



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DO TRANSPORTE DE UMIDADE DA
AMAZÔNIA PARA O SUDESTE DO BRASIL DURANTE O
VERÃO AUSTRAL (DJF)**

Murilo da Costa Ruv Lemes
Dr. Gilvan Sampaio de Oliveira

INPE
Cachoeira Paulista – SP
2017



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ANÁLISE DO TRANSPORTE DE UMIDADE DA
AMAZÔNIA PARA O SUDESTE DO BRASIL DURANTE O
VERÃO AUSTRAL (DJF)**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Murilo da Costa Ruv Lemes (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: murilo.lemes@inpe.br

Gilvan Sampaio de Oliveira (CPTEC/INPE, Orientador)

E-mail: gilvan.sampaio@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Gilberto Fernando Fisch (IAE/CTA)

Dra. Renata G. Tedeschi (CPTEC/INPE)

LISTA DE FIGURAS E ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Fluxo integrado DJF médio dos anos com presença do El Niño.....	14
Figura 2- Composites El Nino Central e Leste em São Paulo durante o verão DJF	16
Figura 3- Anomalia (isolinhas e vetores) da corrente de jato em 250hPa do El Niño Leste e Central	17
Figura 4- Fluxo de umidade integrado na vertical de 1997 - ano com presença de EEN	18

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	9
2	ÁREA DE ESTUDO	11
3	OBJETIVO.....	11
4	METODOLOGIA	12
5	RESULTADOS.....	14
6	CONCLUSÃO	19
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar todas as dificuldades. Minha família, por ter dado a base para que tudo isso fosse possível. Meu orientador, Professor Doutor Gilvan Sampaio de Oliveira, que em todos os momentos, de forma solícita, tirou dúvidas, incentivou e me ajudou nessa pesquisa. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela infraestrutura, aos pesquisadores que sempre estiveram despostos para ajudar, de forma especial, Dr Gilberto Fisch, Dr Guillermo Oswaldo Obregón Párraga e Dra. Renata Tedeschi.

RESUMO

Nos últimos dois verões (2013-2014,2014-2015), a região Sudeste do Brasil passou por um período de grande seca. Ao estudar o transporte de umidade da região amazônica para o Sul e Sudeste do Brasil, pode-se notar que há uma forte correlação entre ambos, principalmente na estação chuvosa, Dezembro-Janeiro-Fevereiro(DJF), mesmo considerando que entre o final de novembro até o final de fevereiro a principal atividade convectiva sobre o país, está interligada a uma banda de nebulosidade com orientação NO/SE ao oceano Atlântico adjacente, sendo assim chamado de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Além da ZCAS, os sistemas frontais influenciam na precipitação da região Sudeste do Brasil. Durante o verão (DJF), em média, cinco frentes frias chegam a região, e assim, com a umidade vinda da Amazônia, formam a ZCAS, que causa grandes volumes de chuvas durante um período (em média de 5 a 7 dias dependendo da intensidade) continuamente entre o fim de novembro e o fim de fevereiro. Identificando as influências do El Niño Oscilação Sul (ENOS), e separando entre Central, quando as maiores temperaturas são identificadas no centro do oceano Pacífico Norte, e Leste, para maiores temperaturas no Leste do Pacífico é possível relacionar os diferentes efeitos, inclusive, com a precipitação no Sudeste do Brasil, relatando um dipolo de precipitação no El Niño Central entre o Sul e Sudeste do país. Esse dipolo de precipitação é mostrado em mapas do fluxo de umidade integrado na vertical, sendo considerado valores que estão, entre a superfície até 500hPa, e também mapas da corrente de jato, analisados em 250hPa, resultando em uma diferença no padrão dessa corrente de jato em anos de El Niño Central, Leste e anos neutros.

Palavras chave: Amazônia, São Paulo, Transporte de umidade integrado na vertical, Chuva.

