

## Variabilidade em Escala da Textura da Floresta Amazônica e de Região Desmatada utilizando imagem IKONOS da Reserva Rebio Jarú-Rondônia

C.M. SOUZA<sup>1\*</sup>, L.D.A. SÁ<sup>2</sup> e M.O. DOMINGUES<sup>3</sup>

Recebido em 16 janeiro, 2013 / Aceito em 21 outubro, 2013

**RESUMO.** Utiliza-se imagem de satélite de alta resolução espacial (IKONOS, 1-4 m) para investigar características da textura de regiões cobertas pela Floresta Amazônica e desmatadas na área da Reserva Biológica do Jarú em Rondônia (10°05'S 10°19'S e 61°35'W 61°57'W). Procurou-se determinar a existência de possíveis padrões de variabilidade na textura da cobertura vegetal por escala em regiões tanto cobertas por floresta quanto desmatadas. A detecção de escalas características da textura foi efetuada aplicando-se metodologia baseada na aplicação da Transformada Wavelet Contínua Bidimensional, com a utilização da wavelet de Morlet. Os resultados sugerem a existência de possíveis eixos preferenciais de padrões de textura nas áreas cobertas por floresta. Ademais, são observadas diferenças nos padrões de variabilidade por escala da textura nas áreas cobertas por floresta e desmatadas, as quais mostraram distintos valores da variância e curtose por escala, para diversos eixos sobre a imagem.

**Palavras-chave:** transformada wavelet contínua bidimensional, floresta amazônica, heterogeneidade horizontal, sensoriamento remoto, satélite IKONOS, variabilidade por escala da textura.

### 1 INTRODUÇÃO

Em muitos ramos da pesquisa em que se estudam as interações superfície-atmosfera é cada vez mais importante o conhecimento profundo das características superficiais. A superfície da terra é coberta por elementos como culturas agrícolas, áreas urbanas, florestas e diversas conformações do terreno que formam mosaicos com distintas texturas que podem estar associados a variados fenômenos tais como decomposição de matéria orgânica, fotossíntese, sucessão da comunidade de plantas, incêndios, distintos usos da terra, diferentes padrões de rugosidade superficial [19], cujo pleno conhecimento exige ação integrada de investigações interdisciplinares ([4]; [12]).

---

\*Autor correspondente: Cledenilson Mendonça de Souza

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) – Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, AM, Brasil. E-mail: cledenilsonms@gmail.com

<sup>2</sup>Centro Regional da Amazônia – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CRA-INPE), Belém, PA, Brasil. E-mail: leonardo.deane@pq.cnpq.br

<sup>3</sup>Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC/CTE/INPE), São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: margarete@lac.inpe.br

A textura, em geral, está associada a padrões estruturais da superfície de objetos [15] e, na maioria das vezes, é constituída por padrões repetitivos, cuja disposição pode ser periódica, quase periódica ou aleatória [18], ou mesmo auto-similar ([20]; [21]). Texturas naturais são, de modo geral, ditas como aleatórias, e texturas artificiais são frequentemente determinísticas ou periódicas.

Uma questão de grande interesse científico é a de investigar possíveis interrelações entre a variabilidade da textura de uma imagem de satélite obtida em bandas espectrais associadas à luz visível e a variabilidade existente na rugosidade superficial. Efetivamente, em escoamentos turbulentos próximos a superfícies rígidas, como os que ocorrem na camada limite atmosféricas (CLA), as características dos elementos de rugosidade mecânica existentes nestes locais impõem escalas dimensionais que podem influir no tipo de interação superfície-atmosfera ([7]; [10]; [17]). Uma das escalas de comprimento características para exprimir tais efeitos de atrito próximo ao contorno inferior da CLA é o chamado comprimento de rugosidade,  $z_0$ . Trata-se de uma grandeza inversamente proporcional à resistência à transferência de momentum próximo a superfícies rugosas e seu valor numérico se associa à média do comprimento das irregularidades superficiais [3]. Outras escalas características de heterogeneidade horizontal também foram propostas para grandezas escalares, como a temperatura,  $z_T$ , e o vapor d'água,  $z_q$  [9]. Segundo este autor, a transferência de momentum é afetada por flutuações de pressão geradas por esteiras turbulentas localizadas atrás dos elementos de rugosidade mecânica que são impactados pelo escoamento, ao passo que para as transferências térmicas e de vapor d'água, tais processos mecânicos não existem, de tal forma que não se espera que ocorra analogia entre os processos de transferência mecânica e de escalares junto à superfície. Investigações experimentais e numéricas têm sido realizadas para melhorar o entendimento da dinâmica da turbulência em terrenos "fracamente" heterogêneos ([6]; [7]) e para dosséis vegetais, ([5]; [6]; [13] e [16]). Na referência [10] investigou-se, por exemplo, a estrutura do escoamento sobre os elementos da topografia. No caso particular de florestas, analisaram-se parâmetros aerodinâmicos, variações espaciais da rugosidade, porosidade e altura efetiva da superfície (altura de deslocamento do plano-zero). Na referência [17], os autores estudaram as mudanças introduzidas nas medidas de velocidade do escoamento acima de floresta quando houve transição de uma superfície mais "suave" para outra com maior rugosidade. Em [22] foi abordada a quantificação do arrasto de ondas de gravidade (OGs) na CLA estável e o papel da orografia na indução de OGs e sua influência nos processos turbulentos. Esses estudos usaram, em geral, medidas de grandezas típicas do escoamento atmosférico próximo da superfície obtidas em torres meteorológicas com algumas dezenas de metros de altura. Uma abordagem distinta e interessante, por não exigir medidas efetuadas *in loco*, adotada no presente estudo, é a de utilizar dados obtidos a partir do sensoriamento remoto da superfície terrestre a fim de obter informações relacionadas aos padrões de heterogeneidade horizontal por escala da superfície. Isto pode ser efetuado a partir de imagens de satélites, desde aquelas que registram informações contidas em bandas do espectro eletromagnético da luz visível, até outras que registram informações de bandas de comprimentos de onda consideravelmente maiores. Nesta investigação, será apenas utilizada informação de bandas do espectro visível, de alta resolução espacial, para permitir uma análise de padrões

de variabilidade em escala que atinjam a ordem de grandeza da dimensão espacial dos dosséis vegetais. Para isto foram utilizadas informações proporcionadas pelo satélite IKONOS (Space Imaging Corp., Thorton, Colorado), lançado em órbita terrestre baixa em Setembro de 1999 ([4]), o qual possui alta resolução espacial (1-4 m).

