

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/4, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais: 791-805
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS SAZONAIS E SUBSAZONAIS ASSOCIADAS AOS INCÊNDIOS DE 2005 NO ACRE

*Sub-Seasonal to Seasonal Climate Characteristics Associated to
the 2005 Fires in the Acre State*

**Christopher Alexander Cunningham¹, Liana O. Anderson^{1,2},
Foster Brown^{3,4} & Vera Reis⁵**

¹Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN

Coordenação-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento

Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500,
São José dos Campos - São Paulo, Brasil, 12247-016
{christopher.castro, liana.anderson}@cemaden.gov.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR / Tropical Ecosystems and Environmental Sciences Laboratory - TREES
Av dos Astronautas, 1.751. Jd. Da Granja, São José dos Campos, São Paulo, Brazil, 12227-010

³Woods Hole Research Center

149 Woods Hole Road, Falmouth, MA 02540-1644, Estados Unidos
fbrown@whrc.org

⁴Universidade Federal do Acre - UFAC

Pos-graduação em Ecologia e Manejo Florestal

Campus Universitário - BR 364, Km 04 - Distrito industrial - Rio Branco – Acre, Brasil, CEP: 69.920-900

⁵Instituto de Mudanças Climáticas e Regulação dos Serviços Ambientais – IMC

R. Rui Barbosa, 751, Rio Branco – Acre, Brasil
vlreis.ac@uol.com.br

Recebido em 18 de Novembro, 2015/ Aceito em 26 de Março, 2017

Received on November 18, 2015/ Accepted on March 26, 2017

RESUMO

Este estudo teve por objetivo detalhar aspectos climáticos relacionados ao período de seca que acarretou nos grandes incêndios ocorridos no Acre, durante a estação seca (junho a setembro) de 2005. Um aspecto original deste estudo foi a avaliação da variabilidade climática sub-sazonal. A avaliação dos padrões anômalos de variáveis climáticas relevantes mostrou que associações consistentes entre a superfície e a atmosfera determinaram a severidade da estiagem de 2005. Primeiro, houve um pré-condicionamento dado que a estação chuvosa imediatamente anterior (2004-2005) foi deficiente. Segundo, os volumes de precipitação durante a estação seca de 2005 foram irrisórios, com a maior parte do estado experimentando menos de 50% da chuva esperada na estação, e algumas regiões, principalmente no leste acreano, com menos de 25%. Em uma perspectiva histórica, a estação seca de 2005 classificou-se como a menos chuvosa na série 1998 a 2014. Considerando-se uma média para toda a estação seca, a umidade relativa do ar apresentou anomalias

negativas, devido a um transporte anômalo, contrário ao fluxo climatológico, de ar mais seco das latitudes mais ao sul para o sudoeste da Amazônia. De forma consistente com o déficit de umidade na atmosfera, a umidade do solo (modelo de balanço hídrico) também apresentou anomalias negativas durante a estação seca de 2005. O panorama sazonal de anomalias negativas de umidade relativa, foi resultante de dois ciclos sub-sazonais nos quais a umidade relativa do ar apresentou declínio acentuado e posterior recuperação, intercalados por um período de aproximadamente 20 dias de relativa normalidade. Em cada um destes ciclos foram atingidos valores mínimos extremos (inferiores a 1% dos mínimos da série de 1998 a 2014). Estes mínimos extremos de umidade relativa aparentam estar associados a condições mais persistentes de estiagem, condições estas que são sucedidas por um aumento de queimadas e/ou maior alastramento de incêndios. Os dois ciclos sub-sazonais mostraram associação com os movimentos de subsidência atmosférica de grande escala. Este mecanismo de subsidência mostrou-se associado com pulsos de atividade inibidora intensificada que se propagaram do Oceano Pacífico para a região do estado do Acre, de forma análoga à Oscilação de Madden-Julian.

Palavras-chave: Seca, Acre, Variabilidade Subsazonal, Amazônia, Incêndios Florestais.

ABSTRACT

This study aimed to detail climatic aspects related to 2005's drought in Acre, which resulted in large fires during the dry season (June-September). A unique aspect of this study was to evaluate the sub-seasonal climate variability. The evaluation of anomalous patterns of relevant climate variables showed consistent associations between the surface and the atmosphere that determine the severity of the drought of 2005. First, there was a certain preconditioning due to deficiency during the preceding rainy season. Second, the volume of precipitation during the dry season 2005 were insignificant, with most of the state experiencing less than 50% of the expected rain season, and some regions, especially in eastern Acre, less than 25%. In a historical perspective, the dry season of 2005 was ranked as the least rainy in the series 1998 to 2014. Considering an average for the whole dry season, the relative humidity had negative anomalies, due to anomalous transport of drier air from southerly latitudes to the southwest of the Amazon, in opposition to the climatologically expected flow. Consistent with the moisture deficit in the atmosphere, soil moisture (water balance model) also showed negative anomalies during the dry season of 2005. The seasonal outcome of negative anomalies of relative humidity, was the result of two sub-seasonal cycles in which the relative humidity registered a sharp reducing and subsequent recovery, separated by a period of about 20 days of relative normality. In each of these cycles the relative humidity dropped to minimum extreme values (less than 1% of the minima of the 1998 to 2014 series). These extreme minima in relative humidity appear to be associated with more persistent drought conditions, conditions which are succeeded by an increase of burning and/or larger fire spread. The two sub-seasonal cycles were associated with large scale subsidence. This subsidence mechanism was associated to pulses of enhanced inhibitory activity that propagated from the Pacific Ocean to the Acre region, analogous to the Madden-Julian Oscillation.

Keywords: Drought, Acre State, Sub-seasonal Variability, Amazon, Forest Fires.

1. INTRODUÇÃO

Em 2005, durante a estação seca do sudoeste da Amazônia, incêndios massivos destruíram mais de 300 000 hectares de florestas na Amazônia Ocidental (BROWN *et al.*, 2006). No Estado do Acre, estima-se que mais de 2.800 km² de florestas e cerca de 3.700 km² de áreas produtivas queimaram durante a seca de 2005 (SHIMABUKURO *et al.*, 2009). As queimadas que ocorrem regularmente nesta época do ano, como forma de preparar o solo para plantio, fugiram ao controle, gerando incêndios que resultaram em uma catástrofe ambiental nesta região sem precedentes nas últimas décadas. O sudoeste da Amazônia foi o epicentro da seca, especialmente a parte leste do Acre (LEWIS *et al.*, 2011), que foi impactado por queimadas e

incêndios florestais intensos (BROWN *et al.*, 2006; ARAGÃO *et al.*, 2007, VASCONCELOS *et al.*, 2009).

Cinco anos depois, em 2010, a Amazônia foi atingida por uma segunda grande seca, ainda mais severa que a de 2005 (MARENGO *et al.*, 2011). Ou seja, nos últimos dez anos, o Acre figurou entre a área considerada epicentro de duas secas prolongadas no sudoeste da Amazônia, em 2005 e 2010, promovendo, entre outros aspectos uma queda na produção primária devido ao aumento de mortalidade de árvores (PHILLIPS *et al.*, 2009), transformando as florestas locais, de um sumidouro de carbono para uma fonte de carbono. O fogo acompanhou as secas em 2005 e 2010 com impactos severos nas áreas agrícolas e florestas tropicais (BROWN *et al.* 2011).

