

A utilização da tecnologia InSAR na caracterização da deformação superficial do terreno no campo petrolífero de Canto do Amaro-RN

Adrian Mark Bohane¹
Wilson José de Oliveira²
Enrico Campos Pedroso³
Cristina Maria Bentz²
Francisco Victor de Oliveira Santos²
André Luiz Neves de Souza²
Alexandre Pereira Cabral⁴

¹TRE Canada Inc.
475 West Georgia Street, Vancouver-BC, V6B 4M9, Canada
adrian.bohane@trecanada.com

²Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS
Av. Henrique Valadares, 28, 3º andar, Torre A, CEP 20231-030, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{wilsonjo, cris, fcovictor, andreneves}@petrobras.com.br

³Faculdade de Geologia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro - FGEL/UERJ
Rua São Francisco Xavier 524, sala 2019A, CEP 20550-900, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
enrico.pedroso@uerj.br

⁴ Geomath Applied Remote Sensing Ltda.
Rua da Quitanda, 68, Conjs. 201 e 203, CEP 20091-005, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
alexandre@geomath.com.br

Abstract. The Canto do Amaro field is the largest actively producing onshore hydrocarbon reservoir in Brazil, and has been in operation since its discovery in 1985. The field is undergoing enhanced oil recovery activities to support production. A total of 30 *COSMO-SkyMed* SAR images acquired over a period of 15 months were processed for this analysis. TRE Canada Inc. (TRE) in partnership with PETROBRAS, Rio de Janeiro State University (FGEL-UERJ) and Geomath Applied Remote Sensing Ltd. have prepared the following article as a demonstration of the capabilities of InSAR technology for monitoring surface deformation over an actively producing oil field. The following points summarize the key features of this article: (i) Surface displacement over the Canto do Amaro field was comprehensively characterized by the high density of measurement points obtained from the *SqueeSARTM* analysis; (ii) Several distinct features of uplift were identified over areas that appear to be undergoing active operations with up to +87 mm of uplift observed; (iii) Mild subsidence was also observed within the area; (iv) The time series of the measurement points provided an indication of non-linear changes in movement trends over time, and can be used to isolate unique displacement patterns within the results. The time series could also be compared to other monitoring results, including DGPS measurements and; (v) Cross sections and average time series over several features of movement within the area of active operations provide additional insight into the results over multiple spatial scales.

Palavras-chave: interferometria, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geologia do petróleo, monitoramento, InSAR, deformação superficial do terreno.

1. Introdução

O campo de Canto do Amaro está localizado na porção emersa da Bacia Potiguar, situada no extremo leste da Margem Continental Brasileira, ocupando grande parte do Estado do Rio Grande do Norte e uma pequena porção do Estado do Ceará.

Trata-se do maior reservatório terrestre de hidrocarbonetos em produção ativa no Brasil e está em operação desde a sua descoberta, em 1985. Atualmente esse campo está passando por atividades de estimulação da recuperação de petróleo (EOR – *Enhanced Oil Recovery*) com o intuito de aumentar a produção de petróleo. Por esta razão, a Petrobras iniciou atividades no intuito de avaliar a utilização da tecnologia InSAR para identificar fenômenos de

movimentação da superfície do terreno sobre o reservatório, decorrentes entre outras, de atividades de injeção de fluidos e extração de hidrocarbonetos.

A área de estudo possui uma superfície de 442 km² e abrange a quase totalidade das operações de superfície do campo de Canto do Amaro, bem como áreas adjacentes com vegetação, incluindo campos agrícolas, parte do Rio Apodi e Lago Mossoró (Figura 1).

2. Aspectos Teóricos

Os radares de abertura sintética (SAR) são sistemas ativos que geram sua própria energia eletromagnética na faixa das microondas. Esta energia é transmitida do sensor para o terreno onde há processos de interação que resultam no seu retroespalhamento. A imagem resultante é uma matriz complexa que grava informações da amplitude e fase do sinal que retorna à antena. Enquanto que os dados de amplitude dependem da quantidade de energia retroespalhada por cada célula de resolução, a informação de fase está relacionada com o percurso óptico entre o centro de fase da antena de radar e o alvo no solo [1], [2], [4] e [6].

