

Transição Floresta-Savana: Relação de variáveis ambientais e fitofisionomias

Jorge Alberto Bustamante Becerra¹
Emily Ane Dionizio da Silva¹
Suzana Maria Inácio de Carvalho¹
Iris Amati Martins¹
Denilson Ribeiro Viana¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Centro de Ciências do Sistema terrestre - CCST
Rodovia Presidente Dutra, km 40
Cachoeira Paulista - SP, Brasil
{jorge.bustamante, emily.silva, suzana.carvalho, iris.martins}@inpe.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
denilson.ribeiro@gmail.com

Resumo. A região de transição entre biomas, ecótono, caracteriza-se pela interação de variáveis bióticas e abióticas que influenciam a ocorrência das formações vegetais. Esta característica natural, além do intenso antropismo da região, torna difícil a caracterização das fitofisionomias que ocorrem na região. Neste sentido, o objetivo central foi determinar a relação das variáveis ambientais: precipitação e focos de calor; com o padrão de distribuição espacial das principais fisionomias vegetais da região de transição floresta - savana. A metodologia utilizada consiste na análise espacial e temporal das seguintes variáveis: precipitação, densidade de focos de queimadas e índice de vegetação (NDVI), usando seis transectos distribuídos de norte a sul na região de transição. Foram aplicadas técnicas de avaliação de séries temporais e finalmente análise multivariada para relacionar a influência das variáveis ambientais (precipitação e fogo) no padrão de distribuição espacial de quatro fitofisionomias (florestal, savânica-arbórea, arbustiva e herbácea) na região de transição Floresta- Savana. Os resultados obtidos permitiram caracterizar os padrões de distribuição espacial das fitofisionomias e das variáveis (precipitação, focos de calor e NDVI) ao longo da região de transição. A influência das variáveis ambientais na ocorrência das fitofisionomias é mais claro na região norte do que nas regiões central e sul da transição floresta - savana.

Palavras-chave: Áreas de transição, NDVI, precipitação, fogo e Sensoriamento Remoto.

Abstract: Ecotone, the region of transition between biomes, is characterized by the interaction of biotic and abiotic variables that influence the occurrence of the vegetation. This natural feature, besides the intense anthropogenic impacts in the region, complicates the identification of the vegetation types that occur in the region. In this sense, our goal was to determine the relationship of environmental variables: precipitation and fire (hotspots), with the pattern of spatial distribution of different vegetation types of the forest – savanna transition. The methodology consists of the spatial and temporal analysis of the following variables: precipitation, density of hotspots and vegetation index (NDVI), using six transects from north to south in the transition region. Time series and multivariate analysis techniques were used to assess and relate the influence of environmental variables (precipitation and fire) on the pattern of spatial distribution of four phytophysiognomies (evergreen trees, deciduous trees, shrubs and herbaceous) in the forest-savanna transition. The results allowed us to characterize the spatial distribution of four phytophysiognomies and to identify the pattern of the variables (precipitation, hotspots and NDVI) along the transition region. The influence of environmental variables on the occurrence of phytophysiognomies is clearer in the northern than in central and southern regions of the forest-savanna transition.

Key words: Transition areas, NDVI, precipitation, fire and Remote Sensing.

1. Introdução

Ecótonos são zonas de transição entre sistemas ecológicos adjacentes, com um conjunto de características definidas por escalas de espaço e tempo e pela força de interação entre estes sistemas (Holland *et al.*, 1991). Estas zonas contêm dimensões consideráveis, importantes e variáveis no que se refere ao encontro e interação entre os elementos bióticos e abióticos distintos, conferindo uma biodiversidade única, característica das regiões de transição.

O ecótono Amazônia - Cerrado, atualmente representa 4,85% do país (Filho, 2006), e é um dos que mais sofre com a ação humana, devido a sua grande exploração econômica.

A compreensão e a caracterização das áreas de ecótono Floresta Ombrófila - Savana, bem como o gradiente de fitofisionomias ao longo da faixa de transição, são fatores fundamentais para a compreensão da influência das variáveis ambientais na distribuição dos principais estratos fitofisionômicos que compõem os diferentes biomas ao longo do tempo. Neste sentido, avaliar o funcionamento e comportamento das fitofisionomias existentes nestas áreas contribui com informações que permitem uma análise da previsibilidade, vulnerabilidade e adaptabilidade, diante de questões como mudanças climáticas e mudanças de uso da terra (Tannus, 2004).