A severidade destes incêndios esteve diretamente relacionada às condições de seca que precederam e predominaram durante a estação seca de 2005 (MARENGO *et al.*, 2008a; MARENGO *et al.*, 2008b). As secas na Amazônia tem sido atribuídas aos padrões de grande escala de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Pacífico (e.g., ROPELEWSKI & HALPERT, 1987; MARENGO, 1992) e Atlântico (MARENGO *et al.*, 2008a), a intensificação da circulação atmosférica de Walker com resfriamento da TSM no leste do Pacífico (MCGREGOR *et al.*, 2014), e processos atmosféricos de convecção profunda (TAN *et al.*, 2015), sendo que estes processos não são mutuamente exclusivos.

Estudos como estes citados acima tem como objetivo avaliar uma estação (e.g., seca ou chuvosa) como um todo, portanto, fazem uso de variáveis climáticas agrupadas em valores médios mensais ou trimestrais (sazonais). Porém, flutuações climáticas importantes podem ocorrer também em escalas sub-sazonais. A escala sub-sazonal tem sido pouco estudada e compreende fenômenos climáticos além das previsões de tempo (até 10 dias) e aquém das previsões climáticas sazonais (3 meses).

A variabilidade sub-sazonal pode modular de maneira significativa a distribuição espacial e temporal de eventos de extremos meteorológicos. Um exemplo bem documentado deste tipo de modulação foram as inundações do Paquistão, ocorridas em 2010. Durante a estação de monção de 2010 um evento chuvoso intenso de curta duração (4 dias) atingiu o norte do Paquistão, resultando em inundações catastróficas, perdas de vidas e de propriedade, além de uma crise na agricultura que perdurou por anos. No total, o custo deste desastre natural foi estimado em 40 bilhões de dólares (WEBSTER *et al.*, 2011).

Como era de se esperar, o Brasil também apresenta exemplos nos quais desastres naturais ocorreram como resultado da variabilidade nesta escala de tempo. Um dos mais recentes, e ainda pouco estudado, ocorreu nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, durante o período de monção 2013-2014 (CEMADEN, 2015). A ocorrência de um veranico estendido, que perdurou por até quarenta dias, durante os meses de janeiro e fevereiro, trouxe grandes prejuízos aos recursos hídricos da nação e aos setores ligados a estes

recursos (agricultura, geração de energia elétrica, hidrovias, etc).

O objetivo principal deste estudo é revisitar os aspectos predominantes do clima que estiveram associados a um ambiente favorável à ocorrência dos grandes incêndios observados durante a estação seca de 2005, com enfoque no estado do Acre. Ainda, este estudo busca lançar um novo olhar sobre a questão climática associada aos incêndios de 2005 no Acre, ao avaliar o cenário climático do ponto de vista das variações sub-sazonais

As questões que este estudo se propõe a investigar são: (i) Quais eram as configurações atmosféricas regionais predominantes durante o período dos grandes incêndios de 2005 no Acre, quando comparadas aos padrões médios (ii) Quais variáveis de condições climáticas estão associadas ao aumento de susceptibilidade da propagação do fogo revelado pelo extremo incremento no número de queimadas de julho para agosto? (iii) Há indícios de variabilidade sub-sazonal associada à grande seca de 2005 no estado do Acre?

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A precipitação é certamente uma das variáveis climáticas mais importantes. A sua distribuição temporal e espacial afeta diversos processos físicos e biológicos, incluindo, a ocorrência de queimadas e incêndios. Justamente devido a esta grande variabilidade espacial e temporal a precipitação é umas das variáveis mais difíceis de ser estimada ou prevista. Tradicionalmente, a precipitação é medida através do uso de pluviômetros, que embora ofereçam uma boa discriminação temporal, como no caso dos sistemas automáticos, não satisfazem a necessidade de uma boa cobertura espacial.

Uma alternativa que tem sido amplamente utilizada nas últimas décadas são as estimativas de precipitação por satélite. Apesar de haver ressalvas em relação à precisão dos montantes de chuva estimados (e.g., ANDERSON *et al.*, 2013), estes produtos de sensoriamento remoto são boas opções para avaliar padrões espaciais de precipitação, principalmente em regiões onde a distribuição dos pluviômetros não ocorre de forma homogênea. A região sudoeste da Amazônia (Amazônia Ocidental) configura uma destas regiões onde os pluviômetros não apresentam

uma cobertura espacial adequada. No Acre, por exemplo, tem-se um pluviômetro a cada 76 mil quilômetros quadrados (DUARTE *et al.*, 2006).

Assim para avaliar padrões de distribuição geográfica da precipitação e compor uma média de longo termo (1998-2014), neste trabalho foram utilizados os dados de precipitação MERGE (ROZANTE *et al.*, 2010). Este conjunto de dados consiste na combinação de estimativas de precipitação por satélite da Missão de Estimativa de Chuva Tropical (TRMM, na sigla em inglês) com observações de superfície recebidas no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Esta análise de precipitação foi criada com o objetivo de minimizar problemas oriundos de interpolação em regiões com baixa densidade de observações - como é o caso do estado do Acre, bem como as super e sub-estimativas nos produtos do TRMM.

Em estudos sobre variabilidade climática é comum fazer uso de conjuntos de dados chamados de reanálises. Uma reanálise do clima fornece uma descrição quantitativa do clima global recente, ao combinar observações com modelos numéricos da atmosfera, oceano e superfície continental.

Neste trabalho, as condições atmosféricas da circulação de grande escala relacionadas à grande seca e incêndios de 2005 foram avaliadas usando as reanálises ERA Interim do Centro Europeu para Previsão de Médio Prazo (ECMWF, na sigla em inglês).

Deste conjunto, foram utilizadas as variáveis temperatura do ar a 2 metros (t2m) e temperatura do ponto de orvalho a 2 metros (d2m) para o cálculo da umidade relativa do ar (UR). As equações utilizadas para o cálculo da umidade relativa são:

$$e = 6,112e^{17,67\left(\frac{t2m}{t2m+243,5}\right)} \quad (1)$$

$$e_s = 6,112e^{17,67\left(\frac{d2m}{d2m+243,5}\right)} \quad (2)$$

$$UR = 100\frac{e}{e_s} \quad (3)$$

Deste conjunto de dados também

foram utilizados dados da integral na coluna atmosférica do transporte horizontal no sentido leste e no sentido norte do fluxo de vapor de água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$). As equações abaixo descrevem estes fluxos respectivamente:

$$\frac{1}{g} \int_0^1 uq \frac{\partial p}{\partial \eta} d\eta \quad (4)$$

$$\frac{1}{g} \int_0^1 vq \frac{\partial p}{\partial \eta} d\eta \quad (5)$$

onde g é a constante da gravidade, u é a componente zonal (paralela às latitudes) do vento, v é a componente meridional do vento (paralela às longitudes), q é a umidade específica, p é a pressão atmosférica e η é a coordenada vertical do modelo.

Para avaliar as condições de umidade do solo foram utilizados dados de um modelo de balanço hídrico criado pelo CPTEC/INPE (ROSSATO *et al.*, 2004). O balanço hídrico contabiliza, até a profundidade explorada pelas raízes, todos os fluxos positivos (entrada de água no solo) e negativos (saída de água do solo). Tais fluxos decorrem de trocas com a atmosfera (precipitação, condensação e evapotranspiração) e do próprio movimento da água entre os diferentes perfis do solo.

Foram utilizados também dados diários de temperatura máxima do ar (TMAX), umidade relativa (UR) e precipitação (PREC) da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Rio Branco.