O imageamento interferométrico SAR (InSAR) é o processo pelo qual imagens de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em diferentes posições ou em tempos distintos. Um interferograma é uma representação 2D da diferença entre valores de fase. Variações de fase em um interferograma são identificadas por franjas, bandas coloridas que indicam onde e quanto movimento está ocorrendo em uma área. A precisão com que o movimento pode ser medido fica geralmente na faixa dos centímetros (cm) e pode atingir precisões milimétricas (mm), uma vez que a alteração de fase também é afetada por distorções topográficas, efeitos atmosféricos e outras fontes de ruído. A análise de interferogramas possibilita a medição do deslocamento de pontos específicos (x,y,z) no terreno. A interferometria SAR é a medida da mudança de fase do sinal ao longo do tempo. Quando a assinatura de um alvo específico em uma imagem de radar permanece inalterada ou idêntica, variações aparentes observadas na fase do sinal medido em múltiplas imagens podem representar fenômenos atuais de deformação na superfície do terreno e/ou efeitos atmosféricos que possam alterar o tempo de propagação das microondas, conforme ilustrado na Figura 2.

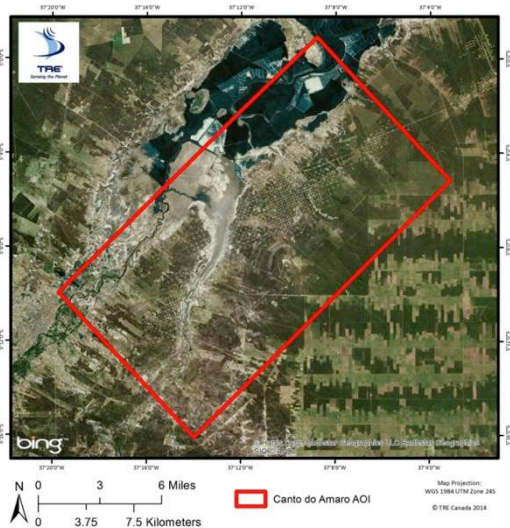


Figura 1: Localização da área de interesse no campo de Canto do Amaro-RN.

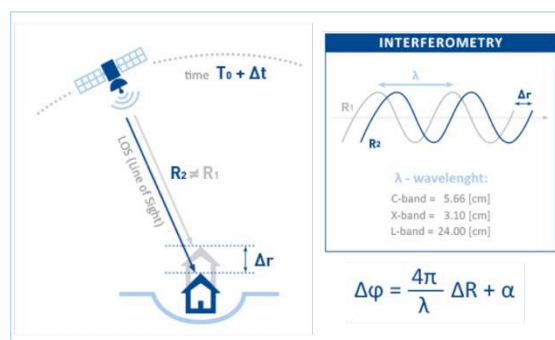


Figura 2: Relação entre a movimentação do terreno (ΔR) e a mudança correspondente na fase do sinal de radar ($\Delta \Phi$), onde (λ) equivale ao comprimento de onda do radar e (α) à diferença de fase resultante das condições atmosféricas.

Utilizou-se um algoritmo avançado originado a partir de técnicas de interferometria de dispersores permanentes (PSI – *Permanent Scatterer Interferometry*). Esta técnica se caracteriza por utilizar um conjunto mínimo de imagens SAR onde os efeitos atmosféricos e

orbitais podem ser removidos. O retroespalhamento em nível de sub-pixel é analisado e padrões de deformação lineares e não-lineares podem ser detectados. Como resultado, gera-se uma série temporal da movimentação de dispersores permanentes (PS) e dispersores distribuídos (DS) para cada imagem do conjunto. Os pontos PS correspondem tipicamente a edifícios, objetos metálicos, postes, antenas, afloramentos rochosos, etc. Enquanto os dispersores permanentes (PS) geralmente se referem a objetos antrópicos, os dispersores distribuídos (DS) são normalmente identificados como alvos naturais em terrenos homogêneos [1], [2], [4], [5] e [6].