Estudos realizados apontam que a conversão de habitats naturais no Cerrado, adjacente ao Pantanal, tem resultado em processos erosivos severos, causando deposição de sedimentos nas depressões da planície e alterando os padrões do fluxo da água e os regimes hidrológicos (Harris *et al.*, 2005). Esta informação reitera a importância das inter-retro-relações existentes entre os biomas, bem como a importância dos processos bióticos e abióticos intrínsecos às áreas de transição.

Neste trabalho, utilizamos o termo Floresta Ombrófila para nos referir ao bioma Amazônico, considerado o maior bioma brasileiro, e Savana para o Cerrado e Pantanal, sendo o cerrado, um bioma de grande importância ecológica, tanto pela sua diversidade de fitofisionomias e de espécies, quanto pela alta taxa de desmatamento nos últimos anos (Myers *et al.*, 2000) e o Pantanal, um mosaico de ecossistemas terrestres, considerado a maior superfície inundável do mundo (Harris *et al.*, 2005), característico por guardar espécies de fauna e de flora endêmicas e influenciado por quatro biomas, a saber: Floresta Amazônica, Cerrado (predominante), Chaco e Floresta Atlântica (Adámoli, 1981).

As fitofisionomias utilizadas na classificação da transição são: arbóreos perenifólias (E1), arbóreos caducifólias (E2), arbustivos (E3) e estrato herbáceo (E4).

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a relação e influência das variáveis ambientais, precipitação e focos de calor, no gradiente de distribuição espacial das principais fitofisionomias de Cerrado (florestas arbóreas decíduas, perenes, arbustos e gramíneas) através do índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) na região de transição Floresta Ombrófila – Savana.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são caracterizar os padrões de sazonalidade das fitofisionomias, da precipitação e dos focos de calor que ocorrem na região de transição Floresta Ombrófila –

Savana, usando transectos distribuídos ao longo da região, e relacionar o grau de dependência dos padrões sazonais de cada fitofisionomia, com as variáveis ambientais (precipitação e focos de calor) na região de transição Floresta Ombrófila – Savana.

3. Materiais e Métodos

3.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde a uma região de transição Floresta Ombrófila – Savana, onde foram distribuídos seis transectos, cinco na transição Amazônia - Cerrado, e um na transição Cerrado - Amazônia - Cerrado - Pantanal, conforme ilustrado na **Figura 1**.

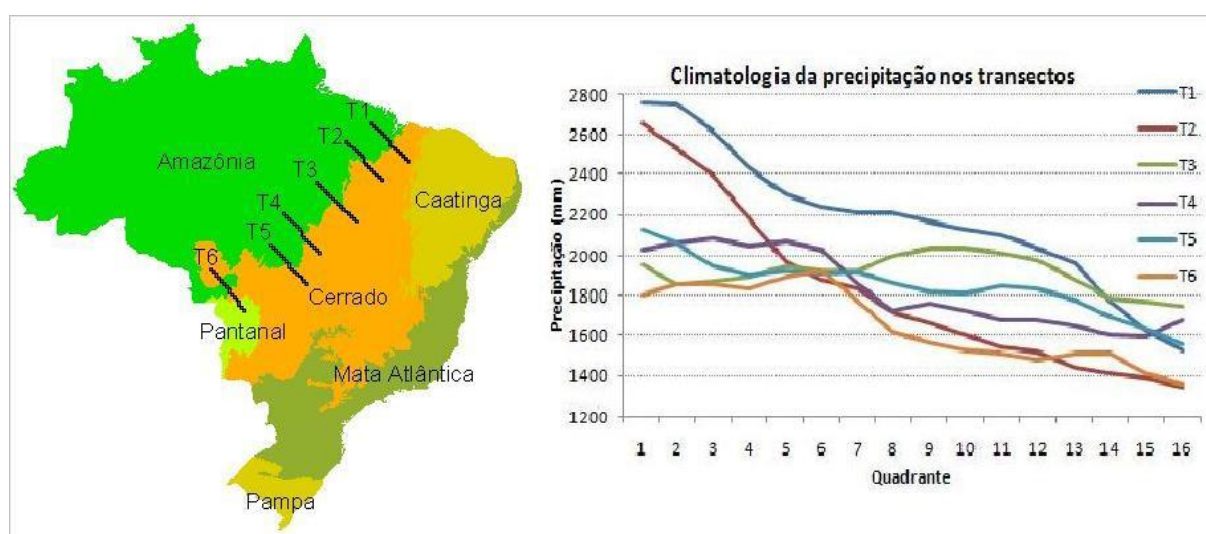


Figura 1. Representação dos seis transectos distribuídos arbitrariamente na área de estudo, transição Floresta Ombrófila – Savana e climatologia da precipitação nos transectos.