ABSTRACT

In the last two summers (2013-2014, 2014-2015), a southeastern region of Brazil went through a period of great drought. When studying the transportation of an Amazon region to the South and Southeast of Brazil, it can be noted that there is a strong correlation between both, especially in the rainy season, December-January-February (DJF), even considering that between the end of November Until the end of February, a main convective activity on the country, is connected to a band of cloudiness with NO / SE orientation to the adjacent Atlantic ocean, being thus called South Atlantic Convergence Zone (SACZ). In addition to the ZCAS, frontal systems influence precipitation in the Southeast region of Brazil. During the summer (DJF), on average, five cold fronts arrive in the region, and thus, with an arrival from the Amazon, they form a ZCAS, which causes large volumes of rain during a period (on average 5 to 7 days depending on the Intensity) Continuously between the end of November and the end of February. Identifying the influences of the El Niño Southern Oscillation (ENSO), and separating between Central, when the highest temperatures are identified in the center of the North Pacific Ocean, and East, for higher temperatures. A precipitation in Southeastern Brazil, reporting a precipitate precipitation in the El Niño Central between the South and Southeast of the country. This precipitation map is a map of a moisture flow map integrated in a vertical point, being considered a point where it is, between a surface up to 500hP, and also a map of jet stream, analyzed in 250hPa, resulting in a Non-standard difference in this jet stream In years of Central El Niño, East and neutral years.

Keywords: Amazon, Sao Paulo, Integrated Moisture Flow Vertically, Rainfall

1 INTRODUÇÃO

Os verões de 2013-2014 e 2014-2015 foram marcados por eventos extremos de estiagem, em especial na região do Sudeste do Brasil. Esse evento refletiu diretamente na Sociedade, pois em inúmeras cidades do estado de São Paulo, ocorreu racionamento de água devido à pouca quantidade nos reservatórios espalhados pelo estado. Evento este, causado por um fenômeno de escala global, originado do norte da Austrália (COELHO, 2015) que adentrou o continente sul americano originando um sistema muito forte de alta pressão na parte central do Brasil agindo como um bloqueio atmosférico, impedindo assim a formação de nuvens de chuva e a entrada de sistemas frontais no estado.

Observando os totais de precipitação de toda a área afetada de 2013-2014, nota-se, que foi um período muito anômalo em relação, tanto a normal climatológica (1.450mm) quanto a mínima registrada (1.169mm) (KOUSKY 1988; LIEBMANN *et al.*, 2001; CARVALHO *et al.*, 2002,2004; DUFEK e AMBRIZZI, 2008; SUGAHARA *et al.*, 2009; SILVA DIAS *et al.*, 2013).

Um dos fenômenos atmosféricos mais importantes na América do Sul, é o transporte de umidade da região de floresta amazônica para o Sul e Sudeste brasileiro, ou seja, um processo realizado pela circulação geral da atmosfera com influência oceânica e continental responsável pela distribuição das chuvas em todo o território do continente (ARRAUT e SATYAMURTY, 2009).

Esse processo possui vários mecanismos, sendo que um dos mais importantes, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) estudada por (HERDIES *et al.*, 2002), que observaram um intenso jato de baixos níveis (JBN) transportando umidade tropical oriunda da Amazônia para os subtropicais, gerando convergência do fluxo de umidade e precipitação no Amazonas e seguindo para a região Sudeste. Entretanto, é observado uma divergência deste fluxo no leste do Brasil, Nordeste da Argentina, Paraguai, sul da Bolívia e norte do Chile, devido ao enfraquecimento do transporte de umidade para a bacia do Rio da Prata. A ZCAS é o sistema atmosférico responsável por grandes volumes de chuva no verão austral, ou seja, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF).

Nos meses de DJF, a zona de máxima cobertura de nuvens, precipitação e convergência de massa localiza-se ao norte da ZCAS. Outro fenômeno de interação

oceano/atmosfera é o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) (SAMPAIO, 2001). De escala global, o ENOS, ocorre pelo aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico norte causando assim, alterações, em especial na América do Sul, na temperatura e precipitação. Em particular, no Brasil, o ENOS causa efeitos expressivos no Norte, Sul, Sudeste e Nordeste do país, causando aumento da precipitação no Sul (devido ao aumento da intensidade da corrente de jato que, por sua vez, impede o avanço de frentes frias para o Sudeste do Brasil, com isso, os sistemas frontais, ficam estacionados sob a região Sul) e em algumas partes do Norte, diminuição da precipitação na região Nordeste e parte do Norte e, por fim, aumento da temperatura na região Sudeste do Brasil, sem mudanças na precipitação em função do mesmo.

