

Artigo

## Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície

Vinicius Machado Rocha<sup>1</sup>, Francis Wagner Silva Correia<sup>2</sup>, Paulo Ricardo Teixeira da Silva<sup>1</sup>,  
Wesley Brito Gomes<sup>1</sup>, Leonardo Alves Vergasta<sup>1</sup>, Rildo Gonçalves de Moura<sup>1</sup>,  
Maximiliano da Silva Pereira Trindade<sup>2</sup>, Adriano Lima Pedrosa<sup>2</sup>,  
Josyanne Jhennifer Santos da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Instituto Nacional  
de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil.*

<sup>2</sup>*Curso de Graduação em Meteorologia, Universidade do Estado do Amazonas,  
Manaus, AM, Brasil.*

Recebido em 20 de Setembro de 2016 – Aceito em 17 de Abril de 2017

### Resumo

O objetivo desse trabalho é avaliar a distribuição dos componentes do balanço de água e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica, abordando os mecanismos físicos associados ao processo de reciclagem. De forma geral, a bacia amazônica se comporta como um sumidouro de umidade da atmosfera, recebendo vapor d'água tanto do transporte de origem oceânica quanto da evapotranspiração da floresta por meio do processo de reciclagem de precipitação. Em escala regional, a Amazônia representa uma importante fonte de umidade para outras regiões da América do Sul, contribuindo para o regime da precipitação em outras áreas do continente. Na média, a reciclagem de precipitação é da ordem de 20% na bacia amazônica, com valores variando entre 15% na porção norte e 40% na porção sul. Dessa forma, do total da precipitação na bacia, aproximadamente, 20% é decorrente do processo de evapotranspiração local; indicando que, a contribuição local para a precipitação total representa um percentual significativo no balanço de água regional e desempenha um importante papel no ciclo hidrológico amazônico. Entretanto, as variabilidades e mudanças no sistema climático devido tanto às variações naturais quanto antropogênicas (aumento na emissão de gases estufa e desflorestamento) podem afetar a reciclagem e o ciclo hidrológico regional.

**Palavras-chave:** Amazônia, reciclagem de precipitação, transporte de umidade, interação biosfera-atmosfera, reanálises Era-Interim.

## Precipitation Recycling in the Amazon Basin: The Role of Moisture Transport and Surface Evapotranspiration

### Abstract

The objective of this study is to evaluate the distribution of water budget components and precipitation recycling in the Amazon basin addressing the physical mechanisms involved in the recycling process. In general, the Amazon basin acts as a sink for atmospheric moisture, receiving water vapor transported from the ocean and from precipitation recycled from evapotranspiration by the forest. At the regional scale, the Amazon basin is an important source of water vapor, contributing to precipitation in other remote locations of South America. Here we show, on average, 20% of precipitation in the Amazon basin is recycled, varying between 15% in the northern portion and 40% in the southern portion. Thus, approximately 20% of the total rainfall in the basin is derived from local evapotranspiration processes indicating that the local contribution to the total precipitation represents a significant contribution to the regional water budget and plays an important role in the Amazon hydrological cycle. However, the variability and changes in the climate system due to both natural and anthropogenic forcings (such as the increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere and changes in land use and land cover – deforestation) can affect the precipitation recycling and regional hydrologic cycle.

**Keywords:** Amazon basin, precipitation recycling, moisture transport, biosphere-atmosphere interaction, ERA-Interim reanalysis dataset.

## 1. Introdução

A Amazônia é a única grande extensão contínua de floresta tropical úmida do mundo, com uma área de aproximadamente 6,5 milhões de km<sup>2</sup>, que corresponde a 56% das florestas tropicais da Terra, desempenhando um importante papel nas trocas de energia, umidade e massa entre a superfície continental e a atmosfera, fundamentais para a manutenção do clima regional e global, tais como: o armazenamento e absorção do excesso de carbono da atmosfera, o transporte de gases traço, aerossóis e vapor d'água para regiões remotas e, também, a reciclagem de precipitação, de grande importância para a manutenção de seus ecossistemas. A floresta amazônica também atua como fonte indispensável de calor para a atmosfera global através de sua intensa evapotranspiração e liberação de calor latente na média e alta troposfera tropical, contribuindo na geração e manutenção da circulação atmosférica em escalas regional e global (Artaxo *et al.*, 2005; Fearnside, 2005; Marengo, 2006; Malhi *et al.*, 2008; Nobre *et al.* 2009a,b; Satyamurty *et al.*, 2013).