Procurar-se-á atingir um melhor entendimento dos padrões de variabilidade superficial em escala de área da Floresta Amazônica constituída por regiões com floresta primária onde existem zonas já desmatadas. Assim, serão investigadas características por escala da textura de áreas cobertas por dossel florestal bem como de áreas desmatadas, de tal forma a verificar se há escalas características de textura na copa vegetal e se estas apresentam eixos preferenciais, além de investigar se as flutuações por escala se aproximam ou não da condição de Gaussianidade, cujo valor da curtose é igual a 3. Para tanto, adota-se um procedimento que se baseia na utilização do potencial oferecido pela Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT2D) [2] aplicada à imagem do satélite de alta resolução IKONOS referente à área situada na Reserva Biológica Jarú (Rebio Jarú), no Município de Ji-Paraná, Rondônia. A utilização de metodologias baseadas na aplicação da CWT2D a problemas referentes à detecção de modificações introduzidas em áreas florestais por corte seletivo de árvores e desmatamento ainda são raras na literatura. Contudo, revestem-se de grande interesse e constituíram uma das temáticas científicas interdisciplinares do Experimento de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), e apresentam grande interesse econômico e social, como ressaltado por [12], [15], [19], dentre outros. A presente investigação contribui para a obtenção de subsídios úteis para o aprofundamento de tais estudos ao apontar procedimentos estatísticos para uma melhor qualificação de padrões de variabilidade, por escala, de imagens de regiões atingidas por práticas de desmatamento.

## 2 SÍTIO EXPERIMENTAL

A Reserva Biológica Jarú (Rebio Jarú) encontra-se no Município de Ji-Paraná, localizada a cerca de 105 km ao norte da cidade de Ji-Paraná, no estado de Rondônia, a sudoeste da Amazônia. Neste local, na época em que se realizaram as campanhas intensivas de coleta de dados do Experimento LBA [1], entre 1999 e 2002, havia uma floresta tropical compreendendo uma área de aproximadamente 268.150 hectares localizada entre 10°05'S e 10°19'S e 61°35'W e 61°57'W, com altitude variando de 100 a 150 m acima do nível do mar, propriedade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA). Caracterizava-se por apresentar área de vegetação nativa de floresta tropical com uma altura média de 33 m com algumas espécies atingindo até 45 m de altura.

## 3 DADOS

Para a realização da presente investigação foi utilizada uma imagem do satélite IKONOS proporcionada pelo projeto LBA, referente a uma área da Rebio Jarú coberta com floresta primária, mas com algumas áreas desmatadas. O IKONOS oferece uma das maiores resoluções espaciais entre as imagens orbitais atualmente disponíveis (resolução espacial 1 m) [12]. Suas imagens geor-

referenciadas permitem discriminar alvos de maneira fina (objetos de  $1 \text{ m}^2$  de área, ou maior) e possuem uma resolução radiométrica de 16 bits (ou 65536 níveis de cinza), o que aumenta o poder de discriminação de objetos. A imagem utilizada foi obtida no modo pancromático (com resolução de 1 metro) e data de 06 de abril de 2000, período em que a Rebio Jarú ainda apresentava pouca degradação, antes das queimadas e ocorrências de desmatamento verificado no final do ano de 2002. A Figura 1 apresenta a imagem IKONOS do sítio experimental, com dimensões de 7004 por 7004 pixels. Os retângulos (a) e (b) marcados dentro da Figura 1, indicam os recortes utilizados para a análise de uma área com floresta e uma área desmatada.

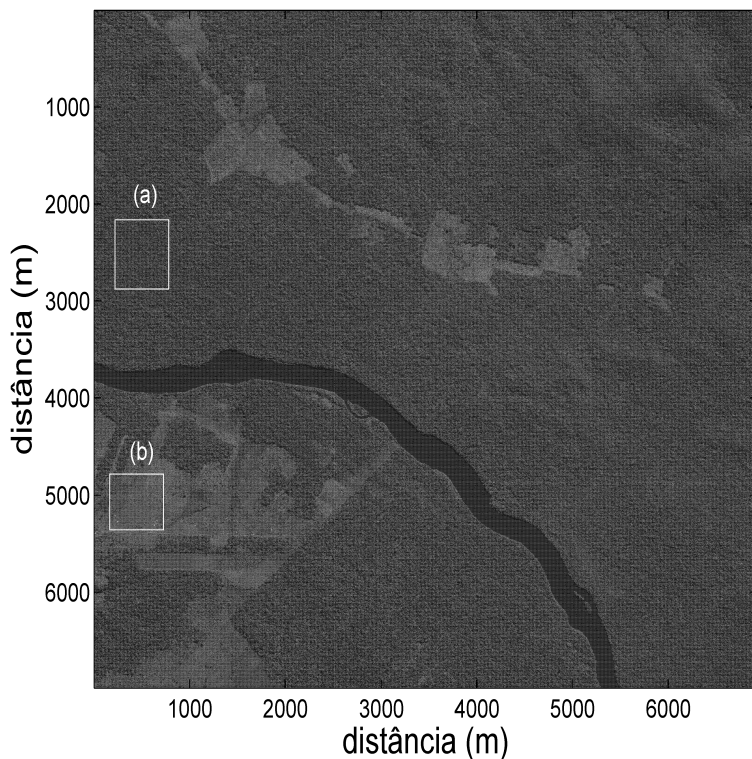


Figura 1: Imagem pancromática do satélite IKONOS com resolução espacial 1m. Área da Rebio Jarú coberta com floresta primária com algumas áreas desmatadas. O retângulo (a) indica o recorte da área com floresta e o retângulo (b) a área desmatada utilizada neste estudo.

