de rejeitos armazenados da crista da barragem (8.413.000 m^3), o volume do material envolvido no rompimento (9.651.000 m^3) e o TWI. O TWI mostrou que o fluxo acumulado antes da construção da Barragem I estava concentrado no pé da barragem, na parte sul, onde a face da barragem está voltada a SO.

A análise das leituras dos prismas instalados na crista da Barragem I não revelou nenhuma deformação. Isto pode ser atribuído à baixa precisão das medições manuais (alguns centímetros da barra de erro) e à baixa frequência de aquisição (mensal).

Os dados do radar não mostraram nenhuma deformação nas últimas horas ou dias anteriores ao rompimentoa acima do nível do ruído do radar, de acordo com a configuração específica do radar (o fabricante citou a velocidade detectável mínima de 0,3 mm/h). O sinal detectado pelo radar nos meses anteriores ao rompimento é interpretado como o acúmulo de ruído introduzido pela presença de vegetação (e umidade armazenada) na face da Barragem I e por artefatos atmosféricos residuais, para os quais o comprimento de onda do radar era sensível.

Pequenas deformações rápidas foram gravadas pelo radar em 11 de junho de 2018 na parte central da Barragem I, 35 m e 55 m acima do DHP 15 após sua instalação. Mais perto do DHP 15, foram gravadas deformações positivas iniciais (para fora) de até 6,4 mm com uma deformação média de 2,4 mm, seguidas de deformações negativas (para dentro) de até 14,1 mm, com média de 3,9 mm. Mais distante do DHP 15, apenas deformações positivas foram gravadas, até um valormáximo de 8,3 mm, com média de 3,6 mm.

Os dados do radar de “movimento lento” processados após o evento para identificar a presença de deformações lentas nos meses anteriores ao evento também não identificaram nenhuma deformação acima da velocidade mínima detectável do radar com o pós-processamento (3 mm/mês). As deformações detectadas pelo satélite InSAR na parte inferior da Barragem I muito provavelmente não foram detectadas pelo radar, porque estas estão levemente abaixo da velocidade mínima detectável pelo radar.

A análise dos diferentes conjuntos de dados do satélite InSAR identificou deformações na barragem e rejeitos nos meses anteriores ao rompimento. Em particular, deformações na faixa de 16 a 32 mm/y, com um componente L-O significativo, foram detectadas no pé da Barragem I a partir de março/abril de 2018. Várias fases de acelerações foram detectadas de outubro a dezembro de 2018, com pequenas acelerações adicionais observadas de dezembro de 2018 a janeiro de 2019. Principalmente deformações verticais foram detectadas na crista da Barragem I, com uma evolução cronológica semelhante à de outros pontos da barragem, mas com acelerações visíveis apenas no final de 2018. Deformações verticais foram também detectadas nos rejeitos. As deformações detectadas na Barragem I estão altamente correlacionadas com as chuvas registradas pelo pluviômetro F18 e parecem ser compatíveis com recalque.

A análise das imagens multiespectrais de alta resolução (Sentinel-2) e resolução VHR (GeoEye, WorldView3 e Pléiades) permitiu seguir a dinâmica do lago de decantação nos rejeitos, incluindo sua presença e tamanho, e a variação da cobertura de vegetação na frente da barragem. Ademais, um

valor anormalmente alto de umidade do solo no recuo foi detectado na aquisição de satélite de dezembro de 2018 e início de janeiro de 2019.

A partir da análise dos quadros de vídeo frontais, o desencadeamento do rompimento foi primeiramente notado na crista da barragem e no lado inferior esquerdo da barragem, alguns décimos de segundo antes do desencadeamento do rompimento no corpo principal da barragem. Depois disso, a deformação também se desenvolveu na parte central SE da face da barragem. A deformação na crista da barragem mostrou um aumento constante do componente *V* negativo de deformação específica (recalque, compatível com um rompimento gravitacional). A deformação na face central da barragem SE começa com um componente *V* positivo (provavelmente indicando abaulamento), seguido pela inversão para valores negativos (rompimento gravitacional), cerca de 2 segundos após o início do rompimento. As considerações acima podem ser influenciadas pela sensibilidade do método aos diferentes componentes do vetor de deformação, considerando que o método é mais sensível a deformações nas direções perpendiculares à linha de visão da câmera.

A análise de filmagens dos vídeos do drone adquiridos em janeiro de 2018 não revelou nenhuma evidência superficial específica associável com deformações em curso ou passadas.