

## Avaliação preliminar de imagens ALOS/PALSAR na estimativa de índice de rugosidade internacional (IRI)

Flávio Fortes Camargo <sup>1,2</sup>  
Edson Eyji Sano <sup>1</sup>  
Gustavo Macedo de Mello Baptista <sup>1</sup>  
Raphael de Oliveira Borges <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociências da Universidade de Brasília – IG/UnB  
Caixa Postal 04465 – 70919-970 - Brasília - DF, Brasil  
edson.sano@gmail.com, gmbaptista@unb.br

<sup>2</sup> Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT  
SAN Quadra 03, Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes - 70040-902 – Brasília - DF, Brasil  
{flavio.camargo, raphael.borges}@dnit.gov.br

**Abstract.** This article evaluates the relationship between SAR backscattering coefficients and international roughness index (IRI). We used full-polarized ALOS/PALSAR amplitude images and field data gathered using laser sensors on-board of specially adapted vehicles. We also evaluated LANDSAT-5/TM images for comparison purposes. The study area is located in the Federal District, Brazil. Scatterplots were used for qualitative analysis of the relationship. Complementarily, simple regression was used for quantitative analysis using Pearson's coefficient ( $r$ ) and coefficient of determination ( $r^2$ ). The  $r^2$  values were submitted to the Student's  $t$  test for evaluating its significances. Considering the optical images, only the near infrared band presented relation with the IRI data. Band 4 reached an  $r$  value of 0.3440 and an  $r^2$  value of 0.1183. The band 4  $r^2$  value was tested and considered significant. For the SAR images, all the polarizations presented linear and positive relations with the IRI data. The HH polarized image yielded an  $r$  value of 0.5040 and an  $r^2$  value of 0.2541. The HV polarized image obtained an  $r$  value of 0.4824 and an  $r^2$  value of 0.2327 while the VV polarized image reached an  $r$  value of 0.4382 and an  $r^2$  value of 0.1920. Considering the  $t$  test, all the  $r^2$  values obtained through SAR images were significant. The results show that there is significant relationship between SAR backscattering and IRI. New researches should consider high resolution SAR sensors and others wavelengths in the microwave region.

**Palavras-chave:** asphaltic pavement, international roughness index, ALOS/PALSAR, pavimento asfáltico, índice de rugosidade internacional, ALOS/PALSAR.

### 1. Introdução

O Índice de Rugosidade Internacional (IRI) é empregado na mensuração da rugosidade superficial de rodovias pavimentadas. Representa um parâmetro objetivo para se avaliar o nível de conforto de uma rodovia e, por conseguinte, a qualidade desta. O IRI consiste na razão entre o acumulado em módulo dos desvios na altura do pavimento (mm ou cm) (em relação a uma superfície de referência) e a distância percorrida pelo veículo (m ou km). Atualmente, sensores a laser são utilizados em veículos para o levantamento em campo do IRI (DNIT, 2011). O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) realiza campanhas anuais, nas rodovias sob sua administração, para o levantamento do IRI. Estes dados têm sido utilizados na gestão das demandas de manutenção e conservação. O DNIT classifica o IRI em três categorias, a saber: 1)  $IRI > 4,5$  (Ruim); 2)  $3,0 < IRI \leq 4,5$  (Regular); 3)  $0,0 < IRI \leq 3,0$  (Bom).

Radares imageadores de abertura sintética (do inglês *Synthetic Aperture Radar* - SAR) podem ser utilizados em estudos e estimativas do IRI. Dado que a radiação eletromagnética na faixa das microondas interage diretamente com a forma e a rugosidade dos alvos, a energia retroespalhada por pavimentos de rodovias tem relação direta com o IRI (Suapanga e Yoshikazo, 2010). Quanto maior o valor de IRI, maior será o retroespalhamento. E vice-versa.

Com base no exposto, este trabalho propõe avaliar a afirmação apontada por Suapanga e Yoshikazo (2010) nas condições e características das rodovias federais brasileiras. Desse modo, será realizada uma avaliação de imagens do sensor ALOS/PALSAR em área teste localizada no Distrito Federal. Como forma de controle do potencial das imagens SAR, serão avaliadas também imagens ópticas disponíveis para a data e área teste. Os dados ópticos servirão como um parâmetro auxiliar na avaliação a ser realizada.