3. Imagens SAR

Este estudo foi realizado a partir do acervo de imagens do satélite italiano *COSMO-SkyMed* existente para a região do campo petrolífero de Canto do Amaro. A constelação do sistema *COSMO-SkyMed* é composta por quatro satélites, sendo capaz de imagear cada ponto da superfície do globo terrestre pelo menos 1 vez ao dia e, dependendo da latitude do terreno, realizar até 4 coletas de informações no mesmo dia. Possui capacidade de realizar imageamentos em 5 modos diferentes, obtendo imagens em faixas que variam de 10 km a 200 km e com resolução espacial que pode variar de 1m até 100m, a depender dos ângulos de incidência, que variam de 20° a 59° . Possui também a possibilidade de obter visadas à direita e à esquerda da direção de deslocamento da plataforma [8].

Todas as imagens utilizadas nessa avaliação foram obtidas a partir de uma órbita descendente (satélite se deslocando de norte para sul, imageando à Oeste, ou seja à direita do sentido de deslocamento) no modo de feixe H4-03 (resolução espacial de 3-5 metros e faixa imageada de 40 x 40 km). A geometria da órbita do satélite *COSMO-SkyMed* em sua órbita descendente apresenta um ângulo δ (Delta) de 29.95° , formado entre a linha de visada do satélite (LOS - *Line-of-Sight*) e a vertical da superfície do terreno, e um ângulo Θ (Teta) de 11.94° , formado entre a direção da órbita (azimute) e o norte geográfico.

Os dados processados para este projeto de avaliação da viabilidade do uso da tecnologia InSAR incluíram 30 imagens do satélite *COSMO-SkyMed*, obtidas entre 19 de setembro de 2012 e 19 de dezembro de 2013. As imagens utilizadas foram selecionadas a partir de um conjunto de 208 imagens disponíveis sobre o local. Para esse estudo foram selecionadas imagens obtidas em intervalos de 16 dias (série temporal), uma vez que não são relatadas taxas de movimentação rápidas para a área de estudo.

4. Metodologia de Trabalho

A identificação de pontos PS (*Permanent Scatterer*) e DS (*Distributed Scatterer*) em uma série temporal de imagens de radar compreende uma sequência de passos. Primeiramente, faz-se a seleção das imagens brutas de mais alta qualidade dentro do conjunto de dados escolhido. Como o retorno do sinal de um único ponto de destino é formado por muitos pulsos de radar, este pixel aparecerá “desfocado” em uma imagem SAR original. A primeira etapa de processamento, portanto, é concentrar toda a energia recebida de um alvo em um pixel. As imagens são então precisamente alinhadas umas às outras, ou co-registradas, e analisadas segundo sua adequação para a interferometria. Os parâmetros analisados nesse caso são a linha de base normal e a distribuição temporal das imagens.

Após esse procedimento, segue-se uma série de análises estatísticas sobre as características da fase e da amplitude do sinal de radar retroespalhado que retorna para o satélite. Se um número concentrado de sinais é refletido de uma feição particular dentro de um pixel e é retroespalhado para o satélite, essa feição é chamada de “dispersor”. Quando o mesmo dispersor aparece em todas ou quase todas as imagens de um conjunto de dados de imagens SAR de um determinado local, então o dispersor é considerado “permanente”. Nessa fase, é possível identificar um subconjunto de pixels, chamados de Candidatos a Dispersores

Permanentes (PS), que são usados para estimar o impacto dos efeitos ionosféricos, troposféricos e atmosféricos, bem como possíveis erros de órbita, sobre a fase do sinal. Uma vez corrigida a fase do sinal para esses efeitos, quaisquer alterações restantes na fase do sinal correspondem diretamente ao movimento do terreno.