A região selecionada para estudo é caracterizada como zona de transição entre os Biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal. Com base na distribuição latitudinal, os transectos cobrem as regiões norte (T1 e T2), centro (T3 e T4) e sul (T5 e T6) da transição.

O cerrado é um bioma que apresenta uma elevada complexidade em sua formação vegetal, apresentando um mosaico de fitofisionomias, desde formações campestres (campo limpo), savânicas (campo sujo, campo cerrado e cerrado *sensu stricto*) até formações florestais (cerradão), florestas decíduas e matas de galeria. Possui clima estacional, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos classificado com (AW) segundo KÖPPEN (tropical chuvoso), com precipitação média anual de 1.500mm, variando de 750 a 2000 mm (Adámoli *et al.*, 1987) com grandes variações intra-regionais.

A Amazônia pode ser classificada como Floresta Tropical, Floresta Ombrófila ou Floresta Pluvial Perenifólia, caracterizada por pouca variação sazonal, elevadas taxas de precipitação e umidade relativa, composta por 83,78% de formações florestais que variam de florestas decíduas a florestas ombrófilas densas e abertas (Filho, 2006), e com precipitações médias de aproximadamente 2300 mm, embora tenham regiões (na fronteira entre Brasil e Colômbia e Venezuela) em que o total anual atinge 3500 mm (Moura, 2004).

O Pantanal é composto por quatro regiões fitoecológicas: Savana (Cerrado), Savana Estépica (Chaco), Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual, além de áreas de formações pioneiras, áreas de contatos florísticos e áreas de refúgios vegetacionais. No entanto, não se observam no Pantanal, grandes áreas contínuas de um único tipo de

vegetação (Silva *et al.*, 2007). O regime pluviométrico oscila entre 800 e 1400 mm/ano, sendo que 80% ocorrem entre os meses de novembro e março (Silva *et al.* 2000), definindo um clima sazonal como o que ocorre no Cerrado.

3.2 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram: a) Um banco de dados MODIS correspondentes ao período de 2000 a 2009, referentes ao produto MOD13Q1 (índices de vegetação); b) Dados de precipitação (PREC) obtidos do satélite TRMM e de estações de superfície da área de estudo no mesmo período de tempo (dados Merge), disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE e c) Dados de focos de calor (FC) obtidos a partir da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DSA/INPE. A resolução espacial dos dados de índice de vegetação e focos de calor é de 1 km e os de precipitação de 20 km.

3.3 Métodos

A metodologia consistiu na análise das variáveis ambientais e do índice de vegetação ao longo da área de transição Floresta Ombrófila - Savana. Assim, todas as variáveis foram padronizadas quanto à escala temporal, 16 dias (23 períodos por ano).

As imagens selecionadas para o estudo da vegetação pertencem ao índice de vegetação NDVI, para os anos 2002, 2005 e 2008. Estas imagens foram obtidas do sensor MODIS - a bordo da Plataforma Terra - disponíveis na internet (EOS Data Gateway-www.wist.echo.nasa.gov), e compõem o conjunto de quatro cenas (*tiles*), (h12v09, h12v10, h13v09 e h13v10), de cada período (16 dias).

Os *tiles* de NDVI foram unidos “mosaicados” e convertidos em formato GeoTiff. Foram realizadas a redução da radiometria, de 16 para 8 bits, e o empilhamento das imagens para obtenção de um dado multitemporal anual do NDVI. Neste dado, são distribuídos os seis transectos ao longo da transição, para extrair os valores de NDVI.

O comprimento do transecto é em média 320 km ao longo da região de transição, tendo início na região de floresta e o fim na savana. Cada transecto é formado por 16 quadrantes e o quadrante é composto por 20x20 pixels (400 pixels), sendo cada pixel igual a 1 km.

A caracterização dos estratos utilizados neste estudo foi feita através de métricas de fenologia, definindo os valores de NDVI para cada estrato fitofisionômico. Selecionamos a data 13/08/2002 (período 225 do MODIS) que corresponde à estação seca com menor contaminação por nebulosidade, para a caracterização espectral dos estratos da vegetação.