#### 4 METODOLOGIA

Para a obtenção dos resultados, aplicou-se a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT2D), disponibilizada em um código livre [14], cuja equação pode ser escrita como em [2]

$$S(\vec{b}, a, \theta) = a^{-1} \int_{R^2} d^2\vec{x} \overline{\psi(a^{-1}r_\theta(\vec{x} - \vec{b}))} s(\vec{x})$$

em que  $S$  representa os coeficientes wavelet,  $s$  é o sinal bidimensional (imagem),  $a$  é o parâmetro de escala,  $r_\theta$  é a matriz de rotação e os vetores  $\vec{x}$  e  $\vec{b}$  correspondem à posição e translação nas imagens, respectivamente. A CWT2D é particularmente eficiente para detectar discontinuidades em imagens, pontos de singularidades (contornos, cantos) ou características direcionais (bordas, segmentos) e pode ser interpretada como um microscópio matemático, com direção seletiva, com lentes  $\psi$ , ampliada de  $1/a$  e orientação ajustada pelo parâmetro  $\theta$  ( $0 \leq \theta < 2\pi$ ) [2]. Se a wavelet for bem localizada, a densidade de energia da transformada será concentrada nas partes significativas do sinal em que há oscilações mais intensas e/ou regiões de bordas em que pode haver transições abruptas. Para cada aplicação da CWT2D sobre a imagem da área de estudo é gerada uma matriz de coeficientes wavelet tendo as mesmas dimensões da imagem analisada. Uma das formas de interpretação da informação fornecida pela energia dos coeficientes consiste na elaboração de gráficos comumente chamados de escalogramas, que permitem a visualização do sinal projetado em uma escala e ângulo de rotação específico, as cores ou tons de cinza (dependendo da paleta de cores utilizada) fornece informações sobre onde os padrões de variabilidade espacial na imagem são mais intensos. Além disso, pelo fato de ser complexa, fornece informação da parte real e da fase dos coeficientes da wavelet e permite definir melhor a direcionalidade da wavelet, o que constitui uma grande vantagem da CWT2D (wavelet de Morlet), quando comparada com as possibilidades oferecidas pela CWT1D (unidimensional). Isto faz da wavelet uma ferramenta robusta no tratamento e análise de imagens. Com estas características a wavelet de Morlet  $\psi(\vec{x}) = \exp(i\vec{k}_0 \cdot \vec{x}) \exp(-\frac{1}{2} |\vec{x}|^2)$  é utilizada neste trabalho dada sua boa localização frequencial e espacial, em que  $i$  é a unidade imaginária e  $\vec{k}_0$  o vetor número de onda no plano [2], tendo-se optado pela utilização da parte real de seus coeficientes. Para um melhor entendimento da ação desta transformada fazem-se estudos dos resultados da aplicação da CWT2D à análise de uma figura geométrica, no caso, um quadrado, conforme mostrado na Figura 2a. Assim, nas Figuras 2b, c e d são apresentados resultados referentes a variação do ângulo de rotação,  $\theta$ , da CWT2D, para uma escala fixa e do efeito da variação das escalas, fixando-se o ângulo de rotação, além de uma análise de direcionalidade. Então, as Figuras 2b, c, e d mostram escalogramas resultantes da aplicação da CWT2D à imagem do quadrado para distintos ângulos de rotação,  $\theta$ , em uma determinada escala fixa. Para o ângulo  $\theta = 0$  (visada na horizontal, no plano cartesiano) a CWT2D destaca as transições verticais abruptas, representadas pelos respectivos lados *esquerdo* e *direito* do quadrado. Por outro lado, para o ângulo  $\theta = \pi/2$  (visada na vertical, no plano cartesiano) são destacadas as transições que acentuam as transições horizontais abruptas, representadas pelos respectivos lados *superior* e *inferior* do quadrado. Para o ângulo  $\theta = \pi/4$  são destacadas as transições que destacam as saliências representadas por cada vértice do quadrado. Isso mostra que as estruturas que não se encontram perpendiculares à direção de visada (ângulo  $\theta$ ) tendem a ser atenuadas. Para efeito de tornar mais claro o potencial de aplicabilidade da CWT2D à análise de imagens, são apresentados abaixo dois exemplos que permitem melhor interpretar os resultados: i) de variação do ângulo da CWT2D aplicada a uma imagem abstrata (figura geométrica quadrangular); ii) de direcionalidade seletiva da CWT2D e variação do parâmetro de escala.

Exemplo 1: Efeito da variação do ângulo de rotação (Fig. 2) e o efeito da variação do parâmetro de escala (Fig. 3). Estes resultados mostram através de uma figura geométrica simples como a CWT2D evidencia as regiões de transição da imagem (aqui do preto para o branco) da Figura 2a quando se muda o ângulo  $\theta$ . Além disso, a Figura 3 utiliza a mesma imagem para mostrar o efeito da mudança de escala na interpretação dos resultados obtidos a partir da aplicação da CWT2D. Para tanto é feita a visualização da energia dos coeficientes. Em imagens mais complexas essas regiões de transição corresponderiam às bordas, cantos dos objetos presentes na imagem.