O algoritmo *SqueeSARTM* utilizado requer que uma imagem em cada conjunto de dados se torne uma referência geométrica e temporal, com a qual todas as outras imagens serão então relacionadas. Essa imagem é chamada de imagem mestre, e as restantes são imagens servas. A imagem mestre deve ser escolhida de acordo com os seguintes critérios: (i) deverá minimizar a propagação de valores normais da linha de base para as imagens servas; (ii) minimizar os valores temporais da linha base entre a imagem mestre e cada imagem serva e; (iii) minimizar os efeitos do ruído do sinal decorrentes de mudanças na cobertura vegetal e/ou pequenas alterações no ângulo de visada do satélite de uma cena para outra [1], [2], [3], [5] e [7].

Cada pixel de uma imagem SAR contém informações sobre a amplitude dos sinais que são retroespalhados em direção ao satélite, bem como a fase do sinal. A amplitude é uma medida da quantidade de energia do pulso do radar refletido, enquanto a fase está relacionada com o comprimento do caminho da onda eletromagnética, desde a plataforma até o terreno e de retorno à plataforma. Análises da amplitude e da fase da imagem SAR fornecem uma indicação da estabilidade de cada pixel, ao longo do tempo, de modo que é possível identificar quais pixels são mais propensos a se comportar como Dispersores Permanentes.

Uma vez concluídas as análises estatísticas das imagens SAR, um conjunto de interferogramas diferenciais é gerado. Isso implica subtrair a fase de cada imagem serva da fase da imagem mestre. Ao fazê-lo, é calculada a diferença do comprimento do caminho do sinal entre as duas imagens. Essa diferença está relacionada à possível movimentação da superfície do terreno. Em qualquer imagem SAR, existem distorções topográficas incorporadas que surgem durante a aquisição de imagens. Essas são removidas utilizando-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) de referência, deixando a movimentação do terreno e as distorções da fase do sinal decorrentes de efeitos atmosféricos como as únicas variáveis incorporadas. Os interferogramas diferenciais representam o ponto de partida para a aplicação da abordagem PSInSAR - *Permanent Scatterer Interferometry SAR*.

5. Resultados

O processamento das imagens SAR se baseou em uma técnica do tipo diferencial, ou seja, o deslocamento é medido em relação a um ponto de referência considerado estável. Pontos de referência são selecionados por meio de um procedimento de otimização que identifica um ponto com alta coerência, baixos valores de desvio padrão e baixa variabilidade ao longo do tempo. A localização do ponto de referência também foi restringida para garantir que ele estivesse localizado fora das áreas de operações da PETROBRAS. É importante salientar que todas as medições foram feitas em relação ao ponto de referência. Em consequência, quaisquer tendências de grandes movimentos de áreas (tais como a oscilação das marés) serão contabilizadas e efetivamente removidas dos resultados, já que o ponto de referência também é influenciado por essas tendências. Uma vez que a referência é considerada estável, os resultados são normalizados contra essas tendências de área ampla. As coordenadas do ponto de referência e sumário dos resultados obtidos estão listadas na Tabela 1.

A quantidade total de deslocamento medido durante o intervalo de tempo abrangido pelas imagens de radar é mostrada abaixo (Figura 3). Cada ponto corresponde a um Dispersor Permanente (PS) ou Dispersor Distribuído (DS) e segue um código de cores de acordo com a magnitude e a direção do movimento total. O movimento é medido ao longo da linha de visada (LOS) do satélite, em relação à primeira imagem do conjunto de dados. Os resultados mostram diversas regiões com presença de soerguimento, localizadas em áreas de operações

ativas durante o período de 15 meses. Valores de até +87 mm de deslocamento foram identificados a partir da feição de movimento mais pronunciado localizada sobre o campo (áreas com tons azuis na Figura 3).

Diversas áreas de subsidência também estão presentes em toda a área de estudo; no entanto, estas parecem estar localizadas principalmente além das fronteiras do campo de produção (áreas com tonalidades amareladas na Figura 3). A região de subsidência mais intensa foi identificada ao longo da fronteira ocidental da área de estudo, entre dois grupos de lagoas adjacentes ao Rio Apodi.

Tabela 1: Estatística dos resultados processados a partir das imagens *COSMO-SkyMed*.