Portanto, este trabalho, tem como objetivo geral avaliar o transporte de umidade médio climatológico da região Amazônica em direção ao Sudeste do Brasil durante o verão austral (DJF) a partir de dados observados e reanálises, verificando possíveis anomalias de natureza física que ocorreram nos períodos, e dessa maneira, observar o comportamento do fluxo integrado de umidade na vertical em anos de ENOS, sendo ele na parte central ou leste do Pacífico. Buscou-se analisar os mecanismos atmosféricos e suas atividades para uma melhor compreensão do transporte de umidade na América do Sul, da região amazônica para o Sul e Sudeste do Brasil, entendendo assim, causas de possíveis anomalias nesse transporte. Com os objetivos específicos, pretende-se verificar também, mudanças no padrão médio de transporte de umidade em anos chuvosos e secos na região Sudeste do Brasil a partir de dados observados e reanálises, e assim, estudar o histórico do transporte de umidade no trimestre DJF, com ênfase nos últimos 36 anos (1979 - 2015), com uma atenção maior nos últimos dois verões (2013-2014 e 2014-2015).

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho contempla, de forma geral, a região de floresta amazônica e o Sudeste do Brasil, especificamente o estado de São Paulo, local de inúmeros reservatórios, como o sistema Cantareira.

A floresta amazônica é a maior floresta tropical do mundo, possuindo diferenciados ecossistemas, além de ser uma floresta úmida de terra firme, apresenta diversos tipos de matas, campos abertos e até espécies do cerrado. Além disso é fundamental para o equilíbrio do planeta, pois seus rios representam cerca de 20% das reservas de água doce do planeta, abrangendo também, diversas reservas minerais.

São Paulo é a maior cidade por números de habitantes do Brasil, cerca de 11.967.825 pessoas residem no município que possui uma área de 1.521.110km², é uma das maiores economias do país no setor industrial.

3 OBJETIVO

Os objetivos da iniciação científica foram:

- Avaliar o transporte de umidade médio climatológico da região amazônica em direção ao Sudeste do Brasil durante o verão austral (DJF) a partir de dados observados e reanálises, como por exemplo, ERA – INTERIM e NCEP/NCAR Reanalysis 1 e 2;
- Verificar mudanças no padrão médio de transporte de umidade em anos chuvosos e secos na região Sudeste do Brasil a partir de dados observados e reanálises;
- Estudar o histórico do transporte de umidade no trimestre DJF, com ênfase nos últimos 36 anos (1979 - 2015), com uma atenção maior nos últimos dois verões;
- Analisar, por meio de gráficos, o comportamento do fluxo de umidade integrado na vertical em uma linha cronológica, identificando a presença de tendências ou não;
- Verificar possíveis anomalias de natureza física que ocorreram nos períodos indicados por gráficos;
- Identificar mudanças na Corrente de Jato em Baixo Níveis (JBN) durante eventos de ENOS.

4 METODOLOGIA

Todos os dados relacionados à precipitação e para o cálculo do transporte de umidade foram obtidos a partir de Reanálises do site do NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>), em seguida, foram tratados e modificados através do software CDO (Climate Data Operators) para possivelmente serem utilizados no software GrADS (Grid Analysis and Display System), ou seja, o CDO realiza todos os cálculos necessários para o trabalho das variáveis, já o GrADS é o responsável da parte gráfica, onde, todos os mapas foram gerados e são apresentados.

No CDO foi possível realizar diversos cálculos, tais como: cálculos das médias mensais, médias anuais, soma, anomalia, *composites*, entre outras operações. Com todos os arquivos tratados e utilizando as variáveis: vento, pressão atmosférica e umidade específica, realizou-se o cálculo do fluxo de umidade integrado na vertical (da superfície até o nível de 500hPa) para análise do comportamento em escala temporal, ressaltando anos extremos, ou seja, anos com muita chuva e intenso transporte de umidade e anos com pouca chuva e com um transporte de fraca intensidade. Este fluxo integrado é calculado pela seguinte fórmula:

$$Qu = \frac{1}{g} \int_{pt}^{po} qvdp$$

$$Qv = \frac{1}{g} \int_{pt}^{po} qvdp$$

Em que Q_u e Q_v representam as componentes zonal e meridional do vento, g é a aceleração devido à gravidade, q é umidade específica, u e v são componentes do vento,

P_t representa a pressão na parte superior do domínio da integração (500hPa) e P_o é a pressão na superfície.