No que concerne ao balanço de água, a bacia amazônica se comporta como sumidouro de umidade da atmosfera, recebendo vapor d'água tanto do transporte de origem oceânica quanto da evapotranspiração produzida pela própria floresta tropical. Com relação à circulação regional, a Amazônia representa uma importante fonte de umidade para o Centro, Sudeste e Sul do Brasil, assim como para o norte da Argentina, incluindo a bacia do Prata, contribuindo para o regime da precipitação nessas regiões (Marengo *et al.*, 2004; Marengo, 2006; Vera *et al.* 2006; Correia *et al.*, 2007; Satyamurty *et al.* 2013).

O conceito de reciclagem de precipitação refere-se ao mecanismo de retroalimentação “*feedback*” entre a superfície e a atmosfera onde a evapotranspiração local contribui, significativamente, na precipitação total sobre uma região. Em outras palavras, a reciclagem de precipitação pode ser definida como a quantidade de água que evapotranspirada da superfície terrestre em uma determinada região retorna na forma de precipitação sobre a mesma região (Brubaker *et al.* 1993; Eltahir e Bras, 1994; Trenberth, 1999; Rocha *et al.*, 2015). Utilizando dados observacionais, de reanálises e modelos de circulação da atmosfera, diferentes estudos foram realizados com o objetivo de quantificar e descrever a distribuição da reciclagem de precipitação em diferentes regiões do planeta: Budyko (1974), Molion (1975), Marques *et al.* (1977), Brubaker *et al.* (1993), Eltahir e Bras (1994 e 1996), Savenije (1995), Trenberth (1999), Costa e Foley (1999), Bosilovich e Schubert (2001), Nóbrega *et al.* (2005), Van der Ent *et al.* (2010), Satyamurty *et al.* (2013).

Os resultados desses estudos, apesar de apresentarem diferenças quantitativas, demonstram que o mecanismo de reciclagem é um forte indicador da importância dos processos de superfície e do clima no ciclo hidrológico, assim como, da sensibilidade climática relacionada às alterações nesses processos. Entretanto, devido à importância da flo-

resta amazônica para o balanço de água em escalas regional e global, é de fundamental importância o entendimento da distribuição da reciclagem de precipitação na Amazônia utilizando fontes de dados mais atualizadas. Desta forma, o objetivo desse artigo é avaliar a distribuição dos componentes do balanço de água e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica, abordando os mecanismos físicos associados ao processo de reciclagem.

## 2. Material e Métodos

Neste estudo o método adotado para quantificar a reciclagem de precipitação baseia-se no balanço de umidade da atmosfera descrito por Eltahir e Bras (1994). Dados de reanálises do ERA-Interim, do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF (Dee *et al.*, 2011), para o período de 1980 a 2005, foram utilizados para estimar a variabilidade espaço-temporal dos componentes do balanço de água e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica. Os dados de reanálises são: precipitação, fluxo de calor latente (utilizado para estimar a evapotranspiração), pressão ao nível médio do mar e da umidade específica do ar, velocidade zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 e 300 hPa. As reanálises estão na resolução de 1,0 x 1,0° abrangendo a América do Sul e estão disponíveis em: <http://apps.ecmwf.int/datasets/>.

### 2.1. Método da reciclagem de precipitação

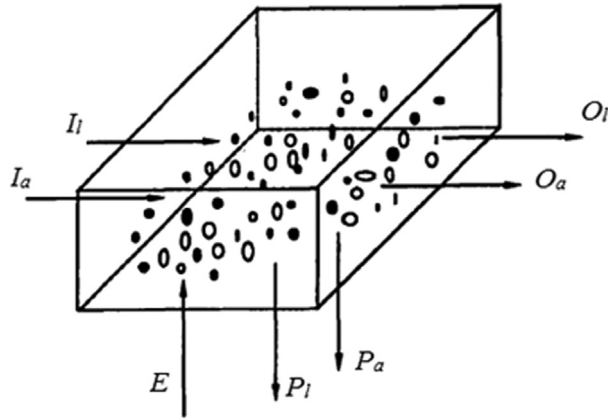
O método descrito por Eltahir e Bras (1994) para estimar a reciclagem de precipitação baseia-se na conservação de massa em um volume de controle atmosférico sobre uma determinada região. Nesse método, dois pressupostos básicos são assumidos: (i) a umidade atmosférica é bem misturada e (ii) a taxa de variação da umidade na atmosfera é insignificante em uma escala de tempo mensal ou superior. Para um volume de controle finito na atmosfera localizado em qualquer ponto de uma região, a conservação de massa requer as seguintes relações:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_l}{\partial t} = I_l + E - O_l - P_l \\ \frac{\partial N_a}{\partial t} = I_a - O_a - P_a \end{cases} \quad (1)$$

onde os subscritos *l* e *a* referem-se às moléculas que evaporaram dentro e fora da região, respectivamente, assim como *I* e *O* são os fluxos de entrada e saída, *P* é a precipitação e *E* a evapotranspiração, ambas dadas em mm dia<sup>-1</sup> (Fig. 1).