Satélite	<i>COSMO-SkyMed</i>
Geometria de Aquisição	Descendente
Período da Análise	19/09/2012 a 19/12/2013
Número de imagens processadas	30
Geocodificação	PS alinhados no Mapa Base ESRI
Sistema de Projeção / Datum	WGS84, UTM 24S
Loc. do Ponto de Referência	9447930.52 N; 705443.61 E
Area de Estudo	442 km ² (171 milhas ²)
Número de PS + DS identificados	407.795
Número de PS	85.852
Número de DS	321.943
Média de PS + Densidade DS	922 PS e DS/km ² 2.385 PS e DS/milhas ²

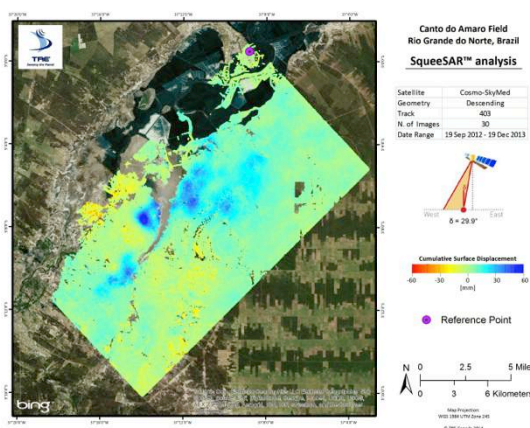


Figura 3: Deslocamento cumulativo dos pontos de medição PS e DS durante o intervalo da análise.

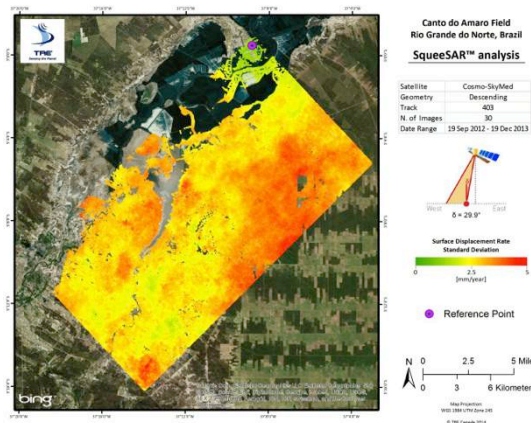


Figura 4: Desvio padrão da taxa de deslocamento.

O desvio padrão dos dados de deslocamento da superfície do terreno caracteriza o erro das medições (Figura 4) e irá variar em função da dinâmica de movimentação local do terreno e dos seguintes fatores: (i) densidade espacial de pontos PS e DS; (ii) características dos alvos da superfície; (iii) distância entre os pontos dispersores medidos e o ponto de referência; (iv) número de imagens processadas; (v) resolução temporal e (vi) condições climáticas no horário de aquisição dos dados SAR. A taxa de deslocamento para um determinado ponto deve ser lida na forma de Taxa de Deslocamento \pm Desvio Padrão.

O desvio padrão médio das taxas de deslocamento da superfície identificadas no campo de Canto do Amaro é de 3,0 mm/ano. Esse valor está dentro dos limites normais, levando em consideração o número de imagens analisadas, o intervalo de tempo das imagens e o tamanho relativamente grande da área processada. A precisão continua do dado aumenta à medida que o período de tempo abrangido pelas imagens aumenta.

As tendências de deslocamento sobre o campo de Canto do Amaro mostram inúmeras assinaturas distintas de movimento sobre diversas feições dentro da área de estudo. A fim de ilustrar a variabilidade do deslocamento de superfície ocorrendo ao longo das áreas de produção, séries temporais médias foram criadas para fornecer uma visão generalizada dos padrões do movimento de soerguimento (Figura 5) e das tendências de subsidência (Figura 6) dentro dos resultados.