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no Distrito Federal e consiste em um trecho duplicado da rodovia BR-010/DF com 18,5 km de extensão. O referido trecho está compreendido entre Brasília/DF e Sobradinho/DF e é administrado pelo DNIT. A Figura 1 ilustra a localização da área de estudo.

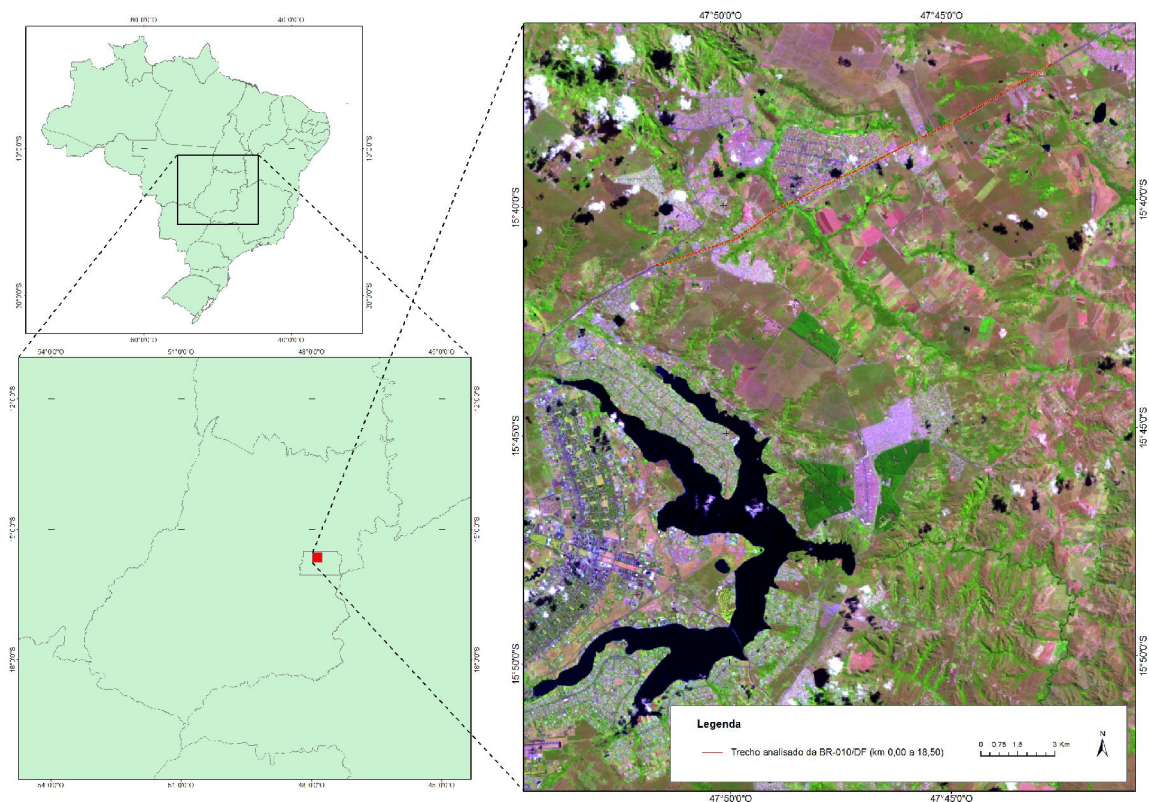


Figura 1. Localização do trecho analisado da BR-010/DF (Composição colorida LANDSAT-5/TM; R5G4B3).

### 2.2 Dados Utilizados

Foram utilizadas imagens ALOS/PALSAR em amplitude (órbita ascendente 6651; ponto 6870), coletadas em 25/04/2007, com múltipla polarização (HH, HV e VV), banda L ( $\lambda = 23,6$  cm), resolução radiométrica de 16 bits e resolução espacial de 12,5 m. As imagens ALOS/PALSAR estavam ortoretificadas e convertidas em coeficientes de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ), conforme detalhadas por Sano et al. (2009).