Os focos de calor foram contabilizados através dos satélites TERRA e AQUA para o período 2001 a 2014, disponibilizados no portal de Monitoramento de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Os métodos utilizados neste estudo foram métodos simples que evidenciam a variabilidade e as características anômalas das variáveis estudadas. Na etapa de avaliação das características sazonais, primeiro calculou-se a média no período de 1998 a 2014 para servir como referência. Então calculou-se a anomalia média durante a estação (sazonal). As avaliações durante a etapa de variabilidade sub-sazonal fizeram uso de avaliações de séries temporais, compostos e diagrama longitude x tempo.

2.1 Divisão política no estado do Acre

O Estado do Acre apresenta 22 municípios distribuídos em duas mesorregiões político-administrativas (Vale do Acre e Vale do Juruá) e cinco regionais de desenvolvimento (Cruzeiro do Sul, Tarauacá, Sena Madureira, Brasiléia e Rio Branco) (Figura 1), que seguem a distribuição das bacias hidrográficas dos principais rios.

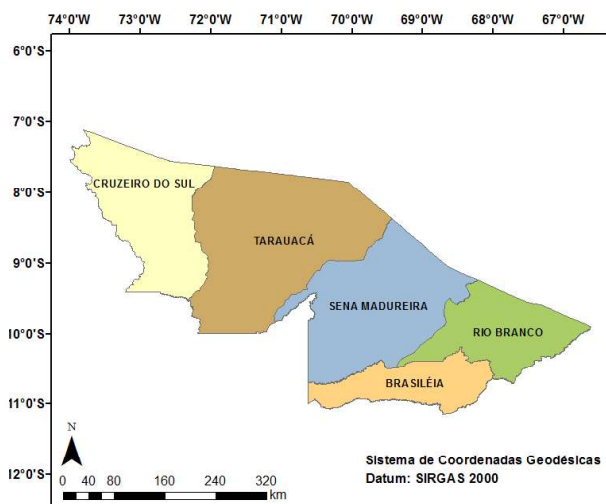


Fig. 1 – Área de estudos, mostrando as regionais de desenvolvimento no Estado do Acre.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta e discute os principais padrões atmosféricos anômalos associados à seca de 2005, nas escalas sazonal e subsazonal. Tem por objetivo também explorar potenciais conexões entre estes padrões e a proliferação extraordinária de focos de calor no estado.

3.1 Avaliação da precipitação sobre o estado do Acre

O regime climático das chuvas no estado do Acre apresenta duas estações distintas: uma seca, chamado verão Amazônico, que geralmente ocorre entre os meses de maio e setembro, e uma chuvosa, entre os meses de outubro e abril (MACÊDO *et al.*, 2013).

Este ciclo marcadamente sazonal é característico do chamado regime de monção da América do Sul, de forma semelhante ao que ocorre na região Sudeste do Brasil. Uma característica deste tipo de regime chuvoso é a proporção desigual dos volumes de chuva registrados durante a estação chuvosa e durante a estação seca. Na região Sudeste o período chuvoso de setembro

a fevereiro (SONDJF), contribui com 70% da precipitação total anual (RAO *et al.*, 1996). De forma semelhante, os presentes resultados mostram que, no estado do Acre, o período chuvoso (outubro a abril) contribui com aproximadamente 80% do volume total anual (Figura 2).

A Figura 2 mostra a representação do regime anual de chuvas no estado do Acre a partir das análises de precipitação MERGE. O ciclo anual apresentado pelos dados MERGE corrobora com os resultados de Macêdo *et al.* (2013), indicando que os meses mais chuvosos são dezembro, janeiro, fevereiro e março, com um mínimo relativo apresentado durante fevereiro, e um período mais seco que abrange os meses de maio a setembro. Na Amazônia, o comprimento da estação seca pode ser determinado pelo número de meses para os quais o acumulado mensal de precipitação é inferior a 100 mm (SOMBROEK, 2001). Este limiar está associado à aproximação que florestas tropicais possuem uma evapotranspiração de aproximadamente 100 mm/mês, medido através de dados observacionais de campo (SHUTTLEWORTH 1989, DA ROCHA *et al.*, 2004, VON RANDOW *et al.*, 2004). Entre setembro e outubro é quando ocorre um rápido incremento das precipitações, marcando a transição entre as estações seca e chuvosa.

O ciclo de 2005 (Figura 2) apresentou chuvas abaixo da média durante os meses de janeiro e março da quadra chuvosa. Em fevereiro, a presente análise aponta para um quadro de chuvas acima da média, de forma geral no estado do Acre. Marengo *et al.* (2008) usaram dados interpolados de precipitação sobre a Amazônia, incluindo dados dos serviços meteorológicos do Peru e Bolívia, para avaliar o padrão das anomalias de chuva durante a seca de 2005. Seus resultados concordam com os presentes resultados, ao indicar que durante a quadra chuvosa (Dezembro de 2004 a Março de 2005), sendo que fevereiro foi um mês com ampla distribuição de anomalias positivas no sudeste da Amazônia, incluindo o estado do Acre (ver Figura 1d de MARENGO *et al.*, 2008).

Durante os meses de transição, abril e outubro, os totais pluviométricos foram muito próximos dos valores climatológicos. No entanto, a estação seca foi deficiente como um todo, isto é, todos os meses apresentaram

anomalias negativas de precipitação. Dentro da série histórica considerada (1998 a 2014), o ano de 2005 praticamente configura o limite inferior dos totais mensais de precipitação durante a estação seca, ou seja, foi a estação seca mais severa ocorrida neste período.

Marengo *et al.* (2008) argumentaram que a duração da estação seca em 2004 foi maior do que em um ano normal, conforme detectado pelos registros de precipitação em Rio Branco. Porém, esta indicação pode não ser representativa de todo o estado, conforme sugerem os resultados deste estudo. Quando se considera uma média da precipitação no estado verifica-se que a estação seca em 2004 iniciou em maio e não se prolongou além de setembro; em outubro choveu em média 200 mm em todo o estado, portanto acima do limiar de 100 mm, que determina, a grosso modo, a duração da estação seca (SOMBROEK, 2001).

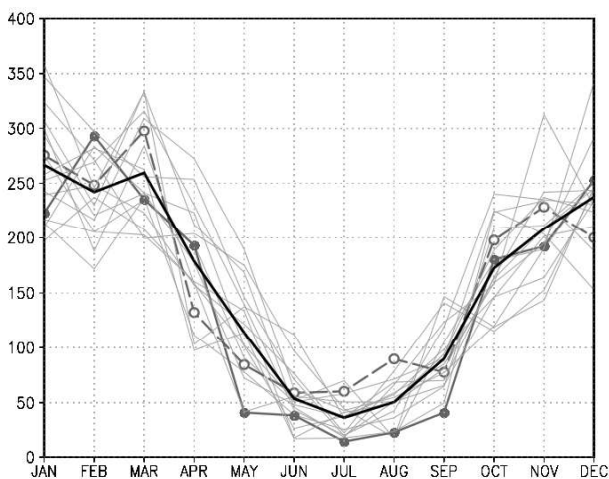


Fig. 2 - Ciclo anual da precipitação acumulada mensal (mm/mês), média sobre o estado do Acre. A linha tracejada (contínua) com círculos abertos (fechados) indica o ciclo de precipitação registrado durante 2004 e (2005), respectivamente. A linha em negrito indica a média de longo termo (1998 a 2014)

3.2 Avaliações sazonais

Ao avaliar-se a distribuição geográfica da Média de Longo Termo (MLT) da precipitação no estado do Acre (Figura 3), verifica-se que existe um gradiente de precipitação orientado na direção NW-SE e em sentido crescente para NW. Ou seja, os municípios localizados no noroeste do estado (e.g., Porto Walter e Cruzeiro do Sul)

apresentam um regime climático mais úmido (em termos de precipitação) do que os municípios à sudeste, onde se localiza a capital do Estado. De acordo com a presente MLT, no noroeste do estado os acumulados durante a estação seca atingem em média 500 mm, enquanto que no outro extremo do estado acumula-se aproximadamente a metade do volume de chuvas (250 mm) durante o mesmo período.