Após estes processos, os dados foram organizados em gráficos com uma escala cronológica, no eixo horizontal, para um melhor entendimento do comportamento, da precipitação e do fluxo de umidade integrado. De acordo com o cálculo da anomalia, $X' = Xi - \bar{X}$, onde, X' = anomalia, Xi = ano observado e \bar{X} = média climatológica, com isto, foi possível identificar possíveis mudanças no comportamento da precipitação ao longo de todo período estudado.

O método de *composite*, também foi utilizado em muitos mapas, principalmente aqueles que analisam o evento ENOS. A técnica da *composite* seria o cálculo de uma soma de um período, no caso foi utilizado os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, correspondentes ao verão no hemisfério Sul, e dessa soma é realizada uma média, tendo como produto um resultado mais estável e representativo.

Inicialmente foram criados mapas dos fluxos (vetores) utilizando-se as linhas de comando Grads para as componentes que envolvessem o vento (componentes zonal e meridional), para todos os anos considerados. Posteriormente, calculou-se estes mesmos fluxos para anos específicos (mais chuvoso, mais seco, anos de ENOS, etc). Por fim, usando a mesma metodologia, foram calculadas as anomalias deste transporte, conforme a equação a seguir...:

$$\sqrt{\mathbf{u} * \mathbf{u} + \mathbf{v} * \mathbf{v}}$$

Em que u e v são as componentes zonal e meridional, respectivamente vento.

A Figura 5 representa as áreas que serão abordadas ao longo desse trabalho, a área de floresta amazônica, que está localizada nas latitudes de 10°S a 3°N, enquanto que a de São Paulo localizada nas latitudes de 20 a 27°S.

5 RESULTADOS

A Figura 1 mostra dados do fluxo de umidade em anos representativos de eventos ENOS. É possível fazer uma comparação com os anos neutros, pois a intensidade do fluxo de umidade integrado na vertical é maior, quando esse fenômeno, de escala oceano-atmosférico, está presente (em torno de 30 kg/kg de saída), enquanto que o valor climatológico é cerca de 27,5kg/kg, ou seja, apenas em 3 anos com presença do fenômeno, número baixo quando comparado com anos neutros, sua média é de grande expressão para identificar um aumento de intensidade desse fluxo de umidade, que não necessariamente vêm acompanhado de chuva, mas sim, de um aumento do transporte dessa umidade.

Em São Paulo, identificou-se esta mesma intensificação do transporte de umidade na região, houve um aumento de umidade entrando no território, porém, a quantidade que deixou o território, manteve-se constante, de modo que ocorreu uma convergência de umidade nas áreas demarcadas no mapa.