Também foram utilizadas imagens LANDSAT-5/TM (órbita: 220; ponto: 071), de 24/04/2007, que foram obtidas gratuitamente na seguinte página do *United States Geological Survey* (USGS): <http://earthexplorer.usgs.gov/>. As imagens LANDSAT-5/TM utilizadas compreenderam as bandas do vermelho visível (banda 3), infravermelho próximo (banda 4) e

infravermelho médio de ondas curtas (bandas 5 e 7). A resolução radiométrica das imagens é de 8 bits e a espacial é de 30 m. Todas as imagens LANDSAT-5/TM foram obtidas no nível L1T e, desse modo, estavam ortoretificadas (USGS, 2013). As imagens LANDSAT-5/TM foram as únicas disponíveis no momento desta pesquisa. Os autores verificaram a possibilidade de uso de imagens LANDSAT-7/ETM+, com maior resolução espacial, porém, não havia imagens adequadas para a data e a área de estudo.

Os dados de campo foram obtidos junto ao DNIT e consistem em tabelas com valores de IRI referentes ao pavimento asfáltico e medidos por meio de sensores a laser embarcados em veículos adaptados. Os valores de IRI são apresentados para cada 100 m da rodovia e cada trecho possui campos específicos na tabela, apresentando os quilômetros inicial e final da coleta. Segundo o DNIT (2008), o levantamento de campo ocorreu entre os meses de novembro/2006 e agosto/2007. Não há informação precisa do dia da coleta, tanto na base de dados quanto no relatório produzido pelo DNIT. O trecho estudado da BR-010/DF consiste em um trecho duplicado. Porém, os dados do IRI disponibilizados pelo DNIT contemplaram somente uma das pistas, sentido Sobradinho/DF para Brasília/DF.

Utilizou-se também uma base vetorial digital do DNIT contendo os trechos rodoviários de interesse a esta pesquisa. A base vetorial apresenta a quilometragem inicial e final da rodovia de interesse (BR-010/DF) e foi empregada na espacialização dos valores de IRI e na coleta de dados das imagens ALOS/PALSAR e LANDSAT-5/TM.

### 2.3 Processamento dos Dados

As imagens LANDSAT-5/TM foram convertidas para reflectância de superfície ( $\rho$ ) utilizando o modelo empírico QUAC (*Quick Atmospheric Correction*), disponível no *software* ENVI 4.8. Este modelo determina os parâmetros de compensação atmosférica diretamente da imagem analisada, por meio dos espectros dos *pixels* contidos nesta. O modelo assume que a imagem é composta de agrupamentos de *pixels* espectralmente homogêneos (geralmente acima de 10 grupos), chamados de *endmembers*. Valores de ganho e *offset* são extraídos destes *endmembers* e aplicados na imagem para a obtenção dos dados de  $\rho$ . O modelo também emprega *pixels* escuros na imagem como referências para a correção de valores espúrios decorrentes do espalhamento atmosférico da radiação (Moses et al., 2012). Para o processamento no modelo QUAC, as imagens LANDSAT-5/TM foram previamente convertidas de valores de Número Digital (ND) para radiação utilizando dados disponíveis no arquivo de metadados (radiações mínima e máxima e ângulo de elevação solar). Após a conversão para  $\rho$ , curvas espectrais de alvos característicos (vegetação verde, solo exposto, água e áreas urbanas) foram analisadas para verificar a qualidade dos dados obtidos. As curvas obtidas estavam coerentes com a literatura pertinente.

As imagens LANDSAT-5/TM obtidas estavam em coordenadas geográficas, *datum* horizontal WGS84. Houve a necessidade de projetá-las para a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 23 Sul, de modo a compatibilizar com as imagens ALOS/PALSAR que estavam referenciadas ao *datum* horizontal WGS84, projeção UTM (Zona 23 Sul).