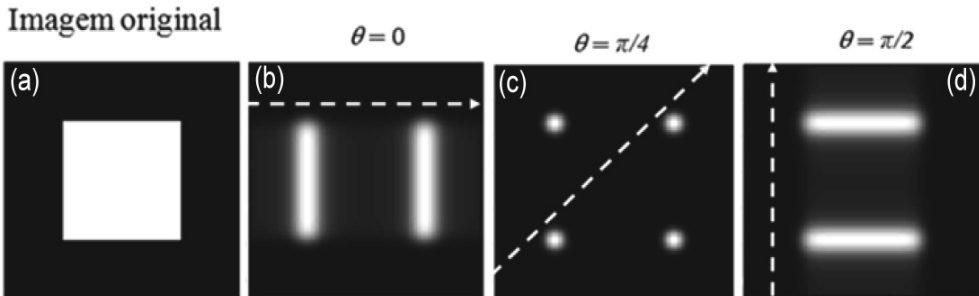


Figura 2: Efeito da variação do ângulo de rotação da CWT2D ( $\theta$ ) para um parâmetro escala da CWT2D fixo  $a = 2$ . As setas tracejadas indicam a direção ou ângulo  $\theta$  em que a CWT2D está analisado a imagem.

Para um ângulo  $\theta$  fixo é apresentado na Figura 3 o efeito da variação do parâmetro de escala  $a$  para a imagem apresentada na Figura 2a. São mostradas imagens resultantes da aplicação da CWT2D para as escalas 0.5, 2, 5 e 10. Neste exemplo observa-se uma diminuição ou aumento da localização das regiões de transição. Para escalas maiores o efeito da superposição de escalas na análise da CWT2D, comumente chamado de redundância, é mais evidenciado.

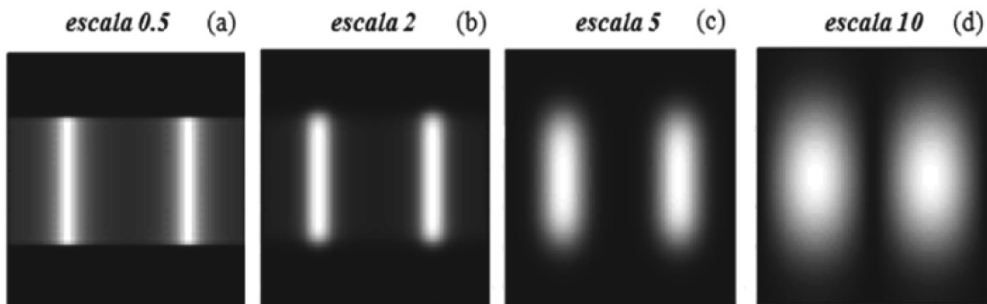


Figura 3: Efeito da variação do parâmetro escala da CWT2D ( $a$ ) para um ângulo de rotação  $\theta = 0$ .

Exemplo 2: Efeito da direcionalidade seletiva da CWT2D (Fig. 4) e variação do parâmetro de escala (Fig. 5).



A Figura 4 apresenta outro exemplo que mostra o efeito da direcionalidade seletiva da CWT2D. Aqui é elaborada uma aplicação da transformada sobre uma imagem sintética com objetos organizados em eixos preferenciais. No esquerdo apresentam-se a imagem original (Fig. 4a) e as demais (Figs. 4b, c e d), as quais são resultantes da aplicação da CWT2D para os ângulos de rotação ( $0, \pi/4, \pi/2$ ) respectivamente. As estruturas ou objetos dispostos na imagem original são destacados ou atenuados conforme o ângulo  $\theta$  escolhido. Assim, as estruturas dispostas mais próximas da orientação perpendicular a essas direções, produzem coeficientes wavelets com maior energia.

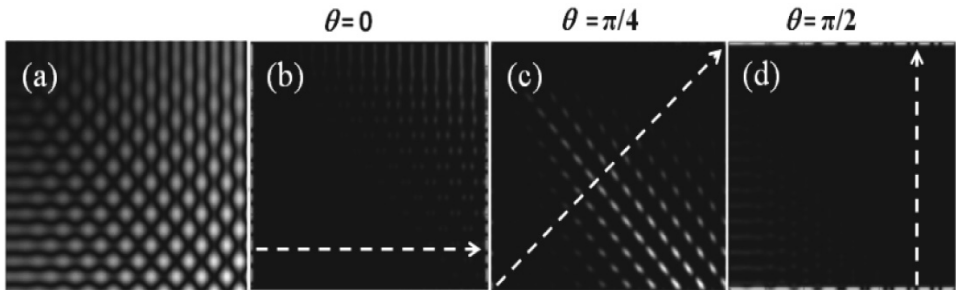


Figura 4: Efeito da variação do ângulo de rotação da CWT2D ( $\theta$ ) para um parâmetro escala da CWT2D fixo  $a = 5$ . Imagem sintética em que os objetos da imagem estão dispostos em eixos preferenciais nas direções horizontal e vertical. As setas indicam a direção ou ângulo  $\theta$  em que a CWT2D está sendo aplicada na imagem.

Na Figura 5 apresenta-se o efeito da variação do parâmetro de escala  $a$ . Neste exemplo, destaca-se a importância da escolha de um intervalo adequado de escalas para a análise que se quer realizar, a qual depende do tipo de informação a ser obtida. Isto porque pode haver perda de informação sobre o que está sendo investigado, tanto em escalas relativamente pequenas, e/ou escalas relativamente grandes.