Assumindo que, a partir de duas fontes de origem distintas (*l* e *a*) as moléculas de vapor d'água são bem misturadas na camada limite, pode-se determinar que:

$$\beta = \frac{P_l}{(P_l + P_a)} = \frac{O_l}{(O_l + O_a)} = \frac{N_l}{(N_l + N_a)} \quad (2)$$



**Figura 1** - Diagrama conceitual do volume de controle atmosférico. Fonte: Eltahir e Bras (1994).

onde  $\beta$  é a razão de reciclagem da precipitação. Em qualquer local na região,  $\beta$  refere-se a proporção da precipitação reciclada sobre a área. Em uma escala de tempo mensal ou superior, a taxa de variação no armazenamento de vapor d'água é muito pequena comparada aos fluxos de vapor d'água na atmosfera. Considerando essa informação à característica bem misturada da atmosfera, pode-se determinar que a variação no estoque de qualquer uma das duas fontes de umidade, seja  $N_l$  (local) ou  $N_a$  (advectiva), é pequena em comparação ao seu fluxo. Logo, reorganizando a Eq. (1), obtêm-se:

$$\begin{cases} I_l + E = O_l + P_l \\ I_a = O_a + P_a \end{cases} \quad (3)$$

Substituindo  $O_l$ ,  $P_l$ ,  $O_a$  e  $P_a$  da Eq. (2) nas Eq. (3):

$$I_l + E = \beta(O_l + O_a) + \beta(P_l + P_a) \quad (4a)$$

$$I_a = (1-\beta)(O_l + O_a) + (1-\beta)(P_l + P_a) \quad (4b)$$

Dividindo a Eq. (4a) pela Eq. (4b), e reorganizando, tem-se:

$$\beta = \frac{(I_l + E)}{(I_l + E + I_a)} \quad (5)$$

A Eq. (5) é o método proposto por Eltahir e Bras (1994) para estimar a reciclagem de precipitação. Substituindo  $I$  por  $F$  e considerando toda a bacia amazônica, a Eq. (2.5) pode ser reescrita da seguinte maneira:  $\beta = E/(F_{in} + E)$ , onde  $E$  e  $F_{in}$  são a evapotranspiração regional e o fluxo de umidade que entra na bacia, respectivamente.

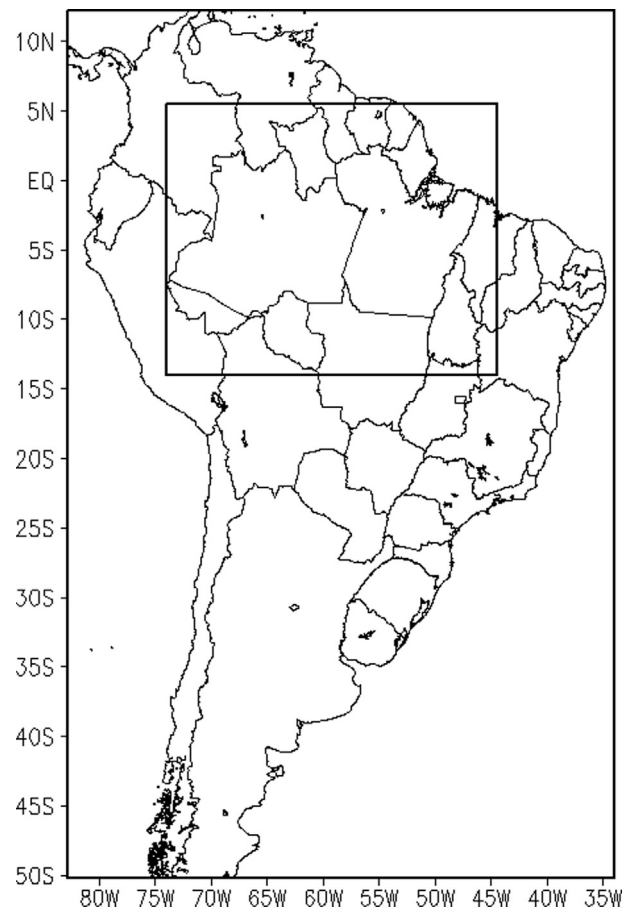
### 3. Resultados e Discussão

A maioria dos estudos sobre reciclagem de precipitação tem demonstrado que o mecanismo é fortemente influenciado pela precipitação total, evapotranspiração da superfície e pelo transporte de vapor d'água sobre a região. A seguir são avaliados a variabilidade espaço-temporal dos