Mesmo com esta compatibilização, foi necessário o registro das imagens LANDSAT-5/TM utilizando como referência as imagens ALOS/PALSAR. Verificou-se que as imagens LANDSAT-5/TM estavam deslocadas em relação às imagens ALOS/PALSAR e aos vetores de rodovias do DNIT. As imagens registradas foram geradas com *pixels* de 12,5 m x 12,5 m de dimensão, para se adequarem à resolução espacial das imagens ALOS/PALSAR. O procedimento de registro foi realizado no *software* ENVI 4.8. As Figuras 2 e 3 apresentam respectivamente as imagens ALOS/PALSAR e vetores amostrais e, as imagens registradas LANDSAT-5/TM e vetores amostrais.

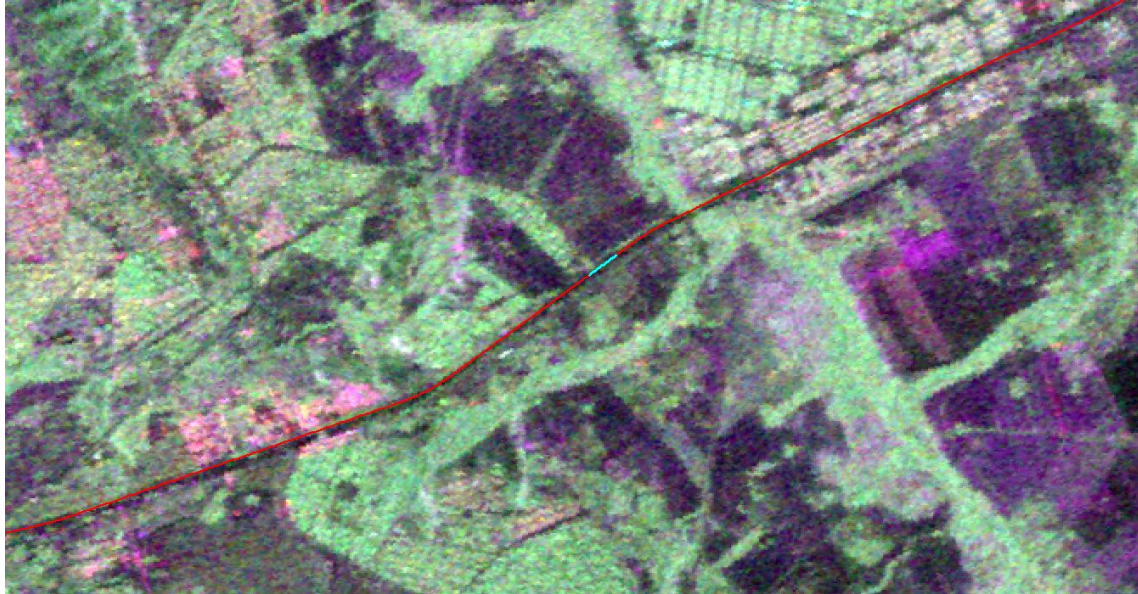


Figura 2. Vetor (em vermelho) com trechos de 100 m de extensão sobreposto a uma composição colorida ALOS/PALSAR (RGB/HH-HV-VV). Destaque para um trecho amostral selecionado (em azul claro).



Figura 3. Vetor (em vermelho) com trechos de 100 m de extensão sobreposto a uma composição colorida LANDSAT-5/TM (R5G4B3). Destaque para um trecho amostral selecionado (em azul claro).

Os valores do IRI obtidos em campo foram espacializados por meio da ferramenta *Linear Referencing System* (LRS), disponível no *software* ArcGIS 10.2.2. Esta ferramenta gerou 185 segmentos amostrais de 100 m de extensão contendo o valor do IRI coletado em campo. Os segmentos foram definidos pelas quilometragens inicial e final da tabela de atributos (para cada trecho) com base em uma rota, também com quilômetros inicial e final e obtida dos trechos rodoviários do arquivo vetorial referente à BR-010/DF. Emprega-se um campo identificador para relacionar a tabela à rota. Assim, para cada registro na tabela, o algoritmo busca na rota os quilômetros inicial e final e, posteriormente, gera um vetor correspondente

contendo os atributos do registro. Os segmentos amostrais estavam referenciados ao *datum* horizontal WGS84, projeção UTM (Zona 23 Sul).