Em termos percentuais (Figura 3, tons sombreados), os acumulados durante a estação seca de 2005 não ultrapassaram 50% do total esperado para o período, na maior parte do território do Acre. Algumas regiões sequer atingiram 25% do total esperado. A exceção situa-se no setor noroeste do estado, onde a precipitação acumulada somou valores de normais a um pouco acima da média.

Quando se compara o padrão espacial das anomalias de precipitação no Acre com a distribuição espacial dos focos de calor oriundos do sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA, nota-se uma certa consistência entre as regiões nas quais os indicadores atmosféricos mostram uma maior severidade da seca e a elevada contagem de focos. Entretanto, vale ressaltar que no leste acreano a cobertura vegetal original tem sido bastante alterada, pois há muitos assentamentos de reforma agrária e fazendas de gado. A ocupação humana é mais densa e há uma rede de ramais e rodovias que dão suporte às atividades econômicas entre os municípios da região.

Muitos fatores determinam a área queimada, que indiretamente é o que indica a contagem dos focos de calor, como por exemplo, a extensão de floresta inflamável, a presença de lagos ou rodovias, políticas de controle de queimadas, entre outros (FLANNIGAN & HARRINGTON, 1988). Cardoso *et al.* (2003), ao modelar a atividade do fogo na Amazônia, obtiveram resultados indicando que não são fatores climáticos que tem maior importância e sim a distância às rodovias, muito embora a precipitação tenha sido o segundo fator de maior importância.

Portanto, houve a combinação do condicionamento climático no leste acreano, onde as condições de seca foram mais severas e o fato desta região ser a mais desenvolvida e, portanto, também a mais degradada.

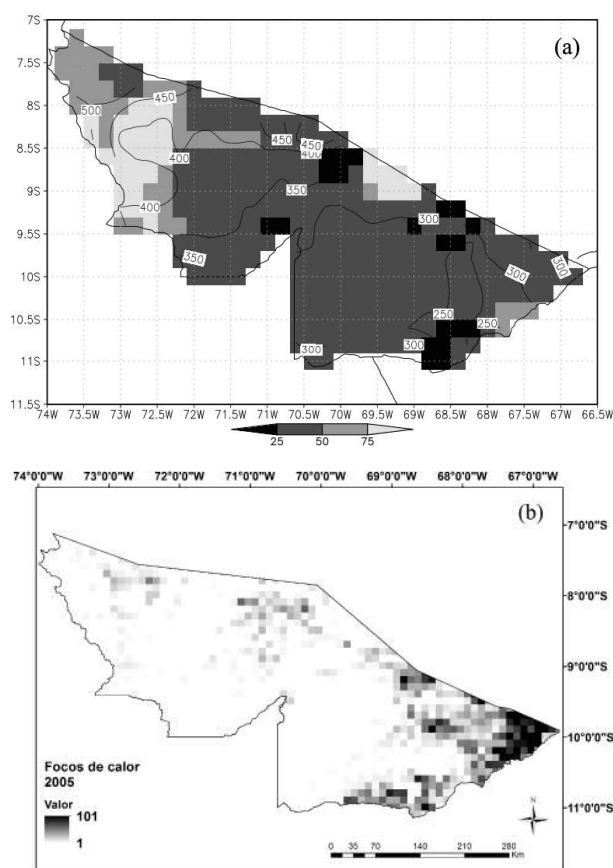


Fig. 3 - a) Isoietas (contornos) da MLT e acumulado percentual (tons de cinza) da precipitação MERGE sobre o estado do Acre durante a estação seca (MJJAS) de 2005. b) Contagem de focos de calor durante a estação seca (MJJAS) de 2005.

Não somente a precipitação foi deficiente durante a estação seca do Acre em 2005. A umidade do ar também apresentou valores abaixo da média. A Figura 4 mostra a disposição geográfica das anomalias de umidade relativa do ar a 2 metros de altura, conforme estimadas pelo conjunto de reanálises ERA Interim.

O padrão de distribuição espacial das anomalias de umidade relativa do ar é consistente com a distribuição de precipitação. No sudeste do estado, onde foram registradas as condições mais severas de seca, também a condição da umidade do ar é anormalmente negativa, i.e., a umidade relativa esteve abaixo da média durante a estação seca de 2005. Ressalta-se que as reanálises são bastante utilizadas para estudos de variabilidade climática por apresentarem uma consistente estrutura tridimensional da dinâmica atmosférica. Entretanto, deve ser levado em consideração que este conjunto de dados não apresenta precisão na simulação da magnitude

das variáveis de superfície.

Associado a esta condição de baixa umidade do ar nota-se um enfraquecimento do transporte de vapor d'água que em termos climatológicos (Figura 4, painel menor) transporta umidade das porções mais à nordeste da Amazônia para o estado do Acre.

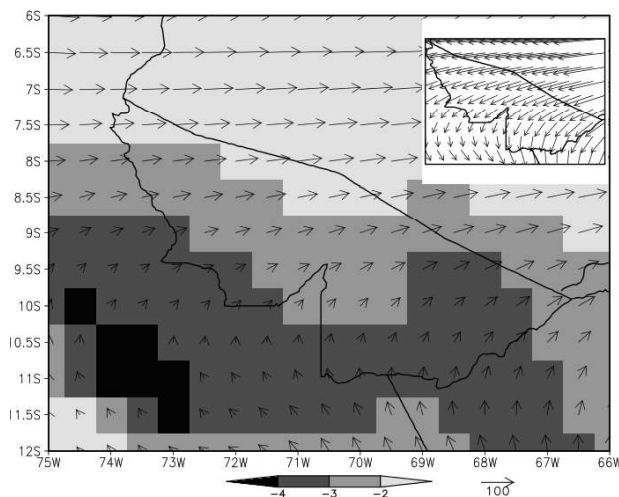


Fig. 4 - Anomalias de UR (tons de cinza) e transporte horizontal de vapor d'água integrado na coluna atmosférica. Painel menor: MLT do transporte horizontal de vapor d'água integrado na coluna atmosférica durante JJAS.

Os grandes incêndios de 2005 ocorreram em um contexto de uma seca singular. As presentes análises corroboram as indicações de Marengo *et al.* (2008) de que a estação chuvosa de 2004/2005 (DJFM) foi deficiente, fato este que levou a condições mais secas durante os meses de junho a setembro.

A condição da umidade do solo é um fator importante para a variabilidade da chuva. Na Amazônia, em particular, os estudos mostram a importância do papel da evapotranspiração a partir da vegetação de superfície: aproximadamente 50% da precipitação provém da própria evapotranspiração da vegetação (MARENGO & NOBRE, 2009). Isto significa que uma vegetação em déficit hídrico, devido a condições de pouca umidade no solo, contribui negativamente para a ocorrência de precipitação. Portanto, configura um processo que retroalimenta as condições de estiagem (retroalimentação positiva).