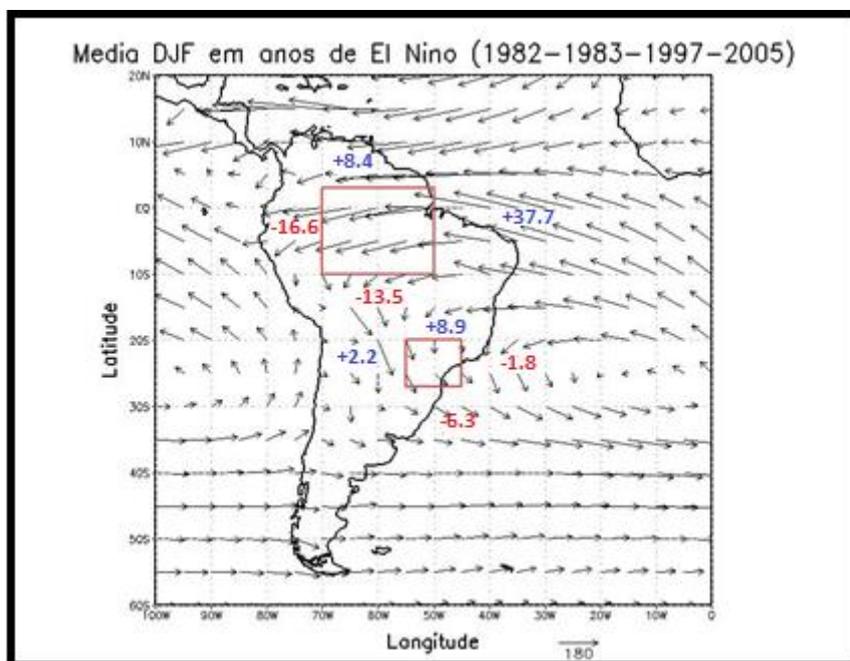
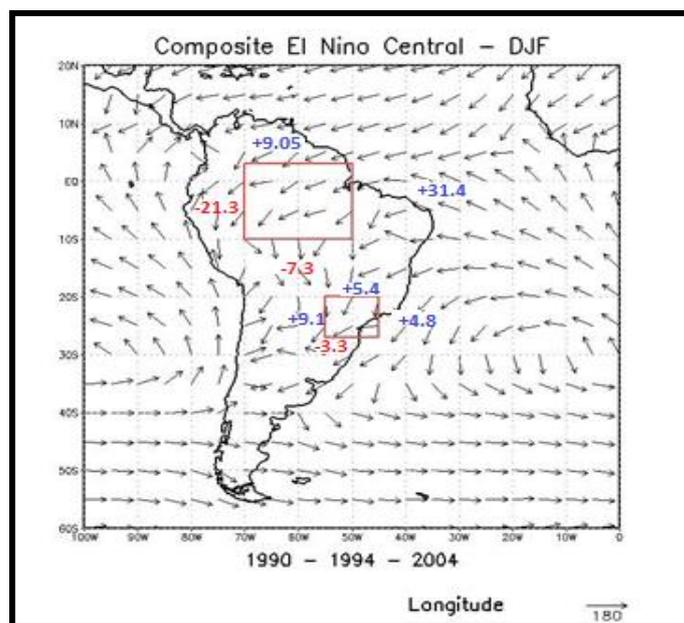


Figura 1- Fluxo integrado DJF médio dos anos com presença do El Niño.

Recentemente (TEDESCHI, GRIMM e CAVALCANTI, 2015) investigaram o evento ENOS e propuseram que a análise em 2 segmentos (CEN e EEN) que representasse melhor a influência sobre o Brasil, afirmando que há divergências de efeito nos diferentes tipos. Portanto, dividiu-se as análises considerando o CEN, quando o aquecimento do Oceano Pacífico ocorre de forma mais intensa na porção central do Pacífico Norte e EEN, quando a maior intensidade ocorre em sua porção leste, próximo da costa da América do Sul. Desse modo foi possível calcular a relação do transporte de umidade e, principalmente com o regime das chuvas em São Paulo. A intensidade do fluxo de entrada de umidade no caso El Nino Leste (EEN) é maior do que no El Nino Central (CEN), porém as saídas também o são. Como consequência, a convergência de umidade para o caso CEN é maior do que o caso EEN. No caso da região de SP, o acúmulo de umidade na região para o caso EEN é muito grande ($\Delta Q=30,4$ kg/kg), em relação CEN (convergência de 9,4 kg/kg).