## 2.4 Análise Estatística

Para cada segmento amostral do IRI, com 100 m de extensão, foram coletados os valores médios de  $\rho$ , nas imagens LANDSAT-5/TM, e os valores médios de  $\sigma^0$ , nas imagens ALOS/PALSAR com diferentes polarizações. Este procedimento foi realizado no *software* ArcGIS 10.2.2, utilizando a ferramenta *Zonal Statistics*.

Posteriormente, foram realizadas regressões lineares simples em cada conjunto de dados para corroborar a existência de relação entre IRI e  $\sigma^0$ , conforme apontam Suanpaga e Yoshikazu (2010), e para avaliar a existência ou não de relação entre IRI e  $\rho$ .

As análises dos resultados foram conduzidas por meio da avaliação qualitativa de gráficos de dispersão e da avaliação quantitativa dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ), de determinação ( $r^2$ ) e da aplicação do teste de hipóteses  $t$  de *Student*. Este último item foi considerado para avaliar a significância estatística de cada valor de  $r^2$  obtido. Foram estabelecidas as seguintes hipóteses:  $H_0: r^2 = 0$  (Hipótese nula: não há qualquer relação entre as duas variáveis analisadas), e,  $H_1: r^2 \neq 0$  (Hipótese alternativa: Há uma relação linear positiva ou negativa entre as variáveis analisadas). Neste caso, empregaram-se testes  $t$  bicaudais.

## 3. Resultados e Discussão

Os gráficos de dispersão foram gerados com o IRI observado em campo como variável dependente, de modo a avaliar o potencial de cada imagem na estimação deste índice. A Figura 4 apresenta os resultados obtidos com as imagens LANDSAT-5/TM. Na Figura 5 são apresentados os resultados das imagens ALOS/PALSAR.

A análise visual dos gráficos apresentados na Figura 4 permite afirmar que apenas a banda 4 apresentou correlação com o IRI coletado em campo. Há uma fraca correlação linear direta, ratificada pelo  $r = 0,3440$ . Observa-se pelo  $r^2$  que esta banda tem capacidade de explicar aproximadamente apenas 12% do IRI observado em campo. Pode-se inferir pelo gráfico da banda 4 que a variância do modelo de regressão é elevada e não uniforme, caracterizando heterocedasticidade.

Analisando as curvas espectrais de alguns *pixels* de asfalto nas imagens LANDSAT-5/TM, foi possível observar curvas parabólicas com altas reflectâncias nas regiões do infravermelho próximo e infravermelho médio de ondas curtas. Ora o pico da curva se localiza na banda do infravermelho próximo (0,76 – 0,90  $\mu\text{m}$ ), ora na banda 5 (1,55 – 1,75  $\mu\text{m}$ ) do infravermelho médio de ondas curtas. A parábola decai fortemente em direção à banda 7 (2,08 – 2,35  $\mu\text{m}$ ), também do infravermelho médio de ondas curtas. Apesar da limitação imposta pela resolução espacial das imagens utilizadas, estas observações estão coerentes com algumas curvas espectrais apresentadas em outros trabalhos do gênero, tal como em Herold e Roberts (2005).

Não foi possível levantar uma hipótese plausível pela fraca relação apresentada pela banda 4, dado que as bandas 5 e 7 apresentaram nenhuma relação com o IRI. Seria adequado um aprofundamento neste campo realizando uma investigação com dados de alta resolução espacial, com bandas espectrais nas regiões do infravermelho próximo e médio de ondas curtas, e proceder com nova comparação com o IRI.

Com relação às imagens ALOS/PALSAR, a análise visual dos gráficos da Figura 5 mostra que todas as polarizações apresentaram moderada correlação, com destaque para os resultados obtidos com a polarização HH ( $r = 0,5040$ ;  $r^2 = 0,2541$ ). Observando-se os valores de  $r^2$ , verifica-se que as polarizações HH, HV e VV explicam, respectivamente, 25%, 23% e 19% do IRI coletado em campo. Para todos os gráficos da Figura 5, observa-se que as

variâncias dos modelos são elevadas e não uniformes, caracterizando também heterocedasticidade. Os gráficos da Figura 5 corroboram os resultados apresentados por Suapanga e Yoshikazu (2010) e confirmam a hipótese motivadora deste experimento e, por conseguinte, deste artigo.