Os dados de focos de calor são produtos de vários satélites como NOAA, AQUA, TERRA, GOES, METEOSAT, e foram obtidos via download através do site da DSA/INPE <http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas>. Estes dados foram agrupados temporalmente (composições de 16 dias) para a região de interesse, transformados em densidades de calor e posteriormente empilhados anualmente.

Para a extração dos valores de NDVI e focos de calor, foi utilizada uma máscara com os estratos da vegetação. Os valores extraídos foram organizados de acordo com as coordenadas iniciais e finais de cada um dos quadrantes. Assim, obteve-se o número de aparições de cada estrato em cada quadrante e os valores médios de NDVI e focos de calor, para cada ano analisado.

Com base no número de aparições de cada estrato fitofisionômico, foram calculadas as proporções e as variações da vegetação ao longo de cada transecto. Por fim, elaborou-se a

média dos transectos de NDVI, FC e gradiente de distribuição dos estratos para os três anos, resultando na representação de um único ano médio para cada variável, em cada transecto.

Para análise da precipitação, elaborou-se a climatologia da região, caracterizando o padrão de distribuição pluviométrico. Esta climatologia foi obtida através de dados de precipitação diária do período 2000 – 2009 e ajustada à resolução temporal das outras variáveis.

A variabilidade espacial das variáveis foi analisada usando estatísticas descritivas e modelos de regressões para determinar a influência das variáveis independentes (precipitação e focos de calor) na variável dependente (vegetação, derivada do NDVI).

4. Resultados e Discussões

O padrão de distribuição espacial dos estratos fitofisionômicos ao longo da área de transição encontra-se representado pela **Figura 2**. Esta representação foi gerada a partir da média dos padrões encontrados para os seis transectos traçados ao longo da área de transição.

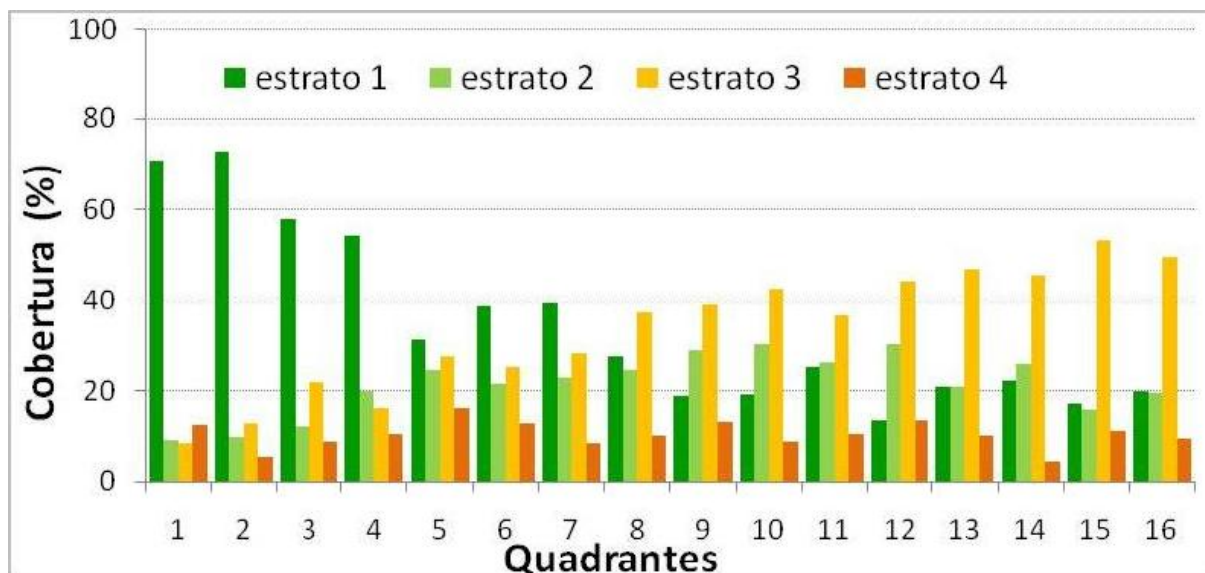


Figura 2. Distribuição espacial dos estratos fitofisionômicos ao longo do transecto médio da transição Floresta Ombrófila - Savana.