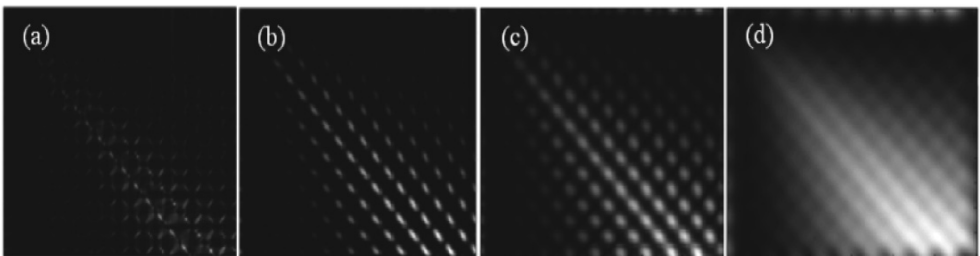


Figura 5: Efeito da variação do parâmetro escala da CWT2D ( $a$ ) para um ângulo de rotação  $\theta = \pi/4$ . As Figuras 5a, b, c e d correspondem às escalas 1, 5, 10 e 20 respectivamente. Resultado da aplicação da CWT2D sobre a imagem original da Figura 4a.

Para um ângulo  $\theta = \pi/4$  as Figuras 6b, c e d mostram os escalogramas gerados pela aplicação da CWT2D para as escalas 1, 10 e 20 em uma imagem da superfície da terra com diferentes

feições de textura apresentados na Figura 6a. Este exemplo mostra como a CWT2D percebe as diferentes superfícies. As regiões mais escuras dos escalogramas correspondem às superfícies com pouca variação na textura, ou, em outras palavras, *quase lisas*. Nestas regiões os coeficientes wavelet possuem módulo muito pequeno quando comparados com coeficientes obtidos da aplicação sobre superfícies com grande variação na textura.

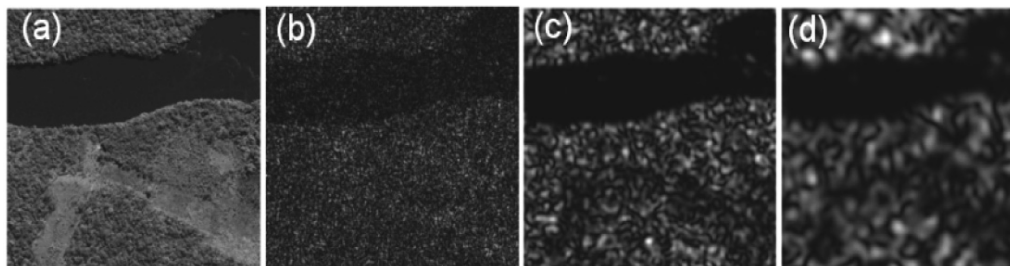


Figura 6: A Figura 6a apresenta uma imagem da superfície da terra com diferentes feições de textura. Este exemplo mostra o efeito da variação do parâmetro escala  $a$  da CWT2D para um ângulo de rotação  $\theta = \pi/4$ . As Figuras 6b, c e d mostram os escalogramas para as escalas 1, 10 e 20 respectivamente resultantes da aplicação da CWT2D sobre a imagem da Figura 6a. Estão sendo visualizados o módulo dos coeficientes nos escalogramas.

A seguir são apresentados os resultados da aplicação da CWT2D à imagem da área de estudo.

## 5 RESULTADOS

Procurar-se-á investigar as diferenças existentes, por escala, nos padrões de variabilidade superficial da textura em áreas da Reserva Jarú que contêm: i) floresta; ii) área desmatada como mostra as Figuras 7 e 8. Para isto serão calculadas variâncias e curtoses por escala da parte real dos coeficientes wavelet ao longo de eixos previamente escolhidos. Também será investigado se há escalas características de textura na copa vegetal e se estas apresentam eixos preferenciais. Foi escolhido para este estudo  $\theta = \pi/4$ . A CWT2D foi aplicada sobre dois recortes da imagem da área de estudo em que um recorte é de uma área com floresta, um recorte de área desmatada. A partir de cada matriz de coeficientes gerada pela aplicação, foram adotados eixos preferenciais em cada recorte que correspondem a 30 graus para área com floresta e para a área desmatada (sentido anti-horário), indicados pelas linhas pontilhadas mostradas nas Figuras 7 e 8, para as quais foram tomados todos os coeficientes wavelet que seguem essas direções dentro da matriz, para cada escala fixa (0.5, 1, e de 5 em 5 até 100). Com isso foi calculada e identificada a maior variância da parte real dos coeficientes wavelet para cada escala e direção determinada. Esta maior variância pode dar indícios dos padrões de variabilidade na textura para as duas áreas e verificação da escala em que isto ocorre com maior intensidade. Além disso, para cada escala foi calculada a curtose das séries espaciais que seguem os eixos preferenciais para avaliar o grau de afastamento da condição de Gaussianidade (curtose igual a 3).



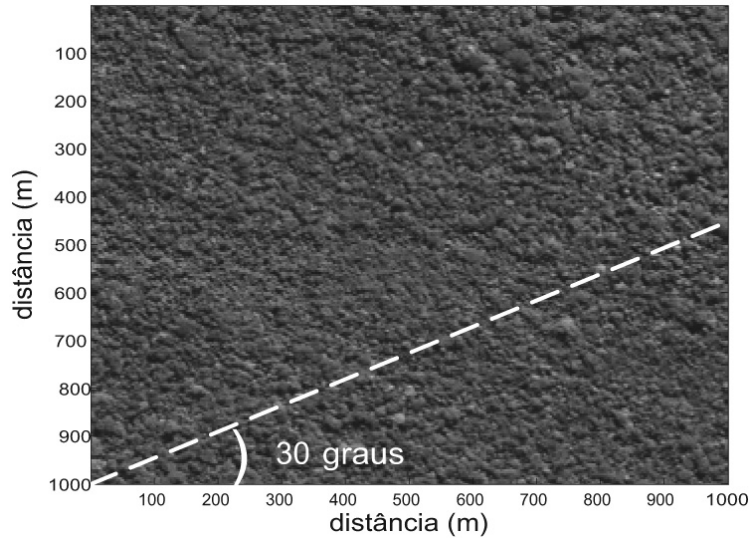


Figura 7: Recorte (a) indicado na Figura 1 como área de floresta. A linha pontilhada indica o eixo preferencial tomado a 30 graus no sentido anti-horário.