A vazão dos rios pode ser considerada como uma medida indireta das condições de umidade do solo, uma vez que vazões muito baixas refletem condições de solo seco. A vazão

do rio Acre, conforme medida em em Rio Branco, demonstrou estar abaixo da média por dois ciclos anuais consecutivos (2004 e 2005), indicando portanto o estado precário da umidade no solo no Acre em 2005. A análise da série histórica em Rio Branco, desde a década de 1970, demonstrou que o registro ocorrido em 2005 foi o mínimo, além de demonstrar uma tendência negativa das vazões (MARENGO *et al.*, 2008a).

De forma consistente com o panorama de seca apresentado até o momento pelas demais variáveis, a umidade do solo, conforme representada pelo modelo de balanço hídrico, também apresentou anomalias negativas durante a estação seca de 2005 (Figura 5). As regiões mais afetadas foram as Regionais do Purus e do Juruá, com anomalias inferiores a -30 mm. A situação de estiagem foi menos crítica na Regional do Alto Acre, com anomalias entre -30 e -20 mm. Já a Regional do Baixo Acre apresentou um quadro de déficit um pouco mais crítico com algumas regiões com anomalias abaixo de -30 mm e outras entre -30 e -20 mm.

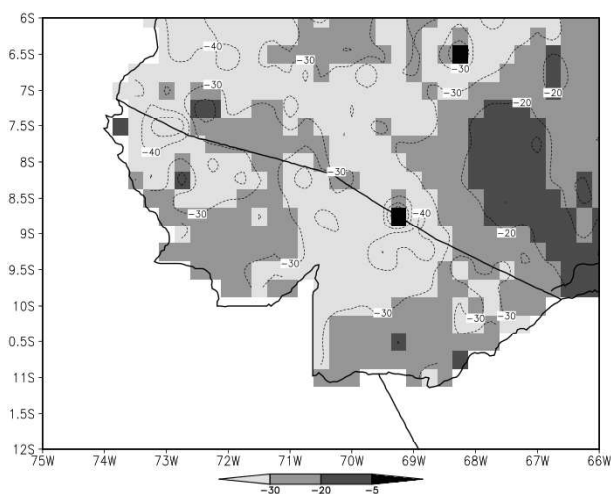


Fig. 5 - Distribuição geográfica das anomalias de umidade do solo (mm) durante JJAS de 2005. Os tons mais claros indicam condições mais secas.

3.2 Variações sub-sazonais locais

Conforme mostrado anteriormente o leste acreano foi a região do estado onde os impactos da seca foram mais significativos e que apresentou o maior número de focos de calor. Desta forma, nesta seção, as variações climáticas na escala sub-sazonal foram identificadas majoritariamente do ponto de vista de séries temporais na capital Rio Branco.

Além da deficiência de chuva, a estação seca foi marcada por uma severa condição anômala da UR (Figura 6). A série temporal da MLT diária da UR no Acre mostra que é comum haver uma diminuição da magnitude deste parâmetro atmosférico durante a estação seca. Valores da ordem de 75% são comuns nesta época do ano, em Rio Branco. No entanto, em 2005 a umidade atingiu o valor extremo de 52,5% no dia 02 de agosto. Aproximadamente 45 (quarenta e cinco) dias depois, novamente houve registro de valores extremamente baixos de umidade do ar: 54,2% nos dias 17 e 18 de setembro.

Apesar de extremamente baixos, estes valores não configuram o recorde absoluto na série de 1998 a 2014. Para avaliar quão extremos são estes valores de UR, foi calculado o valor limiar que define o percentil de 1% dos menores valores de UR, para os meses de agosto e setembro (Tabela 1). Desta forma verifica-se que os valores extremamente baixos de UR registrados em Rio Branco durante o verão de 2005 são bastante improváveis.

Tabela 1: Número de focos de calor associados aos extremos históricos de UR (definidos pelo percentil de 1%) em Rio Branco.

DATA	UR	P(1%)	10 DIAS ANTES	10 DIAS DEPOIS	INCR. (%)
05/08/1999	46,25	56,88	-	-	-
22/08/2011	46,25	56,88	92	396	330
31/08/2007	52,25	56,88	21	78	271
02/08/2005	52,50	56,88	524	1796	243
10/07/2006	53,00	67,87	14	13	-7
14/08/2010	53,25	56,88	753	1070	42
17/09/2005	54,25	56,16	2421	3209	32
16/09/2008	55,00	56,16	955	771	-19
04/09/2006	55,50	56,16	720	1049	46
28/08/2013	56,75	56,88	266	1285	383

Entre os dois dias nos quais foram registrados extremos de UR (02/08 e 17/09) houve um período de aproximadamente 20 dias (24 de agosto a 12 de setembro) no qual as magnitudes da UR mostraram uma tendência à recuperação, apresentando desvios menores e

mais próximos da MLT, embora ainda negativos. Após o dia 18 de setembro nota-se uma recuperação paulatina, embora errática, rumo a valores normais de UR, patamar este conseguido por volta do final de outubro.

Desta forma podem ser identificados dois períodos sub-sazonais (i.e., com duração inferior à duração da estação seca) nos quais houve rápido declínio, resultando nos dois mínimos registrados em 02 de agosto e 17 de setembro, e posterior recuperação da UR (Figura 6). Estes dois períodos são: 17 de julho a 19 de agosto, e 12 de setembro a 26 de setembro.

A TMAX não apresentou anomalias tão significativas quanto a UR, embora desvios positivos tenham predominado durante toda a estação seca, indicando que o estado do Acre vivenciou, além da seca, uma situação de temperaturas elevadas.

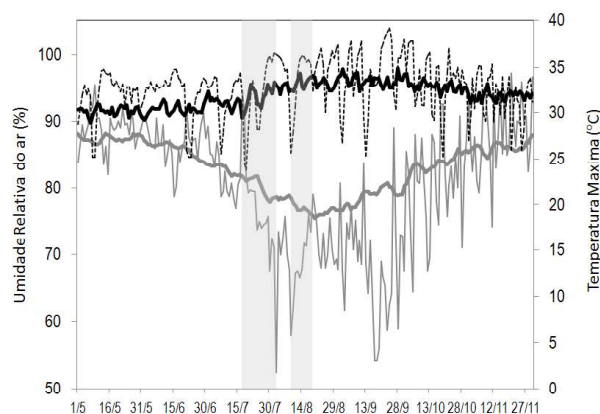


Fig. 6 - Série temporal de variáveis atmosféricas registradas na estação do INMET em Rio Branco durante os meses de maio a novembro. A linha cinza (negra) mais grossa indica a MLT da UR (TMAX), calculada no período de 1998 a 2014. A linha contínua (pontilhada) apresenta os registros de 2005 da UR (TMAX).

A análise da sequência temporal da precipitação em Rio Branco durante a estação seca de 2005 (Figura 7, pontos verdes) mostra que houve virtualmente uma interrupção de precipitação significativa (superior a 3mm/dia) por um período de aproximadamente 2 meses. O início deste período de estiagem é coincidente com o rápido declínio da UR, assim como o reinício da precipitação ocorre concomitantemente com a retomada de valores normais de UR. A sequência temporal da UR

exibe os dois períodos de atividade sub-sazonal, conforme comentado anteriormente.