Na **Figura 2**, o E1 tende a diminuir ao longo do transecto, contrariamente ao E3, retratando diferenciação dos tipos fitofisionômicos, que passam de uma formação florestal, para uma formação savânica. Para o E4, encontramos baixas proporções ao longo do transecto, que de maneira geral, não apresentam alta variabilidade. No entanto, para o E2, encontramos um leve aumento na região intermediária do transecto, a qual possivelmente está associada ao encontro dos dois biomas analisados.

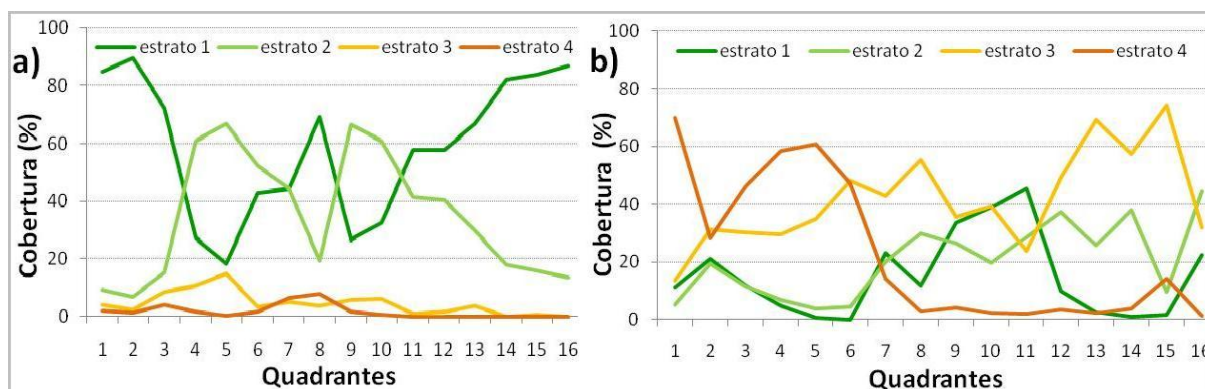


Figura 3. Representação dos padrões de distribuição espacial dos transectos T1 (a) e T6 (b).

As análises do padrão de distribuição dos estratos fitofisionômicos, ao longo dos transectos individuais, revelaram que alguns transectos como T1 e T6 (Figuras 3a e 3b), apresentam características específicas distintas dos demais. O fato dos dois transectos localizarem-se nos extremos das zonas de transição (Norte e Sul) confere diferenças climatológicas das encontradas na parte central do ecótono analisado. Outro fator determinante no padrão retratado por T6 é o encontro dos biomas Cerrado - Amazônia - Cerrado - Pantanal, característico deste transecto.

No T1, ilustrado na **Figura 3**, encontramos o predomínio das fitofisionomias arbóreas (E1 e E2) ao longo de todo transecto, com baixas proporções das fisionomias E3 e E4, o que possivelmente está relacionado às altas taxas pluviométricas encontradas no Norte da região de transição. Para o T6, transição entre três biomas distintos, Cerrado - Amazônia - Cerrado - Pantanal, encontramos o predomínio do E4 no início do transecto, característica do bioma Cerrado. Posteriormente, temos E1 e E2, fitofisionomias características de vegetações florestais (Amazônia), que diminuem dando lugar a E3, característica dos biomas Cerrado e Pantanal. A acentuada taxa de diminuição do E4 a partir do bioma Amazônico pode estar associada a mudanças do uso da terra, ou possíveis áreas antropizadas.

Na **Figura 4a**, os valores medianos e os limites máximos e mínimos para NDVI revelam que a representação do E1 ao longo da transição, apresentou uma baixa variabilidade, apresentando a tendência em diminuir na transição Floresta Ombrófila - Savana. Para o E3, os maiores valores (extremos) são encontrados na região de Floresta, tendendo a diminuir os valores de NDVI para a região de Savana, ou seja, observamos uma maior variação dos dados. Ao analisar o E4, percebemos que os quatro primeiros quadrantes apresentam altos valores de NDVI. Porém, o E4 é um estrato gramíneo - herbáceo caracterizado pela faixa de valores de NDVI de 100 - 174, o que torna possível inferir sobre a provável contaminação dos pixels destes quadrantes por nebulosidade, ou mudanças no uso da terra.

Em suma, na **Figura 4a**, podemos observar a tendência dos quadrantes próximos à região amazônica, em apresentar maiores valores de NDVI nos quatro estratos analisados, possivelmente devido às condições climáticas e principalmente pelas chuvas.