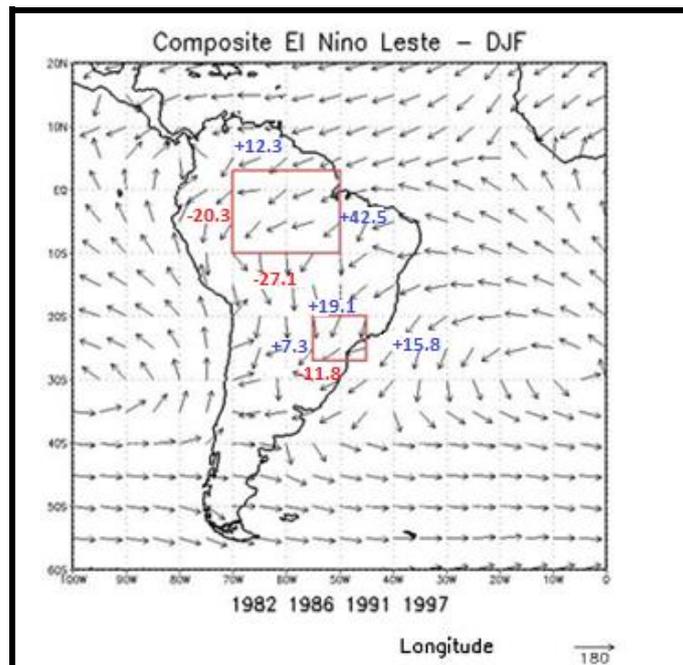


Figura 2- *Composites* El Niño Central e Leste em São Paulo durante o verão DJF

Essas diferenças de efeitos nos diferentes tipos de ENOS, podem ser explicadas pelo cálculo de anomalia representados na Figura 3. Ela representa, em isolinhas, a corrente de jato (250hPa) localizada no sul da América do Sul que se intensifica em anos de El Niño. Porém é visto que há uma diferença no padrão do jato para os diferentes tipos de El Niño. No caso do EEN o jato está localizado com uma grande intensidade inclusive sem grandes desvios positivos até o Oceano Atlântico. Já no caso do CEN, é notável a diferença de intensidade da corrente, principalmente sobre o sudeste do Brasil, com números negativos, identificando assim uma menor intensidade dos ventos. Ainda na Figura 3, os mapas de anomalia da corrente de jato em vetores mostraram, no CEN de 2004, um sentido oposto (de leste para oeste) na corrente de jato, explicando assim, a diminuição de intensidade do jato, diferente do que é visto em 1997, em que, o fluxo (de oeste para leste) está localizado entre o Uruguai e o sul do Brasil com uma intensidade muito superior, quando comparados entre si.