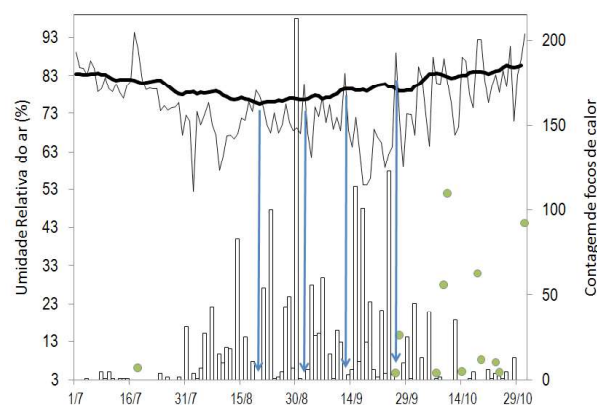


Fig. 7 - Evolução temporal das variáveis atmosféricas registradas na estação do INMET em Rio Branco durante os meses de julho a outubro de 2005. As linhas indicam a UR (linha tênue) e a MLT (1998-2014) da UR (linha grossa). Os pontos indicam precipitação diária superior a 3mm. As barras verticais mostram a contagem de focos de calor pelos satélites AQUA e TERRA.

A sequência temporal do número de focos de calor mostra um rápido incremento de meados de julho até o fim de agosto, quando foram registrados extraordinários 213 focos em um único dia (30/08), no município de Rio Branco. Durante setembro, a atividade do fogo ainda foi significativa, mas declinou consideravelmente do final do mês até meados de outubro.

Uma comparação visual da sequência temporal da UR com aquela da contagem de focos sugere uma aparente associação simultânea entre a contagem dos focos e a variação apresentada pela UR, em um sentido ao menos. As setas azuis indicam dias nos quais, em plena estação de queimadas, a contagem de focos foi muito reduzida, por vezes nula. Notavelmente, em todos estes dias a UR apresentou um pico positivo, superando os valores climatológicos. Ou seja, os presentes resultados sugerem que uma diminuição no número de focos esteja associada a um aumento na UR. Obviamente, é necessário um estudo mais aprofundado para validar com robustez metodológica esta associação.

A recíproca não aparenta ser verdadeira, no entanto. Não se nota uma associação tão clara entre máximos na contagem de focos de calor e mínimos na UR. A associação entre condições de atmosfera seca (mínimos de UR) e queimadas

parece resultar do efeito cumulativo de vários dias secos. O prevaletimento de condições secas afeta a inflamabilidade da matéria morta da floresta (TIAN *et al.*, 2012). Um período de 3 a 5 dias consecutivos secos pode aumentar as chances de ignição, 7 a 10 dias secos aumenta significativamente as chances de espalhamento do fogo, e o risco de haver incêndios catastróficos aumenta substancialmente com mais de 15 dias secos (SONG, 1991).

Não é somente a diminuição da precipitação que é levada em consideração ao considerar um dia como seco. Flannigan e Harrington (1998) exploraram o papel de diversas variáveis meteorológicas em relação à área queimada em florestas Canadenses. Seus resultados mostraram que longas sequências de dias com menos de 1,5 mm de chuva ou com UR inferiores a 60% foram altamente correlacionadas com a área queimada.

Em busca de indicações de uma potencial relação entre a persistência de extremos de UR e a incidência de focos de calor, avaliou-se o número de focos 10 dias antes e depois da ocorrência dos mínimos históricos registrados na TABELA 1. Os resultados mostram que, na maioria dos casos, ocorre um incremento no número de focos após os mínimos históricos de UR, indicando um aumento de queimadas e/ou maior alastramento de incêndios. Se assumirmos que demora vários dias para atingir um patamar mínimo de UR, como no caso de 2005, este resultado leva a crer que, de forma análoga aos resultados de outros estudos, no Acre também a sequência de dias extremamente secos é potencial precursora de processos de queima de biomassa descontrolada.

3.2 Investigação da causa potencial das variações sub-sazonais locais

A evolução da UR em Rio Branco ilustra bem a questão das variações sub-sazonais. Se considerássemos anomalias no trimestre julho a setembro, como um todo, não seríamos capazes de observar que a anomalia sazonal foi decorrente de dois ciclos de atividade atmosférica anômala, dentro do grande ciclo da estação seca, intercalados por um período de relativa normalidade.

Em busca das potenciais variáveis associadas, avaliou-se o potencial de velocidade

do escoamento de grande escala dos dois períodos opostos do primeiro ciclo, o mais intenso. Um período no qual a taxa de decréscimo da UR foi extremamente elevada (17 de julho a 2 de agosto) e o período de recuperação logo após (09 a 19 de agosto). Estes dois períodos estão indicados por uma faixa cinza na Figura 6.

O potencial de velocidade em altos níveis da atmosfera (aproximadamente 12 a 15 km de altura) é uma variável crucial para o entendimento dos movimentos horizontais convergentes e divergentes da assim chamada grande escala ($O \sim 1000\text{km}$). A importância de acompanhar estes movimentos nas camadas mais altas da atmosfera reside no fato de que onde o movimento é convergente (divergente) horizontalmente há, em geral, subsidência (ascendência) nos movimentos verticais da atmosfera. Na Amazônia, em particular, é importante porque mostra regiões onde pode haver um movimento de subsidência que limita a formação das células de convecção, típicas da região amazônica.

A Figura 8 ilustra as situações contrastantes de grande escala, associadas às fases distintas (declínio e recuperação dos níveis de UR) da primeira onda sub-sazonal que afetou o estado do Acre durante a estação seca de 2005. Anomalias positivas de velocidade potencial indicam um mecanismo forçante de grande escala que inibe ou suprime a convecção nas regiões tropicais. As anomalias negativas estão associadas à ausência deste mecanismo de supressão, portanto são favoráveis à formação de nuvens de convecção profunda.

Pode-se perceber que durante o período no qual a UR do ar declinava rapidamente, houve predominância de anomalias positivas de potencial de velocidade sobre a região Amazônica. Diferentemente, durante o período no qual os níveis de UR se recuperaram em Rio Branco, a forçante de grande escala não apresentou anomalias positivas de potencial de velocidade, portanto de inibição de convecção, sobre a Amazônia.

Variações sub-sazonais são normalmente associadas com ondas atmosféricas de grande escala, que são componentes naturais do sistema acoplado oceano-atmosfera no qual vivemos. Dentre as diversas ondas que atuam na atmosfera nesta escala de tempo, algumas pouco estudadas,

uma delas se destaca: a Oscilação de Madden-Julian (OMJ - MADDEN & JULIAN, 1971, 1972; ZHANG, 2005).

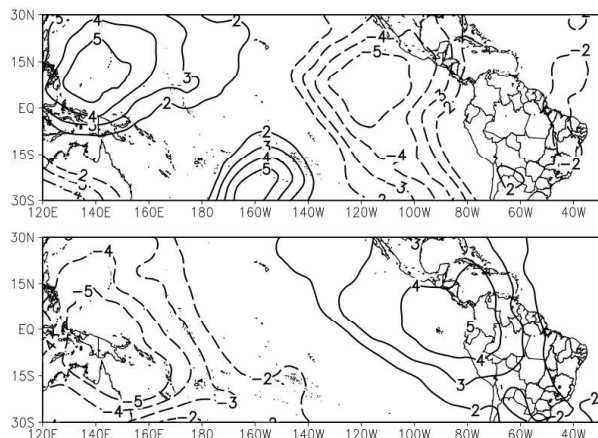


Fig. 8 - Anomalia do potencial de velocidade da circulação atmosférica de grande escala. Composto no período de 09 a 19 de agosto (painel superior) e 17 de julho a 2 de agosto (painel inferior). Valores positivos (negativos) indicam tendência para movimento subsidente (ascendente) e supressão (favorecimento) da precipitação.