Após a análise qualitativa dos gráficos de dispersão, foi aplicado o teste *t* de *Student* para a verificação quantitativa da significância dos valores de  $r^2$  obtidos. Os testes foram realizados utilizando os 185 segmentos amostrais, com um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% e foram calculados os valores críticos uni e bicaudal. A Tabela 1 apresenta as estatísticas obtidas para o teste empregado.

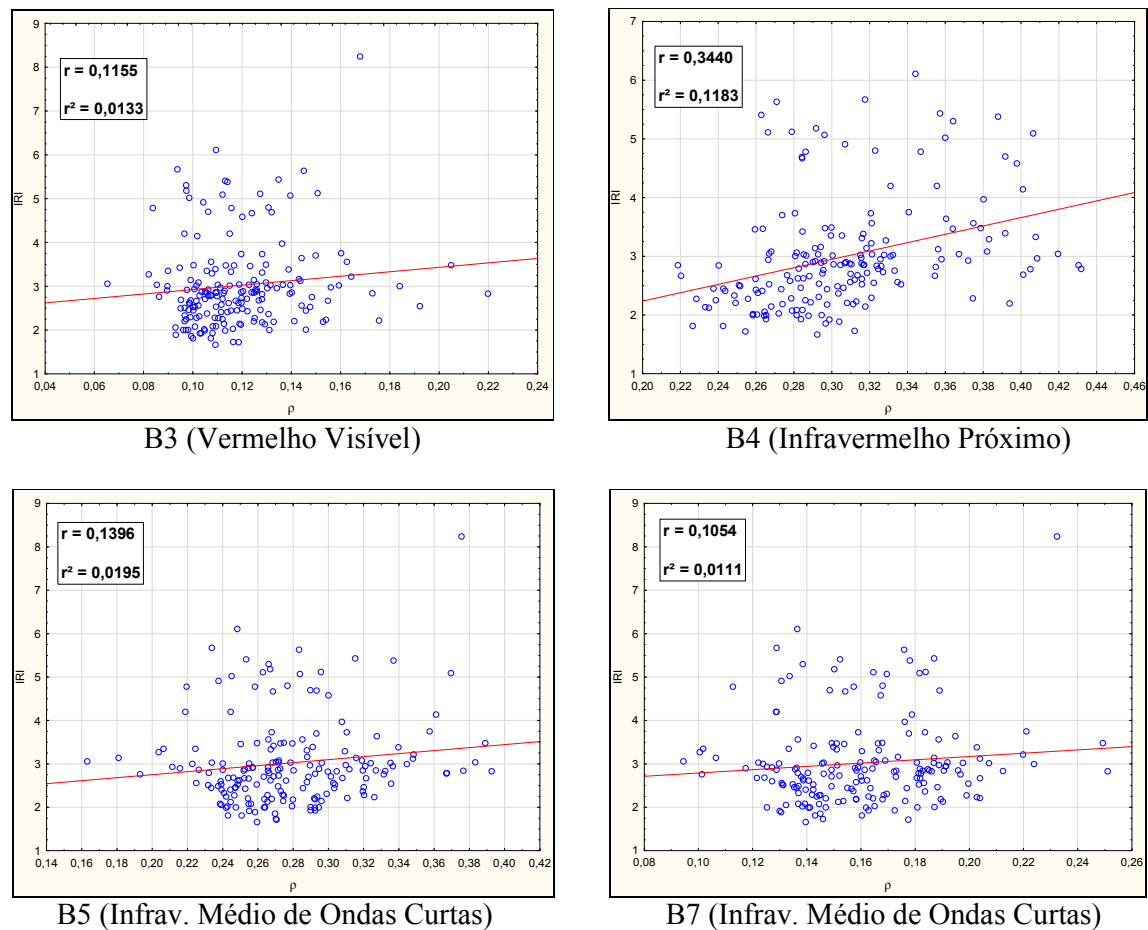


Figura 4. Gráficos de dispersão gerados utilizando o IRI e as imagens LANDSAT-5/TM.