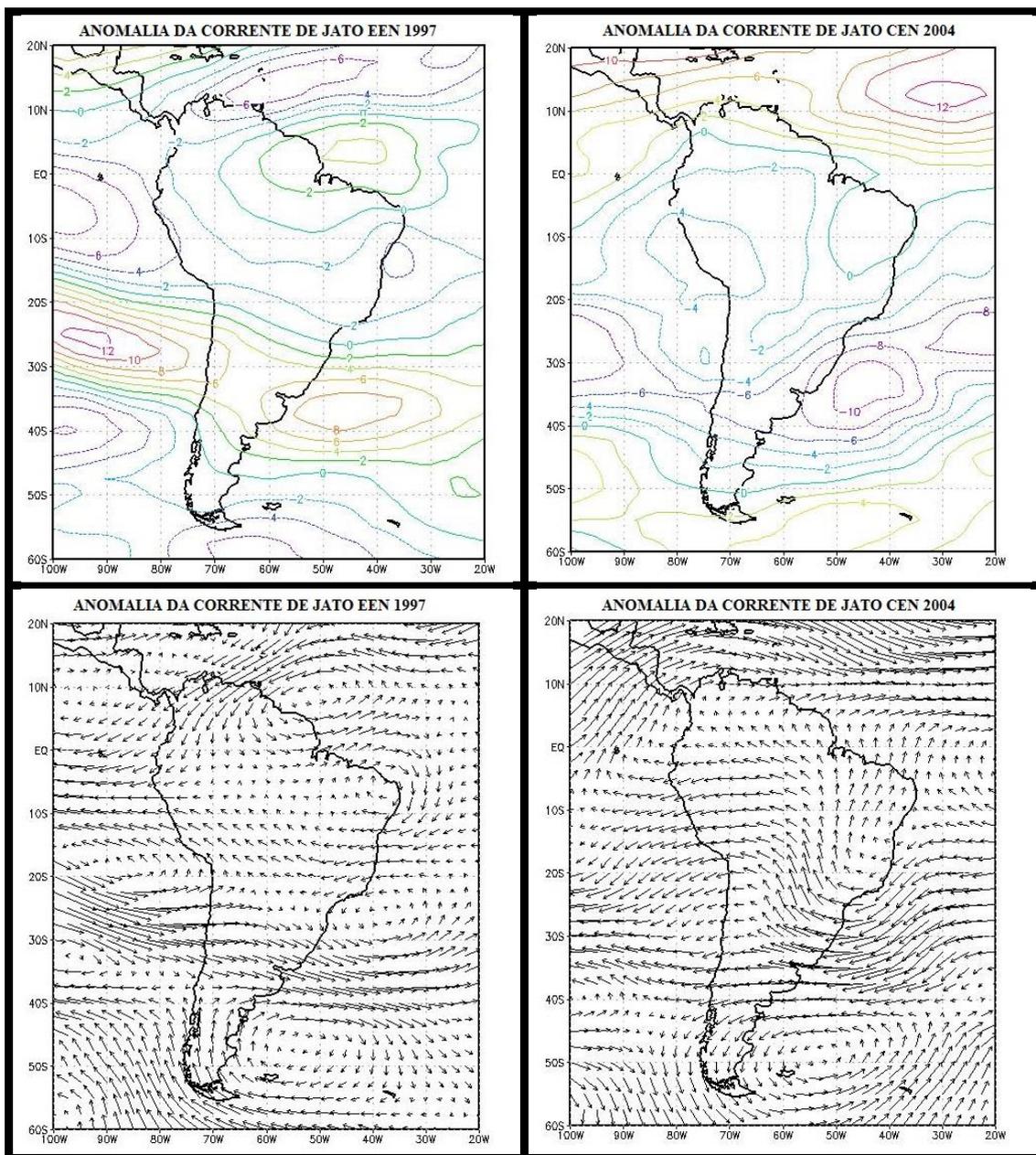


Figura 3- Anomalia (isolinhas e vetores) da corrente de jato em 250hPa do El Niño Leste e Central

Sabe-se que o EEN, possui uma intensidade da corrente de jato muito forte e mesmo assim essa intensidade não causa efeito nos volumes de precipitação no estado de São Paulo, em especial. A Figura 4, apresenta o fluxo de umidade integrado na vertical, de 1997, em que, houve um forte EEN. Sabe-se que esse ano (DJF) foi marcado por um número menor de passagens de frentes frias na região, porém não afetou no volume da

precipitação (669mm). Isso tudo pode ser explicado, pelo fato de que, em anos de EEN há uma compensação do transporte de umidade da região da Amazônia para São Paulo, ou seja, a umidade que é oriunda da região da Amazônia é maior do que em um período neutro. Como é mostrado na Figura 16, na borda norte da caixa de São Paulo em 27° S, em um período neutro a convergência de umidade na região é de positiva (+) de 7,1 kg/kg de umidade, já em 1997 (Figura 4) há uma convergência positiva (+) de 11,6 kg/kg. (HOREL, HAHMANN e GEISLER, 1989)