A OMJ é uma onda de número de onda 1 que atua na escala sub-sazonal em toda a região tropical, com um ciclo de evolução em torno de 30 a 60 dias, ou seja, demora aproximadamente 30 a 60 dias para que esta onda viaje ao redor do equador, no sentido leste. À medida que circunda o globo, a OMJ afeta o regime de chuvas em várias localidades da região tropical. Como é uma onda de número 1 ela tem um efeito oposto e simultâneo sobre o regime de chuvas da região tropical: em algumas regiões ela favorece a precipitação, enquanto em outras ela prejudica.

Assim, a evolução da OMJ ao redor do cinturão tropical poderia ser monitorada através dos padrões anômalos de precipitação que ela induz. No entanto, é mais facilmente observada nos padrões de divergência e convergência em altos níveis da atmosfera, padrões estes que podem ser inferidos pela anomalia do potencial de velocidade. A Figura 9 mostra uma seção longitude versus tempo, da anomalia do potencial de velocidade, média entre 12,5S e 7,5S, que caracterizam, aproximadamente, os limites sul e norte do estado do Acre. Quando

a OMJ está ativa pode-se acompanhar a propagação para leste através de uma banda inclinada de anomalias. As anomalias positivas (inibição da precipitação) aparecem como tons amarelo-castanho. As anomalias negativas (favorecimento da precipitação) são mostradas em tons verdes.

O diagrama longitude x tempo evidencia que durante praticamente toda a estação seca (final de maio a meados de setembro) o estado do Acre esteve sob a influência inibidora de convecção, devido ao prevaletimento de anomalias positivas de potencial de velocidade. Este fato pode ser visualizado através da predominância de tons amarelo-castanhos entre as duas linhas que delimitam os limites oeste e leste do Acre. Houve apenas dois momentos nos quais o panorama de grande escala foi favorável à precipitação no Acre (tons verdes na Figura 9): em meados de maio e meados de setembro. Consistentemente, entre estes dois períodos não houve precipitação significativa no estado.

Sobreposto a este padrão mais estendido e persistente de inibição da precipitação que perdurou por toda a estação seca, verifica-se a ocorrência de pulsos recorrentes de atividade inibidora intensificada. Pode-se notar que houve eventos de anomalias positivas de potencial de velocidade (ambos indicados por uma linha negra oblíqua na Figura 9) associados aos dois períodos de atividade sub-sazonal, identificados previamente, nos quais houve intenso declínio da UR em Rio Branco. O primeiro evento não parece estar associado à propagação de um episódio da OMJ, pois não há rastro aparente de propagação pelo Oceano Pacífico; apenas um deslocamento do Pacífico Leste para a América do Sul. O lapso de tempo entre este primeiro e o segundo evento corresponde ao período de aproximadamente 30 a 40 dias, indicando uma variabilidade na escala sub-sazonal.

No caso do segundo evento, aparentemente, houve o deslocamento, de oeste para leste, pelo Oceano Pacífico e ao longo do equador, de uma onda de inibição de convecção (indicado pela linha na Figura 9). Ambos, o tempo gasto no deslocamento (30-40 dias) e o deslocamento zonal ao longo do equador são características atribuídas à OMJ.

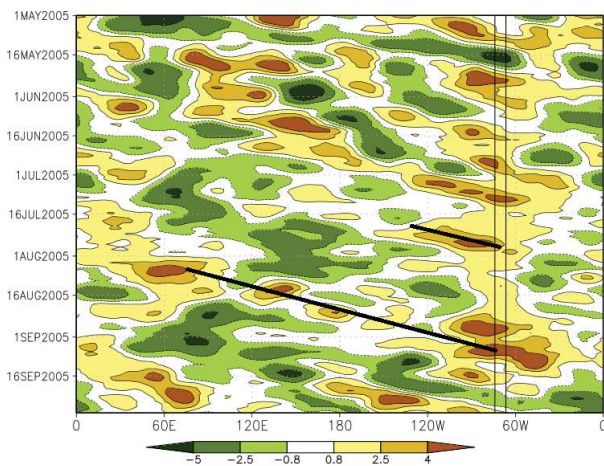


Fig. 9 - Seção tempo x longitude da anomalia do potencial de velocidade da circulação atmosférica de grande escala, média entre as latitudes 12,5S e 7,5S. Os tons verdes (marrons) indicam estímulo (inibição) da precipitação. As duas linhas verticais e paralelas indicam os limites oeste e leste do estado do Acre.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou algumas das principais características climáticas associadas ao período anormalmente seco de 2005 no estado do Acre. Adicionalmente, e de forma original, investigou as variações sub-sazonais do clima durante o mesmo período.

Para avaliar os padrões regionais (estado do Acre e vizinhanças) e globais da circulação atmosférica foram utilizados dados das reanálises ERA Interim e NCEP/NCAR. Dados da estação do INMET em Rio Branco serviram para avaliar a variabilidade sub-sazonal local. O modelo de balanço hídrico do INPE foi utilizado para caracterizar o estado anômalo de umidade do solo no estado do Acre, durante o período crítico das queimadas. A avaliação dos padrões de precipitação foi feita através dos conjunto de dados MERGE do CPTEC/INPE.

Em termos de médias sazonais, as avaliações mostraram que a maior parte do estado apresentou volumes pluviométricos que não ultrapassaram 50% da MLT para a estação seca. Em várias regiões não choveu sequer 25% do volume climatológico.

Os dados MERGE evidenciam que a distribuição geográfica da precipitação, em termos da MLT, durante a estação seca mostra que o leste do Acre, onde se localiza a capital

Rio Branco, é substancialmente mais seco (250 a 300 mm) que o oeste (450 a 500 mm), onde se localizam, por exemplo, os municípios de Porto Walter e Cruzeiro do Sul.

No setor leste do estado, onde foram registradas as condições mais severas das anomalias de precipitação, a condição da umidade do ar também esteve abaixo da média durante a estação seca de 2005. Consistentemente, com o quadro de déficit de precipitação e umidade relativa do ar a umidade do solo, conforme representada pelo modelo de balanço hídrico, também apresentou anomalias negativas.

A análise das variações sub-sazonais foi feita com base nos dados diários registrados em Rio Branco, na estação do INMET. Esta análise indicou a existência de variabilidade na escala sub-sazonal associada à seca de 2005, conforme apresentado nos dados de umidade relativa do ar. Houve dois ciclos nos quais a umidade relativa do ar apresentou rápido declínio e posterior recuperação da UR, intercalados por um período de aproximadamente 20 dias no qual as magnitudes da UR mostraram uma tendência à recuperação. Estes dois períodos são: 17 de julho a 19 de agosto, e 12 de setembro a 26 de setembro.

Em cada um destes ciclos foram atingidos valores mínimos extremos de UR: 52,5% no dia 02 de agosto, e 54,2% no dia 17 de setembro. Estes valores se enquadram no intervalo dos 1% menores valores de UR registrados em Rio Branco na série de 1998 a 2014, portanto configuram extremos climáticos.