Considerando o teste bicaudal, observa-se na Tabela 1 que todas as polarizações ALOS/PALSAR apresentaram valores de  $t$  calculado superiores ao valor crítico tabelado de  $t$  para o teste bicaudal. Isto significa que os valores de  $r^2$  obtidos com estas imagens são significativos estatisticamente. No caso das imagens ópticas, somente a banda 4 apresentou valor de  $t$  calculado superior ao valor crítico de  $t$  tabelado. Sendo assim, o  $r^2$  obtido por meio da banda 4 do sensor TM é considerado significativo estatisticamente. Ou seja, há uma relação linear positiva entre a reflectância da banda 4 e os valores de IRI medidos em campo. De modo geral, as estatísticas dos testes  $t$  corroboraram as constatações obtidas pela análise qualitativa dos gráficos de dispersão.

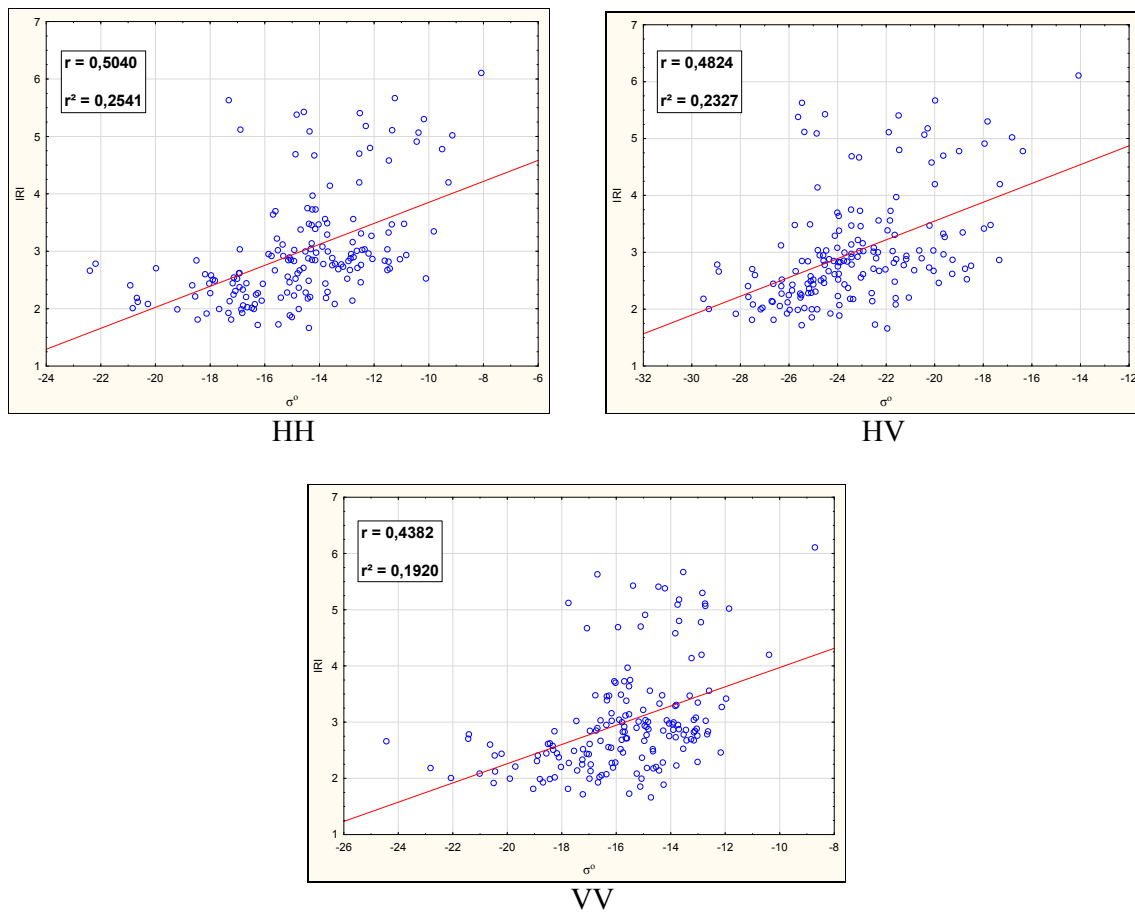


Figura 5. Gráficos de dispersão gerados utilizando o IRI e as imagens ALOS/PALSAR.