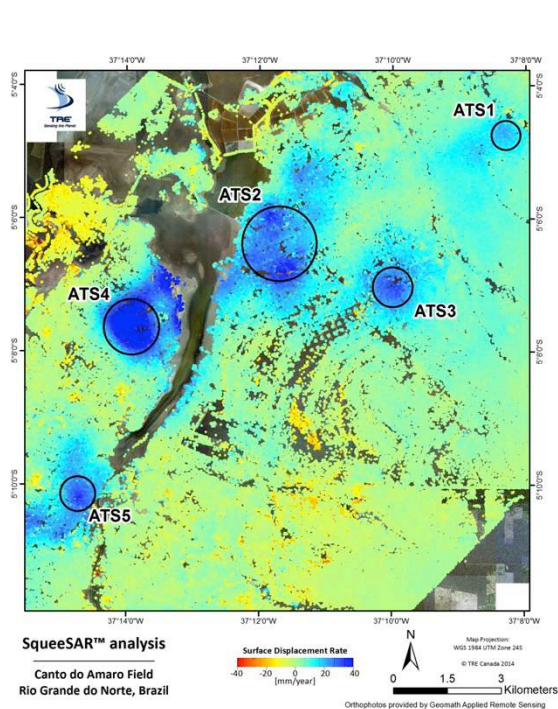


Figura 5: Resultados do deslocamento superficial, destacando cinco áreas com soerguimento pronunciado.

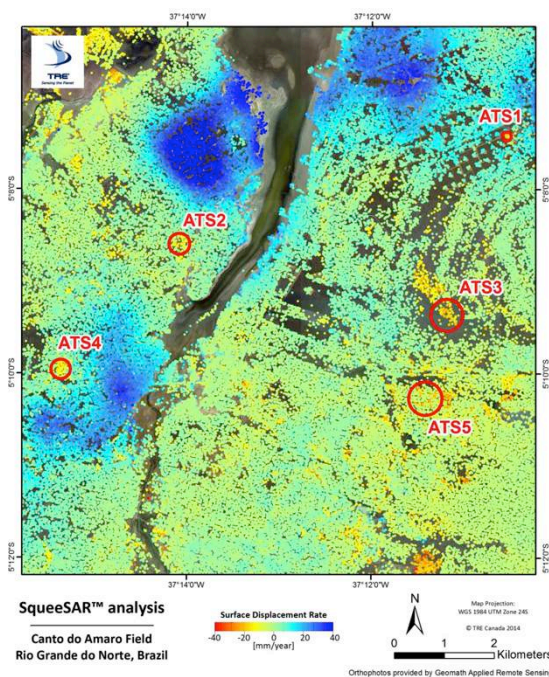


Figura 6: Resultados do deslocamento superficial, destacando cinco áreas com subsidência pronunciada.

Séries temporais médias são criadas calculando-se o deslocamento medido por todos os pontos dentro de uma região definida. Os centros de deformação identificados na área de estudo estão indicados nas Figuras 5 e 6. As coordenadas e quantidades médias de deformações relativas medidas dentro de cada área encontram-se resumidas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Localização das cinco áreas com soerguimento pronunciado identificadas na Figura 7.

Localização	Coordenadas XY	Deformação Relativa (mm)
ATS1	9438273.90 N; 706359.78 E	23,64
ATS2	9435216.99 N; 699959.38 E	34,43
ATS3	9434038.81 N; 703223.27 E	31,54
ATS4	9432972.07 N; 695899.42 E	45,95
ATS5	9428434.47 N; 694482.42 E	35,36

Tabela 3: Localização das cinco áreas com subsidência pronunciada identificadas na Figura 8.

Localização	Coordenadas XY	Deformação Relativa (mm)
ATS1	9433393.05 N; 702220.98 E	0,15
ATS2	9431232.26 N; 695661.82 E	-13,69
ATS3	9429828.29 N; 701003.47 E	-13,58
ATS4	9428720.47 N; 693292.62 E	-9,43
ATS5	9428128.17 N; 700597.64 E	-10,04

As taxas de movimento mais pronunciadas sobre as áreas de operações ativas foram identificadas ao longo da fronteira ocidental do campo, na porção central da área de estudo (Figura 7). Os resultados a Oeste e a Leste do Rio Apodi indicam valores de aceleração semelhantes e taxas de deslocamento de superfície diferentes (Leste), ou valores de deslocamento similares e valores de aceleração diferentes (Oeste).