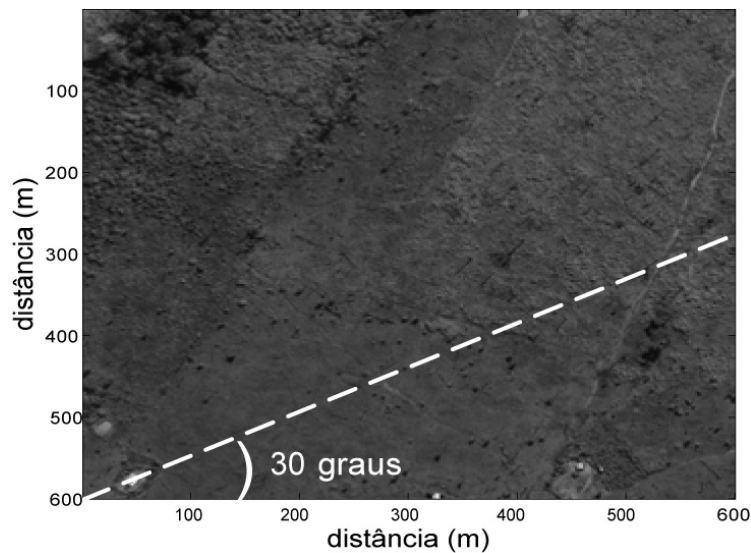


Figura 8: Recorte (b) indicado na Figura 1 como área desmatada. A linha pontilhada indica o eixo preferencial tomado a 30 graus no sentido anti-horário.

Cada ponto das linhas mostradas na Figura 9 representa a variância em uma escala específica. Para a área com floresta a variância cresce e apresenta um pico por volta da escala 45. Este resultado sugere que a textura da floresta possui uma escala característica de oscilação provavelmente associada com a dimensão média dos dosséis das árvores, problema que já foi investigado por

[19]. Por outro lado, os valores das variâncias para a área desmatada se distribuem em várias escalas, não apresentando uma escala característica de oscilação bem definida. A área desmatada possui uma superfície praticamente *lisa* em comparação com a superfície da área coberta por floresta e esta característica pode ser notada quando se comparam os valores das variâncias, que são maiores para a floresta, comparativamente à região desmatada, em praticamente todas as escalas analisadas, ocorrendo um pronunciado máximo relativo na escala 45 e outro, com variância menor, na escala 95.

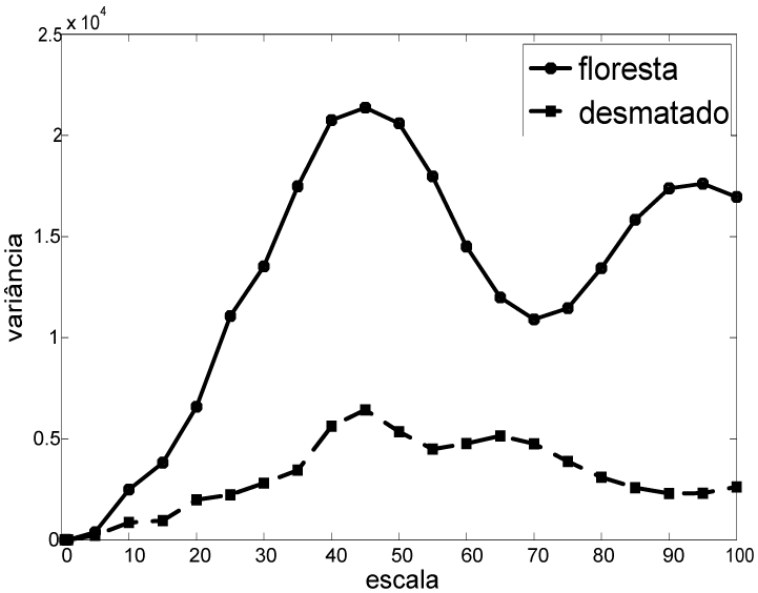


Figura 9: Mostra a variância por escala da parte real dos coeficientes da CWT2D de Morlet para  $\theta = \pi/4$ . A linha contínua mostra os resultados obtidos para a área de floresta e a linha pontilhada para área desmatada.

Para qualificar as características das flutuações por escala dos valores de textura,  $x$ , foi calculada a curtose  $K$ , por escala, sendo que, para um distribuição Gaussiana de  $x$  espera-se que o valor de  $K$  seja igual a 3. A equação que define a curtose é dada por:

$$K = (\langle (x')^4 \rangle) / (\langle (x')^2 \rangle)^2$$

em que  $\langle \rangle$  é o operador média espacial e  $x'$  é uma flutuação de  $x$  com relação à média espacial  $\langle x \rangle$ .

Os resultados para os valores de  $K$ , por escala, para áreas com floresta e desmatada, são apresentados na Figura 10 e mostram diferenças consideráveis entre si. No caso das áreas com floresta, o valor de  $K$  oscila em torno de 3 ao longo das diversas escalas analisadas, correspondendo à condição de Gaussianidade da distribuição das flutuações de textura, salvo para a escala 45, onde a curtose tem seu valor máximo, superior a 5. No caso da área desmatada, há vários máximos relativos nas escalas 5, 30 e 55, sendo os valores da curtose predominantemente positivos.