A sequência temporal da precipitação em Rio Branco durante a estação seca de 2005 mostra que houve virtualmente uma interrupção de precipitação significativa (superior a 3 mm/dia) por um período de aproximadamente 2 meses (julho e agosto). A partir de análises comparativas dos dados em Rio Branco, foram encontrados indícios de que um aumento na UR esteja associado a uma diminuição no número de focos de calor, principalmente se o incremento elevar os níveis de UR para patamares acima da média. Por outro lado, os mínimos de UR parecem representar condições mais persistentes de estiagem e os resultados indicam que estas condições são sucedidas por contagens elevadas de focos de calor, indicando um aumento de queimadas e/ou maior alastramento de incêndios.

A investigação dos potenciais condicionantes atmosféricos associados aos dois ciclos sub-sazonais indicou que os movimentos atmosféricos de subsidência tiveram um papel fundamental, ao limitar a precipitação e diminuir a UR. Foi encontrada uma associação entre a distribuição da anomalia do potencial de velocidade e os ciclos sub-sazonais de UR, em Rio Branco, que resultaram em valores extremos. Nos dois ciclos a anomalia do potencial de velocidade apresentou valores negativos, indicando um processo de grande escala de supressão da convecção.

Dado que a escala de variabilidade dos dois ciclos foi de aproximadamente 45 dias, buscou-se associação com a OMJ que é a ondulação atmosférica de escala planetária mais conhecida e com periodicidade semelhante. No caso do primeiro ciclo, a análise do diagrama longitude x tempo não mostrou indicação clara da propagação de um episódio da OMJ. No entanto, vale ressaltar que a presente análise foi conduzida em uma faixa tropical mais ao sul (12,5S e 7,5S) do que aquela normalmente utilizada (5S e 5N) e portanto deslocamento da OMJ muito restritos ao equador podem não ser aparentes.

No caso do segundo evento fica mais evidente o deslocamento, de oeste para leste, pelo Oceano Pacífico e ao longo do equador, de uma onda de inibição de convecção. Ambos, o tempo gasto no deslocamento (30-40 dias) e o deslocamento zonal ao longo do cinturão tropical são características atribuídas à OMJ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ARAI, E. Avaliação dos dados de chuva mensal para a região Amazônica oriundos do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) produto 3b43 versões 6 e 7 para o período de 1998 a 2010. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais**. pp. , 2013.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, LIANA O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 7, pp. 1-7, 2007.

BROWN, F.; SANTOS, G. P.; PIRES, F.; COSTA, C. Brazil: Drought and Fire Response in the Amazon. World Resources 2010-2011, Decision Making in Changing Climate, 2011. Disponível em http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/world_resources_report_2010-2011.pdf. Acesso: 05 de dezembro de 2017.

BROWN, I. F.; SCHROEDER, W.; SETZER, A.; MALDONADO, M. L. R.; PANTOJA, N.; DUARTE, A.; MARENGO, J. Monitoring fires in southwestern Amazonia Rain Forests. **EOS**, v. 87, p. 253-264, 2006.

CARDOSO, M. F.; HURTT, G. C.; MOORE, B.; NOBRE, C. A.; PRINS, E. Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, 9, p.656 – 669, 2003.

CENTRONACIONALDEMONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. Sistema Cantareira. Disponível em <http://www.cemaden.gov.br/cantareira/arquivos/Relatorio_SistemaCantareira_20150930.pdf>. Acesso em: 30 de outubro de 2015.

ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D. V. O.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia, **Ecological Applications**, v. 14, p. S22–S32, 2004.

DUARTE, A. F.; CUNHA, R. M.; LIMA, W. S. A necessidade de otimização das informações meteorológicas na amazônica ocidental. **Boletim SBMET**, vol. 30, n. 1, p. 21-31, 2006.

FLANNINGAN, M. D.; HARRINGTON, J. B. A study of the relation of meteorological variables to monthly provincial area burned by wildfire in Canada (1953-80). **Journal of Applied Meteorology**, v. 27, p. 441-452, 1988.

LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon Drought, **Science**, v. 331, no. 6017, 2011.

MACÊDO, M. N. C.; DIAS, H. C. T.; COELHO, F. M. G.; ARAÚJO, E. A.; SOUZA, M. L. H.; SILVA, E. Precipitação pluviométrica e vazão da bacia hidrográfica do Riozinho do Rôla, Amazônia Ocidental. **Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, p. 206-221, 2013.

- MADDEN R.; JULIAN, P. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 29, p. 1109-1123, 1972.
- MADDEN R.; JULIAN, P. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 28, pp. 702-708, 1971.
- MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA V.; SILVA DIAS P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO A. C.; NOGUÉS-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 1–21, 2012.
- MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**, v. 12, pp. 853–863, 1992.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S., OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, F. The drought of Amazonia in 2005, **Journal of Climate**, v. 21, no. 3, pp. 495-516, 2008.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da região Amazônica. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; SILVA DIAS, M. A. F. (Eds.) **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 197-212.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011.
- McGREGOR, S.; TIMMERMANN, A.; STUECKER, M. F.; ENGLAND, M. H.; MERRIFIELD, M.; JIN, F.-F.; CHIKAMOTO, Y. Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming, **Nature Climate Change**, v. 4, p. 888–892, 2014.
- PHILIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; MALHI, Y. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, no. 5919, p. 1344–1347, 2009.
- RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, p. 81-91, 1990.
- RAMAGE, C. S. **Monsoon Meteorology**. New York: Academic Press, 1971. 296p.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606–1626, 1987.
- ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, p. 113-122, 2004
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; ARAI, E.; FREITAS, R. M.; LIMA, A.; VALERIANO, D.; BROWN, I. F.; MALDONADO, M. L. R., Fraction images derived from Terra MODIS data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia, **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 1537–1546, 2009.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Micrometeorology of temperate and tropical forest, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B**, v. 324, p. 299–334, 1989.
- SOMBROEK, W. G. Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. **Ambio**, v. 30, pp. 388–396, 2001.
- VASCONCELOS, S.; BROWN, I. F.; FEARNSIDE, P. Focos de calor no sudoeste da Amazônia: indicadores de mudanças no uso da terra In: XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 2009. **Anais**. pp. 6353-6360.
- TAN, J.; JAKOB, C.; ROSSOW, W. B.; TSELIODIS, G. Increases in tropical rainfall driven by changes in frequency of organized deep convection. **Nature**, v. 519, p. 451–454, 2015.
- RANDOW, C. Von; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERS,

J. A.; WATERLOO, M. J.; CARDOSO, F. L.; KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, no. 1-3, pp. 5–26, 2004.

WEBSTER, P. J.; TOMA, V. E.; KIM, H.-M. Were the 2010 Pakistan floods predictable? **Geophysical Research Letters**, v. 38, no. L04806, 2011.

SONG, Z. J. **The Principle of Forest Fire and Forest Fire Forecast**. Beijing: Meteorological Press, 1991.

ZHANG, C. Madden-Julian Oscillation. **Reviews of Geophysics**, v. 43, no. 2, p. 1-36, 2005.

TIAN, X. R.; SHU, L. F.; ZHAO, F. J. Conditions of lightning fires occurrence in Daxinganling forest region. **Forestry Science**, vol. 48, no. 7, p. 98–103, 2012.