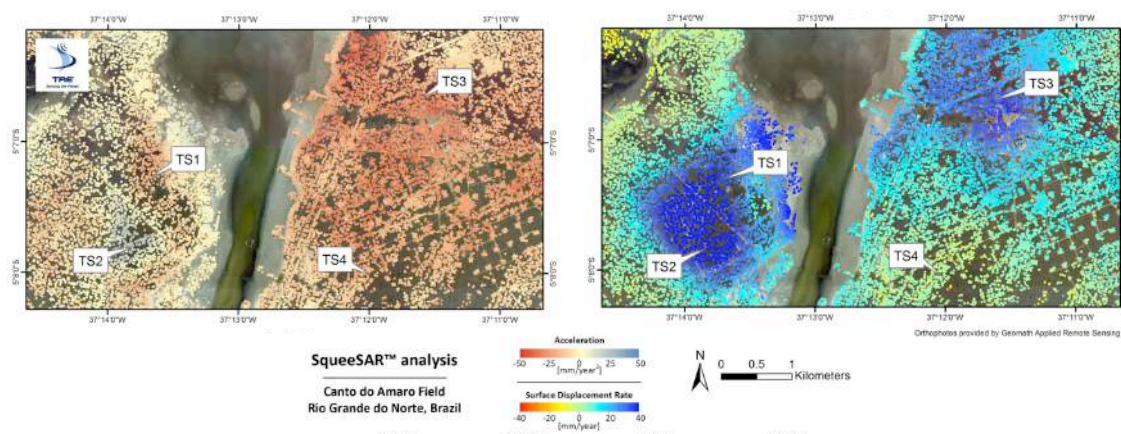


Figura 7: Resultados do deslocamento superficial da porção oeste do campo de Canto do Amaro, destacando quatro séries temporais individuais.

A investigação da série temporal identificada dentro dessas áreas ajuda a demonstrar a vantagem de obter uma alta densidade de pontos de medição sobre áreas de produção, uma vez que cada ponto tem uma série temporal de movimento única e detalhada (Figura 8).

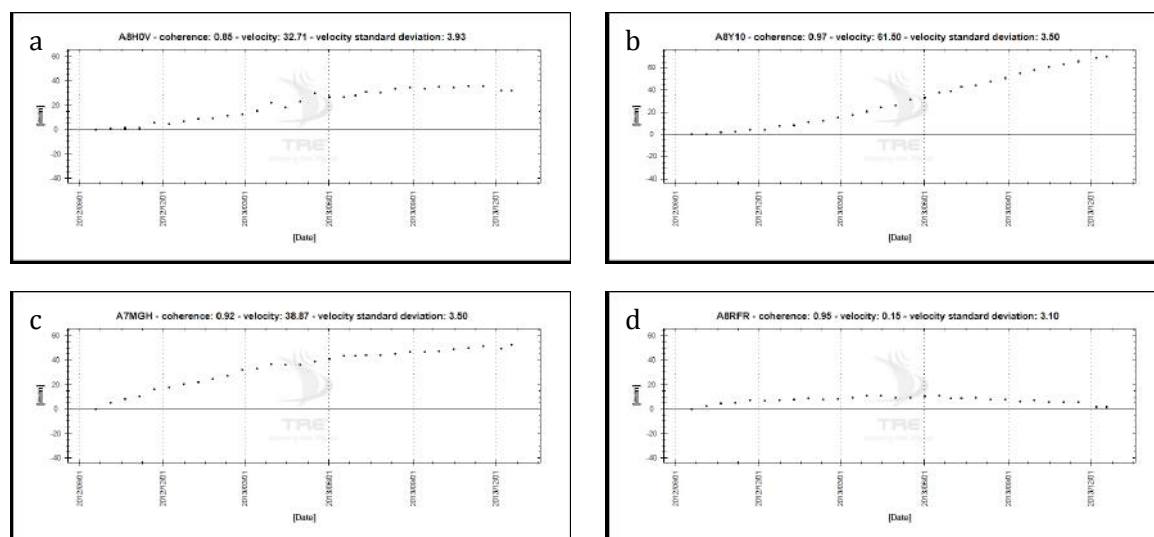


Figura 8: Série temporal de deslocamento dos pontos de medição a. TS1, b. TS2, c. TS3 e d. TS4 observados na Figura 7.