componentes do balanço de umidade e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica. O domínio da área abrange a maior parte da América do Sul (Fig. 2).

#### 3.1. Precipitação e evapotranspiração

As Figs. 3 e 4 apresentam, respectivamente, a distribuição da precipitação e evapotranspiração sobre o continente sul americano representativas do início das estações. Na Amazônia, a precipitação apresenta significativa variabilidade espaço-temporal determinada pela influência de diferentes sistemas de escala local, mesoescala, escala sinótica e de grande escala que atuam na região (Marengo e Nobre, 2009; Nobre *et al.*, 2009b). A precipitação média anual é de aproximadamente 2.300 mm, apresentando três regiões com valores mais intensos na precipitação. O primeiro localizado no noroeste da Amazônia, com chuvas acima de 3.500 mm ano<sup>-1</sup> associadas à condensação do ar úmido por efeito orográfico sobre a Cordilheira dos Andes (Marengo e Nobre, 2009). O segundo máximo de precipitação, localizado sobre a foz do Rio Amazonas, circulações locais (brisa marítima) relacionadas às Linhas de Instabilidade (Cohen *et al.*, 1995). O terceiro centro localiza-se na parte central-sul da região amazônica, sobretudo durante os meses de JFM (verão austral), sendo influenciado pela pre-