Tabela 1. Estatísticas dos testes *t* de *Student* obtidas para cada imagem e utilizando as 185 amostras de IRI.

Estatísticas do teste <i>t</i> de <i>Student</i>	
Graus de Liberdade (n-2)	<b>183</b>
<i>t</i> crítico unicaudal	<b>1,65</b>
<i>t</i> crítico bicaudal	<b>1,96</b>
<i>t</i> B3	1,56
<i>t</i> B4	4,93
<i>t</i> B5	1,90
<i>t</i> B7	1,43
<i>t</i> HH	7,85
<i>t</i> HV	7,41
<i>t</i> VV	6,56

#### 4. Conclusões

Os resultados obtidos corroboram a hipótese levantada de que há uma relação linear positiva entre retroespalhamento e valores de IRI mensurados em campo. Apesar da moderada resolução espacial das imagens ALOS/PALSAR utilizadas, observaram-se moderadas e significativas correlações entre as imagens em diferentes polarizações e o IRI.

Neste sentido, novas pesquisas devem ser continuadas por estes autores e suas instituições, agora empregando sensores SAR de alta resolução espacial e em diferentes bandas/comprimentos de onda.

Dados os resultados insatisfatórios das imagens ópticas, estas ratificaram a habilidade específica dos dados SAR na mensuração indireta de rugosidade. Exceção fica por conta da banda 4, a qual apresentou correlação dada como significativa pelo teste *t* de *Student* aplicado. Novos testes devem ser conduzidos por estes autores e suas instituições empregando dados de alta resolução espacial para melhor avaliação do potencial da região do infravermelho próximo neste tipo de estudo.

Por fim, o experimento realizado deve ser tomado como um indicativo do potencial das tecnologias empregadas e orientar um planejamento robusto de novos experimentos sincronizando as ações de campo e as de aquisição de imagens (coleta simultânea ou quase simultânea em ambas frentes) e orientando as características técnicas dos sistemas sensores a serem utilizados.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao DNIT pelos dados do IRI disponibilizados para a realização do experimento.

### **Referências Bibliográficas**

DNIT. **SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos: resultados dos levantamentos de campo (LVC e IRI) – 2008 – Necessidade de recursos**. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2008. 35 p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/relatorio-sgp-2008-2.pdf>>. Acesso em: 24.mar.2014.

DNIT. **Relatório dos levantamentos funcionais das rodovias federais**. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011. 39 p. Disponível em: <<http://www.youblisher.com/p/371512-Relatorio-SGP-2011-2012>>. Acesso em: 20.abr.2014.

Herold, M.; Roberts, D. Spectral characteristics of asphalt road aging and deterioration: implications for remote-sensing applications. **Applied Optics**, v. 44, n. 20, p. 4327 – 4334, 2005.

Moses, J. M.; Gitelson, A. A.; Perk, R. L.; Gurlin, D.; Rundquist, D. C.; Leavitt, B. C.; Barrow, T. M.; Brakhage, P. Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data. **Water Research**, v. 46, p. 993 – 1004, 2012.

Sano, E. E; Santos, E. M.; Meneses, P. R. Análise de imagens do satélite ALOS PALSAR para o mapeamento de uso e cobertura da terra do Distrito Federal. **Geociências**, v. 28, p. 441 – 451, 2009.

Suapanga, W.; Yoshikazu, K. Riding quality model for asphalt pavement monitoring using phase array type L-band synthetic aperture radar (PALSAR). **Remote Sensing**, v.2, p. 2531 – 2546, 2010.

USGS. **LANDSAT Thematic Mapper (TM) Level 1 (L1) Data Format Control Book (DFCB)**. Sioux Falls, South Dakota: EROS Data Center, 2013. 41 p. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/documents/LS-DFCB-20.pdf>>. Acesso em: 01.Nov.2014.