6. Conclusões e Comentários

Uma densidade de 922 pontos de medição por quilômetro quadrado foi identificada sobre a área de estudo (Tabela 4). A distribuição dos pontos de medição ao longo da área de estudo foi bastante regular, com apenas algumas áreas exibindo uma menor densidade de pontos ou até mesmo ausência de pontos de medição. Essas áreas muitas vezes correspondem a corpos d'água ou regiões onde as condições da superfície sofrem constantes modificações.

Informações de deformação do terreno não puderam ser obtidas nessas áreas, devido a falta de alvos de referência.

Tabela 4: Estatística da análise histórica conduzida no campo de Canto do Amaro-RN.

Atributos	Resultados Série Temporal
Imagens processadas	30
Resolução Temporal (meses)	15
Número total de pontos de medição	407.795
Densidade média de pontos por km ²	922
Taxa de deslocamento média (mm/ano)	3.56
Taxa de deslocamento média do desvio padrão (mm/ano)	±3.04

A precisão dos dados é avaliada principalmente por meio de valores de desvio padrão das taxas de deslocamento, que fornecem uma indicação dos limites de confiança associados a cada valor. Embora a precisão média dos resultados tenha sido ligeiramente maior que o intervalo milimétrico normalmente obtido a partir de uma análise do algoritmo utilizado, isso ocorreu principalmente devido à análise de um conjunto de dados relativamente pequeno (30 imagens) e durante um período de tempo mais curto (15 meses). Os valores de desvio padrão seriam menores, caso se empregasse o processamento em um conjunto maior de dados e/ou obtido durante um período de tempo mais longo.

Os resultados desta análise histórica sobre o campo de Canto do Amaro proporcionam uma excelente demonstração da tecnologia InSAR utilizada sobre um reservatório em produção ativa submetido à atividades secundárias de recuperação de petróleo. Valores de até **+87 mm** de deslocamento foram identificados a partir da feição de movimento mais pronunciado localizada sobre o campo Canto do Amaro. Uma visão geral detalhada e abrangente das tendências de deformação de superfície foi fornecida pela alta densidade de pontos de medição identificados sobre o campo entre setembro de 2012 e dezembro de 2013. A série temporal dos pontos de medição apresentada neste relatório ajuda a ilustrar a abundância de informações contidas em um conjunto de dados que podem ser comparadas ao atual conjunto de medições DGPS coletadas sobre o campo petrolífero.

6. Referências Bibliográficas

- [1] A. Ferretti, C. Prati e F. Rocca, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, N.1, January 2001;
- [2] A. Ferretti, A. Tamburini, F. Novali, A. Fumagalli, G. Falorni e A. Rucci, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, N.1, January 2001;
- [3] D.W. Vasco, A. Rucci, A. Ferretti, F. Novali, R.C. Bissell, P.S. Ringrose, A.S. Mathieson e I.W. Wright, Satellite –based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide, Geophysical Research Letters, Vol. 37, L03303, 2010;
- [4] F.M. Henderson e A.J. Lewis, Principles & Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2, ASPRS, 1998;
- [5] F.F. Gama, W.R. Paradella, J.C. Mura e A.R. Dos Santos, Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais, Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu-PR, 2013;
- [6] P.A. Rosen, S.Hensley, I.R.Joughin, F.K. Li, S.N. Madsen, E. Rodriguez e R.M. Goldstein, Synthetic Aperture Radar Interferometry, Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 3, March 2000;
- [7] R.Bürgmann, G.Hiley, A.Ferretti e F.Novali, Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis, Geology; v.34; no. 3; p. 221-224; March 2006.
- [8] COSMO SkyMed Data & Products. Disponível em <<http://www.e-geos.it/products/cosmo.html>>. Acesso em Outubro 2014.