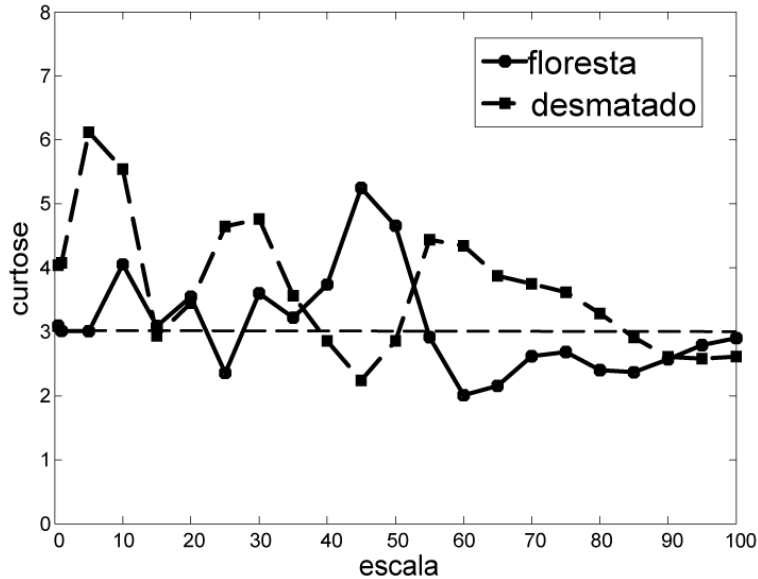


Figura 10: Cálculo da curtose por escala das séries espaciais obtidos das imagens mostrada nas Figuras 7 e 8. A reta horizontal tracejada com ordenada igual a 3 indica a região de validade da condição de Gaussianidade.

Convém mencionar que vários autores já estudaram a variabilidade espacial da informação referente à textura da floresta amazônica a partir de imagens do satélite IKONOS, banda pancromática de alta resolução, mas o que se saiba, nenhum deles utilizou a metodologia aqui proposta. Por exemplo, [15] investigaram a homogeneidade espacial e a *lacunaridade* (grandeza definida em seu artigo, que mede o desvio de um objeto geométrico, tal como um *fractal*, da condição de invariância translacional, conforme exposto por [11]). A lacunaridade poderia ser utilizada como uma medida das propriedades de textura das coberturas vegetais das florestas, a qual teria a capacidade de caracterizar aspectos da estrutura da floresta e de suas tendências espacial e temporal no que tange à sua estrutura. Efetivamente, os dados da banda pancromática do satélite IKONOS permitem a estimativa do número de árvores por área, largura de dosséis individuais de árvores e falhas na estrutura da cobertura florestal [19].

Em seu estudo sobre a floresta de terra firme de Caxiuanã, na Amazônia Oriental, [15] encontraram uma diminuição da lacunaridade com o aumento da escala, resultado que parece conter alguma relação com aquele mostrado na Figura 9, se admitir que há alguma interrelação entre lacunaridade de floresta em um dado eixo horizontal da mesma, e a correspondente variância da textura, conforme sugerido por [8]. Este resultado é corroborado pela informação contida na Figura 10, para a curtose em área de floresta, onde os valores de  $K$  estão abaixo de 3 para as maiores escalas (acima da escala 55), indicando oscilações suaves nas flutuações de textura da vegetação florestal neste intervalo de escalas. Já o valor máximo da curtose na

escala 45 (também existente no valor da variância para área com floresta) poderia ser interpretado como a escala em que há valores com variações mais abruptas e localizadas no valor da textura. É interessante comentar que [19], em seu estudo sobre a estrutura da floresta amazônica usando informações de imagens de alta resolução do satélite IKONOS, consideraram as regiões das imagens em torno dos locais de brilho máximo relativo como podendo estar associadas com a existência de dosséis individuais de árvores ou então a ápices da cobertura vegetal, enquanto que os locais com brilho mínimo relativo seriam possíveis indicadores de regiões com sombra criada por dosséis de árvores vizinhas. Tais conclusões sugerem que os valores máximos da curtose para área florestal mostrados na Figura 10 estariam efetivamente associados à estrutura de dosséis individuais de árvores.

Efetivamente, mais investigações devem ser realizadas para aprofundar a temática aqui apresentada, mas os resultados da aplicação da CWT2D à pesquisa da informação contida na banda pancromática do satélite IKONOS para melhor compreensão de aspectos da estrutura do dossel da floresta amazônica, parecem bastante promissores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível investigar o potencial oferecido pela CWT2D de Morlet, para determinar características específicas da variabilidade em escala da textura de uma imagem de satélite IKONOS de alta resolução, em banda pancromática, para áreas com floresta de terra firme e desmatada. Os resultados, obtidos a partir do cálculo de variâncias e curtoses por escala, sugerem a existência de diferenças substanciais na variabilidade em escala da textura, em eixos preferenciais previamente definidos, para regiões com floresta primária, e desmatada. Estudos como este poderiam ser estendidos para outras situações a fim de eventualmente fornecer informações úteis sobre a variabilidade em escala dos dosséis florestais, inclusive na possível detecção de áreas com degradação e com desmatamento parcial.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas–FAPEAM, CNPq: 03.728/2010-8, 483226/2011-4, 306828/2010-3. Agradecimento ao Projeto LBA pela imagem.