Na análise da variação da ocorrência dos focos de calor para cada tipo fitofisionômico ao longo da transição (**Figura 4b**), fica nítido que as maiores variações (valores extremos), encontradas estão associadas ao início dos transectos, região de floresta. Observa-se que para E1 e E2 existe uma tendência crescente com picos de incidência de focos de calor na região intermediária do transecto. Para E3 e E4, verifica-se que nos últimos quadrantes há um aumento tanto dos valores médios quanto extremos, embora já existam maiores variações na região da Savana.

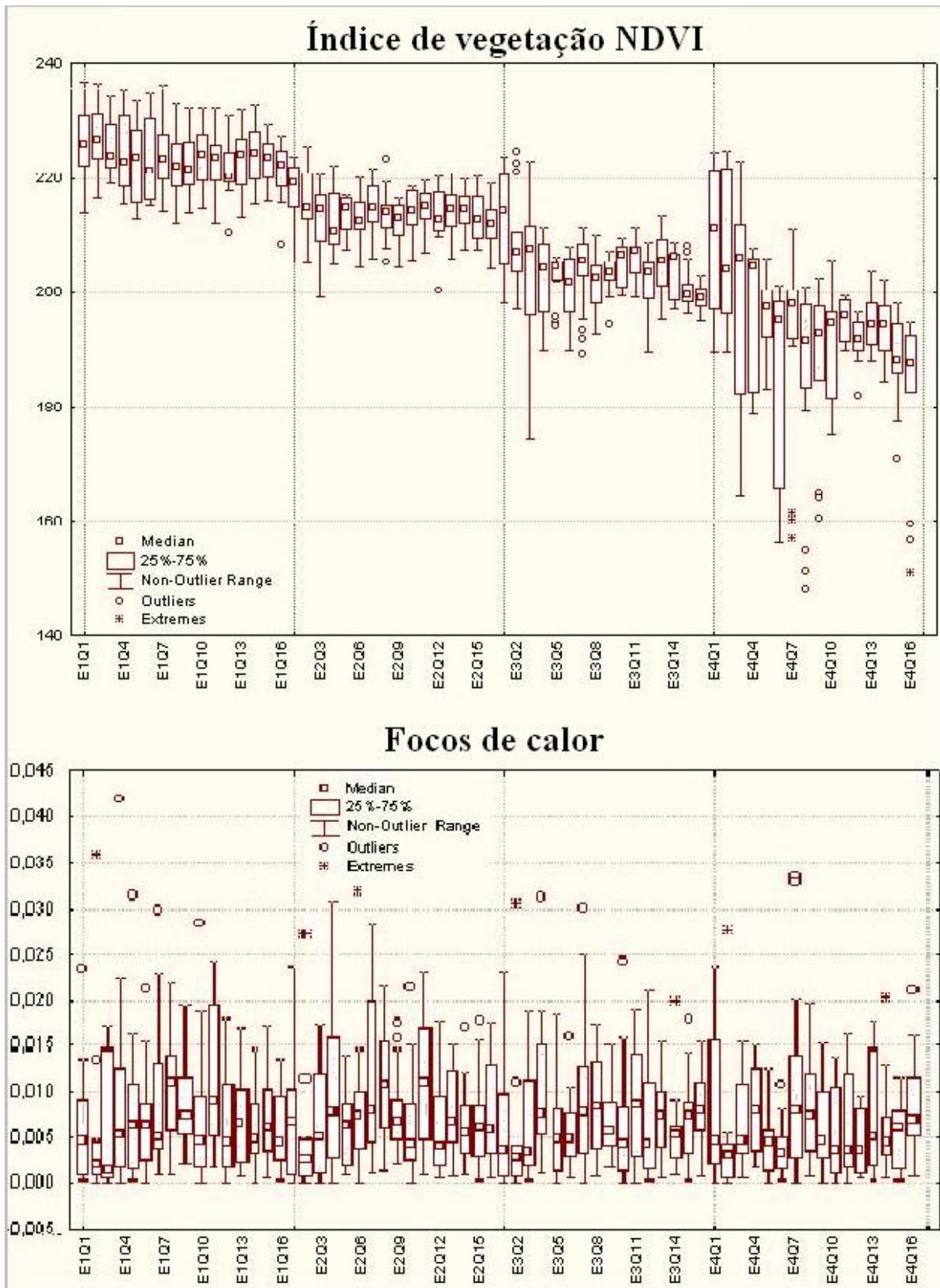


Figura 4. Análise da dinâmica da vegetação (a) e da ocorrência de focos de calor (b) ao longo do transecto de transição Floresta Ombrófila - Savana, para os quatro estratos fitofisionômicos. Cada intervalo é representado por um estrato fitofisionômico: E1, E2, E3 e E4.