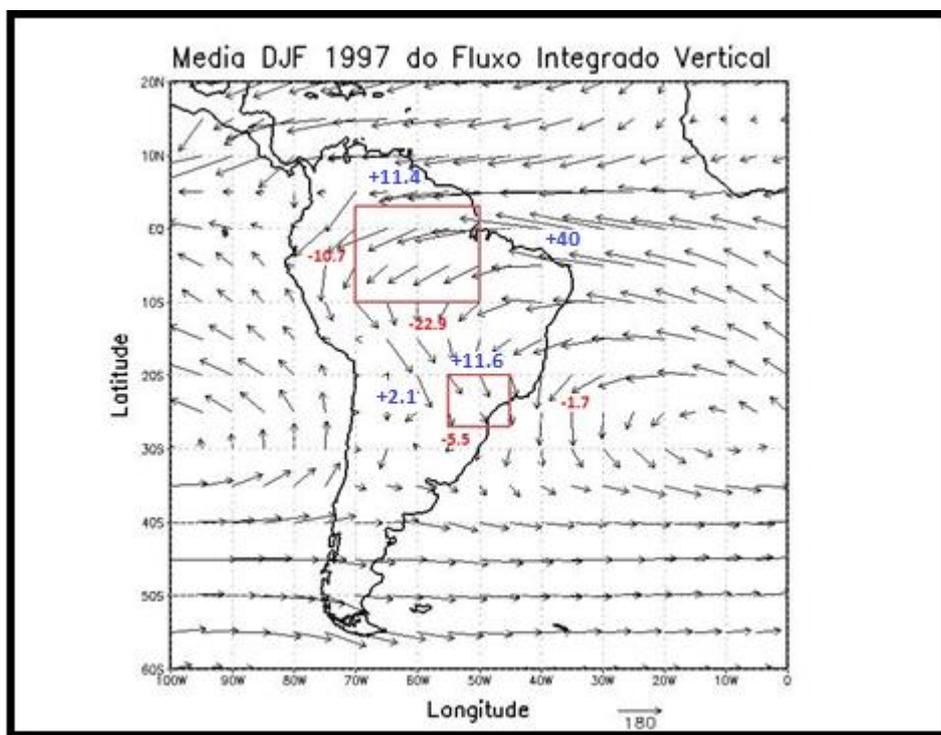


Figura 4- Fluxo de umidade integrado na vertical de 1997 - ano com presença de EEN

6 CONCLUSÃO

O transporte de umidade da Amazônia para o sudeste do Brasil é um dos mecanismos climáticos de extrema importância no país, sendo parcialmente o responsável pelo regime de chuva em São Paulo durante o verão (DJF). Os histogramas pluviométricos (Figuras 7 e 9) apresentaram diversas tendências na precipitação no período estudado (1979 – 2015), com reduções significativas na precipitação, principalmente entre os anos de 2010 à 2015, sendo que o verão de 2014-2015 que foi o ano de menor precipitação registrado para as duas localidades.

Em ano de ENOS, esta contribuição do transporte de umidade da Amazônia é mais importante, pois ocorre a intensificação da corrente de jato (250 hPa), com um aporte maior de umidade. Este item compensa o menor número de passagem de sistemas frontais. Foi visto, também, que há diferenças entre os dois tipos de ENOS analisados em situações de CEN a direção dos vetores é contrária ao padrão da corrente, indicando um transporte mais baixo. Por outro lado quando há EEN, os vetores e as isolinhas, da corrente de jato, mostram essa intensificação. Nos anos considerados secos, a intensidade do fluxo de umidade integrado na vertical mostrou-se abaixo do esperado para o período, principalmente no verão de 2014/2015. A Amazônia, por sua vez, apresentou uma estabilidade maior na intensidade e na distribuição de umidade na região ao longo do período, com poucos períodos de seca (anos de 2003, 2009 e 2014-2015). O que se sabe, após o estudo do transporte de umidade, é que essa diminuição no volume das precipitações não estão relacionadas à umidade vinda da Amazônia, pois os cálculos mostraram que ao longo do período estudado, a quantidade oriunda esteve dentro da média climatológica registrada.

Como sugestão de trabalhos futuros sugere-se: a continuação do monitoramento do fluxo integrado da vertical nos verões seguintes, utilizando a mesma metodologia, separando-os em anos neutro, e EEN e CEN, identificar a quantidade de umidade que tem permanecido na região centro-oeste do Brasil, se isso possui uma correlação ou não com o decréscimo de precipitação na região Sudeste em alguns anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRAUT, J. M.; SATYAMURTY, P. Precipitation and water vapor transport in the Southern Hemisphere with Emphasis on the South American Region. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, p. 1902-1912, Março 2009.

BORMA, L. D. S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 367 p.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **J Climate**, v. 2377 - 2394, n. 15, 2002.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event. **Theoretical Applied Climatology**, p. 16, Junho 2015. ISSN 10.1007/s00704-015-1540-9.

HERDIES, D. L.; DIAS, M. A. F. S.; FERREIRA, R. N. The moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 4242-4250, 2002. ISSN 10.1029/2001JD000997.

HOREL, J. D.; HAHMANN, A. N.; GEISLER, J. E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. **Journal of Climate**, v. 2, n. 11, p. 1388 - 1403, 1989.

OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Rainfall and Climate Variability: longterm trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Climate Research**, v. 61, n. 2, p. 93 - 107, 2014. ISSN 10.335/cr01241.

SAMPAIO, G. D. O. **El Niño e você - o fenômeno climático**. 1. ed. São José dos Campos: Transtec Editorial, v. 2001, 2001.

SILVA DIAS, M. A. F. et al. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116 (3-4), p. 705-722, 2012.

TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Influence of Central and East ENOS on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. **International Journal of Climatology**, n. 35, p. 2045 - 2064, July 2015. ISSN 10.1002/joc.4106.