**ABSTRACT.** We use satellite imagery of high spatial resolution (IKONOS, 1-4m) to investigate the texture characteristics of regions covered by the Amazon rainforest and deforested areas of the Biological Reserve *Rebio Jarú* in Rondônia (10°05'S 10°19'S and 61°35'W 61°57'W). Our aim is to determine the possible existence of patterns of scale variability of the surface texture in both regions, covered by forest, and deforested. The detection of characteristics of texture scale variability was performed by using a methodology based on the application of the Continuous Wavelet Two-Dimensional Morlet's Transform. The results suggest the existence of possible preferential axes in the texture patterns of forested areas.

Moreover, differences are observed in the patterns of the scale variability of the texture in the areas covered by forest and deforested, which have presented distinct values of the scale variance and kurtosis, above a certain threshold length scale, for different horizontal axes defined on the satellite image.

**Keywords:** two-dimensional wavelet transform, Amazon forest, horizontal heterogeneity, remote sensing, satellite IKONOS, variability in scale texture.

## REFERÊNCIAS

- [1] M.O. Andreae et al. “Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in amazonia: the LBA-EUSTACH experiments”. *Journal of Geophysical Research*, **107**(d20) (2002).
- [2] J.P. Antoine, R. Murenzi, P. Vandergheynst & S.T. Ali. “Two-Dimensional Wavelets and their Relatives”, Cambridge University Press, Cambridge (2004).
- [3] S.P. Arya. “Introduction to Micrometeorology”, Academic Press, 307 pp., San Diego (1988).
- [4] G.P. Asner, M. Palace, M. Keller, R. Pereira Jr., J.N.M. Silva & J.C. Zweede. “Estimating Canopy Structure in an Amazon Forest from Laser Range Finder and IKONOS Satellite Observations”. *Biotropica*, **34**(4) (2002), 483–492.
- [5] D.D. Baldocchi & B.A. Hutchinson. Turbulence in an almond orchard: vertical variations in turbulent statistics. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **40** (1987), 127–146.
- [6] D.D. Baldocchi & T.P. Meyers. Turbulence structure in a deciduous forest. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **43** (1988), 345–364.
- [7] M. Claussen. The flow in a turbulent boundary layer upstream of a change in surface roughness. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **40** (1987), 31–86.
- [8] G. Frazer, M. Wulder & O. Niemann. “Simulation and quantification of the fine-scale spatial pattern and homogeneity of forest canopy structure: a lacunarity-based method design for analysis of continuous canopy heights”. *Forest Ecology and Management*, **214** (2005), 65–90.
- [9] J.R. Garratt. “The atmospheric boundary layer”, Cambridge University Press, Cambridge (1992), 316 pp.
- [10] J.H.C. Gash. Observations of turbulence downwind of a forest-heath transition. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **36** (1986), 227–237.
- [11] Y. Gefen, Y. Meir & A. Aharony. “Geometric implementation of hypercubic lattices with noninteger dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices”. *Physical Review Letters*, **50** (1983), 145–148.
- [12] G. Hurtt, X. Xiao, M. Keller, M. Palace, G.P. Asner, R. Braswell, E.S. Brondízio, M. Cardoso, C.J.R. Carvalho, M.G. Fearon, L. Guild, S. Hagen, S. Hetrick, B. Moore III, C. Nobre, J.M. Read, T. Sá, A. Schloss, G. Vourlitis & A.J. Wickel. “IKONOS imagery for the Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA)”. *Remote Sensing of Environment*, **88** (2003), 111–127.
- [13] B. Kruijt, Y. Malhi, J. Lloyd, A.D. Nobre, A.C. Miranda, M.G.P. Pereira, A. Culf & J. Grace. Turbulence Statistics Above and Within Two Amazon Rain Forest Canopies. *Boundary-Layer Meteorol.*, **94**(2) (2000), 297–331.

- [14] L. Jacques, A. Coron, P. Vandergheynst & A. Rivoldini. The YAWTB toolbox: Yet Another Wavelet Toolbox. <http://sites.uclouvain.be/ispgroup/yawtb>.
- [15] Y. Malhi & R.M. Román-Cuesta. “Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies”. *Remote Sensing of Environment*, **112** (2008), 2074–2087.
- [16] B. Marcolla, A. Pitacco & A. Cescatti. Canopy architecture and turbulence structure in a coniferous forest. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **108** (2003), 39–59.
- [17] A.P. Morse, B.A. Gardiner & B.J. Marshall. Mechanisms controlling turbulence development across a forest edge. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **103** (2002), 227–251.
- [18] A. Pagamisse. Discriminação de Texturas Pela Transformada Wavelet. UNICAMP. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Tese de Doutorado (2004).
- [19] M. Palace, M. Keller, G. Asner, S. Hagen & B. Braswell. “Amazon Forest Structure from IKONOS Satellite Data and the Automated Characterization of Forest Canopy Properties”. *Biotropica*, **40**(2) (2008), 141–150.
- [20] R. Plotnick, R. Gardner, W. Hargrove, K. Prestegard & M. Perlmutter. “Lacunarity analysis: a general technique for the analysis of spatial patterns”. *Physical Review E, Part B*, **53** (1996), 5461–5468.
- [21] C. Ricotta, M. Arianoutsou, R. Diaz-Delgado, B. Duguay, F. Llore, E. Maroudi, S. Mazzoleni, J.M. Moreno, S. Rambal, R. Vallejo & A. Vásquez. “Self-organized criticality of wildfires ecologically revisited”. *Ecological Modelling*, **141** (2001), 307–311.
- [22] G.J. Steeneveld, C.J. Nappo & A.A.M. Holtslag. Estimation of Orographically Induced Wave Drag in the Stable Boundary Layer during the CASES-99 Experimental Campaign. *Acta Geophysica*, **57**(4) (2009), 857–881, DOI: 10.2478/s11600-009-0028-3.