Estes resultados permitem verificar a tendência de transição, que segue um gradiente de tipos fitofisionômicos Florestais para Savânicos.

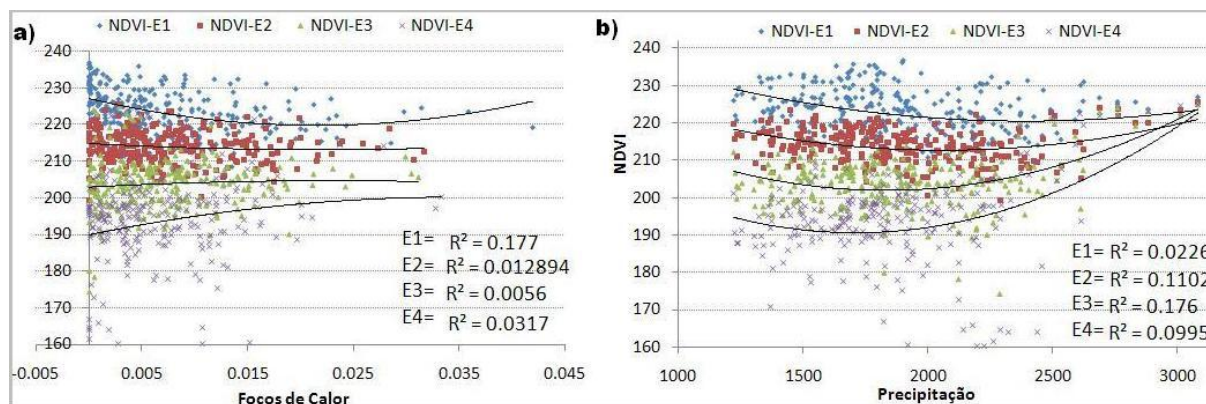


Figura 5. Análise de regressão entre as variáveis NDVI e Precipitação (a), e NDVI e Focos de Calor (b) para a área de transição Floresta Ombrófila - Savana;

A análise de regressão entre as variáveis NDVI e PREC, e NDVI e FC revelaram que de maneira geral os estratos fitofisionômicos encontram-se bem representados pelos intervalos de NDVI, definidos na metodologia. Os estratos que apresentaram maiores correlações com o aumento da precipitação foram E2 e E3, e os que apresentaram maiores correlações com o aumento dos focos de calor foram o E1 e E4. A complexidade das relações encontradas está relacionada ao fato de que estamos analisando uma região de transição entre biomas, onde existem climatologias e fitofisionomias distintas, isto pode explicar o porquê dos gradientes de precipitação e de densidade de focos de calor não explicarem o desenvolvimento da vegetação ao longo dos transectos.

Os resultados da análise de correlação dos estratos para cada transecto encontram-se descritos na **Tabela 1**.

Embora os valores de correlação encontrados tenham sido baixos, observou-se que em termos gerais, os T1 e T2 foram os transectos que apresentaram maiores correlações. A análise do T1 permitiu verificar que o NDVI para todos os estratos apresentou correlação significativa com as variáveis PREC e FC ao longo da transição. Na relação do NDVI e PREC, observou-se que em geral todos os estratos respondem ao aumento da precipitação, principalmente o E4, que obteve maior R no T1, retratando a maior relação com esta variável. Para a correlação do NDVI_FC, verifica-se que, o maior valor de R encontra-se no E3. Nos transectos T4, T5 e T6, verifica-se que os valores de R apresentam-se baixos devido à influência de valores *outliers*, que distorcem as tendências gerais da resposta da vegetação frente às variáveis climáticas. As correlações para FC e PREC, apresentaram altos valores de R, nos transectos T1, T2 e T3, tendo o maior valor de R para o E4, isto significa uma associação entre alta precipitação e baixa densidade de focos de calor, e vice-versa.

Tabela 1. Tabela de correlações entre as variáveis analisadas para cada transecto e cada estrato na área de transição entre os biomas estudados

	NDVI_PREC						NDVI_FC						FC_PREC					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6
E1	0.35	0.30	0.18	0.05	0.00	0.12	0.15	0.23	0.02	0.16	0.10	0.07	0.31	0.17	0.29	0.00	0.11	0.15
E2	0.43	0.21	0.15	0.02	0.29	0.13	0.22	0.18	0.04	0.11	0.03	0.01	0.25	0.16	0.26	0.00	0.03	0.11
E3	0.48	0.33	0.16	0.06	0.08	0.11	0.30	0.22	0.02	0.16	0.02	0.11	0.34	0.14	0.24	0.00	0.09	0.07
E4	0.50	0.58	0.14	0.08	0.01	0.08	0.05	0.09	0.09	0.12	0.03	0.04	0.08	0.09	0.35	0.05	0.03	0.04

5. Conclusões e Sugestões

A região de transição é complexa quanto à relação das variáveis ambientais, precipitação e focos de calor, com a vegetação. Na região norte da transição (T1 e T2) a precipitação e os focos de calor influenciam no desenvolvimento da vegetação nos quatro estratos fitofisionômicos analisados. Na região central (T3 e T4) e sul (T5 e T6) da transição a tendência é semelhante porém estatisticamente menos consistente. O que significa que nas regiões centro e sul existem valores *outliers* que distorcem as tendências gerais e que precisaria de um pós-processamento para exclusão desses valores.

A utilização de transectos para analisar a dinâmica da vegetação em uma ampla faixa de transição Floresta-Savana, se mostrou eficaz, pois esta metodologia foi capaz de capturar o gradiente de fitofisionomias em resposta as variações das variáveis ambientais (PREC e FC) nesta região de forma adequada.

Através das análises feitas neste trabalho foi possível caracterizar os padrões de distribuição espacial das fitofisionomias e das variáveis PREC e FC na região de transição, embora as correlações obtidas entre as variáveis de estudo tenham apresentado valores baixos, foram capazes de detectar as relações existentes. Contudo, há outros fatores que devem ser considerados e que são importantes para uma melhor compreensão das relações e padrões complexos existentes em regiões de transição, como o ecótono de Floresta-Savana.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização das imagens de confiabilidade do sensor MODIS (*pixel reliability*), para a validação dos dados utilizados, e a incorporação das mudanças no uso da terra, fatores essenciais na análise do índice de vegetação NDVI.

4 Referências

Adámoli, J. O Pantanal e suas relações fitogeográficas com os Cerrados. Discussão sobre o conceito de “Complexo do Pantanal”. In: Anais do XXXII Congresso Nacional de Botânica. PP. 109- 119. Sociedade Brasileira de Botânica, Teresina, Brasil.

Adámoli, J.; Macedo, J.; Azevedo, L.G. de; Madeira Neto, J. da S. Caracterização da região do cerrado. In: GOEDERT, W.J. (Ed.). Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. Planaltina: Embrapa-CPAC; São Paulo: Nobel, 1987.

Filho, J.C.M. Livro de ouro da Amazônia. 5°.ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2006 ISBN 978-85-00-02161-9

Fish, G.; Marengo, J.A.; Nobre, C.A. Clima da Amazônia. Disponível em: <http://www.unifap.br/ppgbio/doc/Clima%20da%20Amazonia.pdf> Acesso em: 01 de julho de 2010

Myers, N., Mittermeier, R.A.; Mittermeier, C. G.; Fonseca, G.A.B. da; and Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403 , vol 24: 853- 858, 2000.

Silva, J. S. V.; Abdon, M.M.; Pott, A. Cobertura vegetal do Bioma Pantanal em 2002. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 23, 2007, Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Cartografia, 23. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2007. v. CD-ROM. p. 1030-1038.

Silva, M. P. da; Mauro, R.; Mourão, G.; Coutinho, M. Distribuição e quantificação de classes de vegetação do Pantanal através de levantamento aéreo. *Rev. bras. Bot.* [online]. 2000, vol.23, n.2, pp. 143-152. ISSN 0100-8404.

Tannus, R N. Funcionalidade e sazonalidade sobre Cerrado e sobre ecótono Floresta-Cerrado : uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂, 2004. 92.p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas-) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

Harris, M.B.; Tomas, W.M.; Mourão, G.; Silva, C.J.da.; Guimarães, E. Sonoda, F.; Fachim, E. Desafios para proteger o Pantanal Brasileiro: Ameaças e iniciativas de conservação. *Ver. Megadiversidade*. 2005, vol.1, n1, PP 153-163.