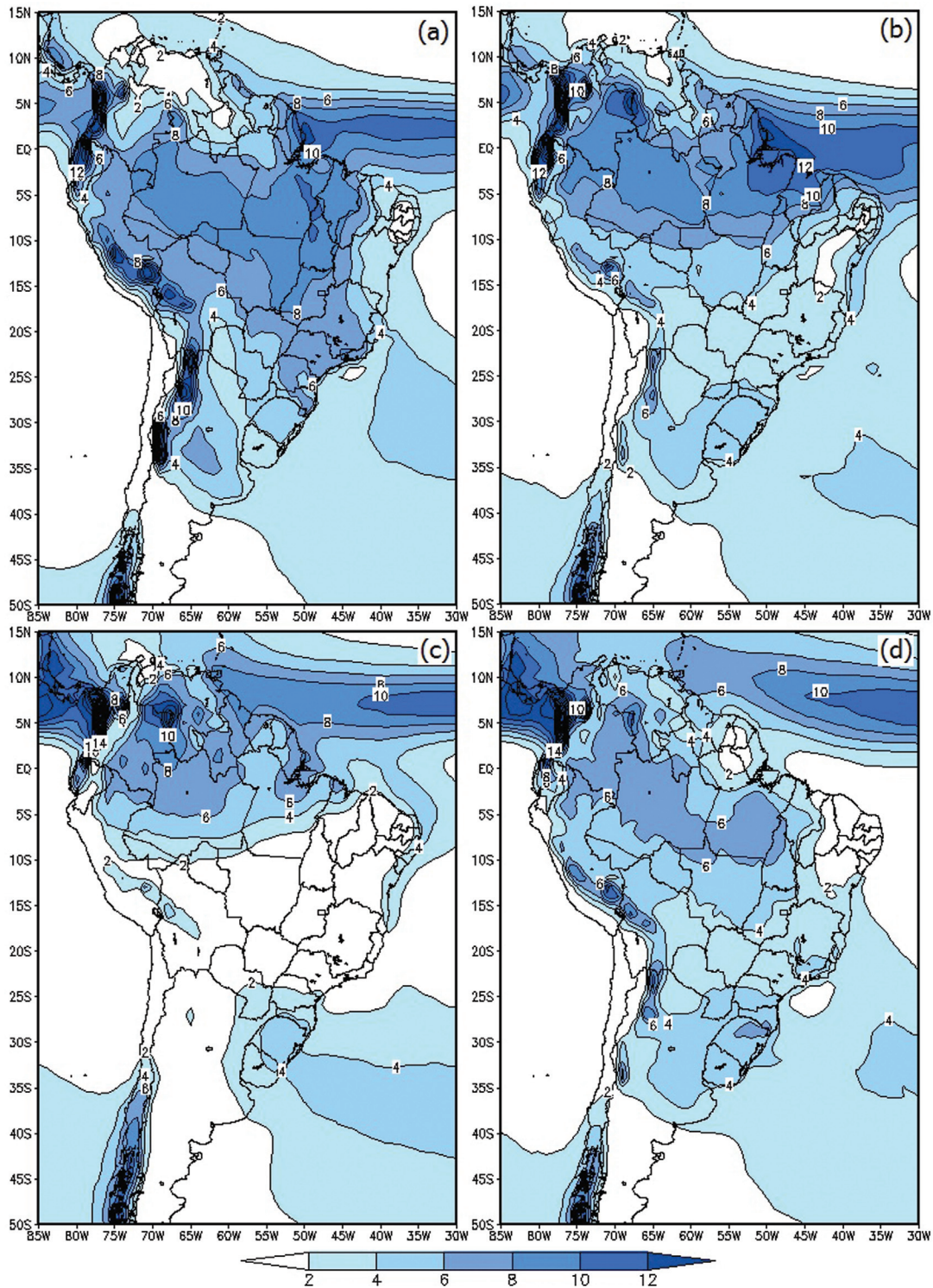


**Figura 2** - Domínio da área de estudo. Bacia amazônica em destaque.

sença constante de aglomerados convectivos associados a sistemas frontais sob a área de influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A maior parte da América do Sul tropical e subtropical recebe mais de 50% do seu total anual de precipitação no verão austral, sob a forma de

precipitação convectiva com forte variação sazonal e diurna (Nobre *et al.*, 2009b; Satyamurty *et al.*, 2013).

Em escala sazonal, a Fig. 3(a-d) apresenta o início da estação chuvosa, ou forte atividade convectiva, no sul da Amazônia durante a primavera (SON). Observa-se que os



**Figura 3** - Precipitação média sazonal ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) sobre a América do Sul utilizando as reanálises do ERA-Interim (ECMWF), para o período de 1980 a 2005: (a) verão – DJF; (b) outono – MAM; (c) inverno – JJA; (d) primavera – SON.

máximos de chuva situados na parte oeste e central da Amazônia ocorrem em DJF, associados com a posição da Alta da Bolívia (AB). No outono, a banda de máxima precipitação está localizada na Amazônia central, estendendo-se desde o setor oeste da bacia até a foz do Rio Amazonas. Em JJA, o centro de máxima precipitação desloca-se para o norte e situa-se sobre a América Central, estabelecendo a estação seca (sem grande atividade convectiva) sobre a Amazônia central e meridional que se encontram sob o domínio do ramo descendente da Célula de Hadley. Entretanto, neste período, o máximo de precipitação ocorre na Amazônia setentrional. Os trimestres mais secos na região Norte do Brasil mudam progressivamente de SON no extremo norte, para ASO, numa longa faixa latitudinal desde o oeste da região Nordeste do Brasil; para JAS no vale da bacia amazônica, sobretudo a oeste, e para JJA na parte sul.

A evapotranspiração proveniente da floresta amazônica representa uma das principais fontes de vapor d'água para a bacia e também para outras regiões do continente sul americano, exercendo um papel fundamental no processo de geração de precipitação. Além disso, a contribuição da evapotranspiração local para a precipitação sobre a bacia amazônica representa uma porção significativa do balanço de água regional e exerce papel de destaque no ciclo hidrológico amazônico, influenciando os padrões espaciais de umidade do solo, a produtividade e a ocorrência de eventos extremos, tais como enchentes e secas (Rocha *et al.*, 2009; Satyamurty *et al.*, 2013).

De acordo com a Fig. 4(a-d), observa-se que a evapotranspiração na Amazônia está próxima daquela encontrada em experimentos micrometeorológicos realizados na bacia, tal como o Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA (Avissar e Nobre, 2002), com valores variando entre 3,5 e 4,0 mm dia<sup>-1</sup>. Os altos índices de evapotranspiração na bacia amazônica em SON e DJF estão associados à maior disponibilidade de energia durante as estações de primavera e verão, respectivamente. Durante o outono e inverno austral, devido à variação sazonal da ZCIT e o deslocamento da banda de nebulosidade para o norte, diminui a atividade convectiva sobre a Amazônia central e meridional, aumentando a radiação solar incidente à superfície e, conseqüentemente, a evapotranspiração.

### 3.2. Transporte de umidade

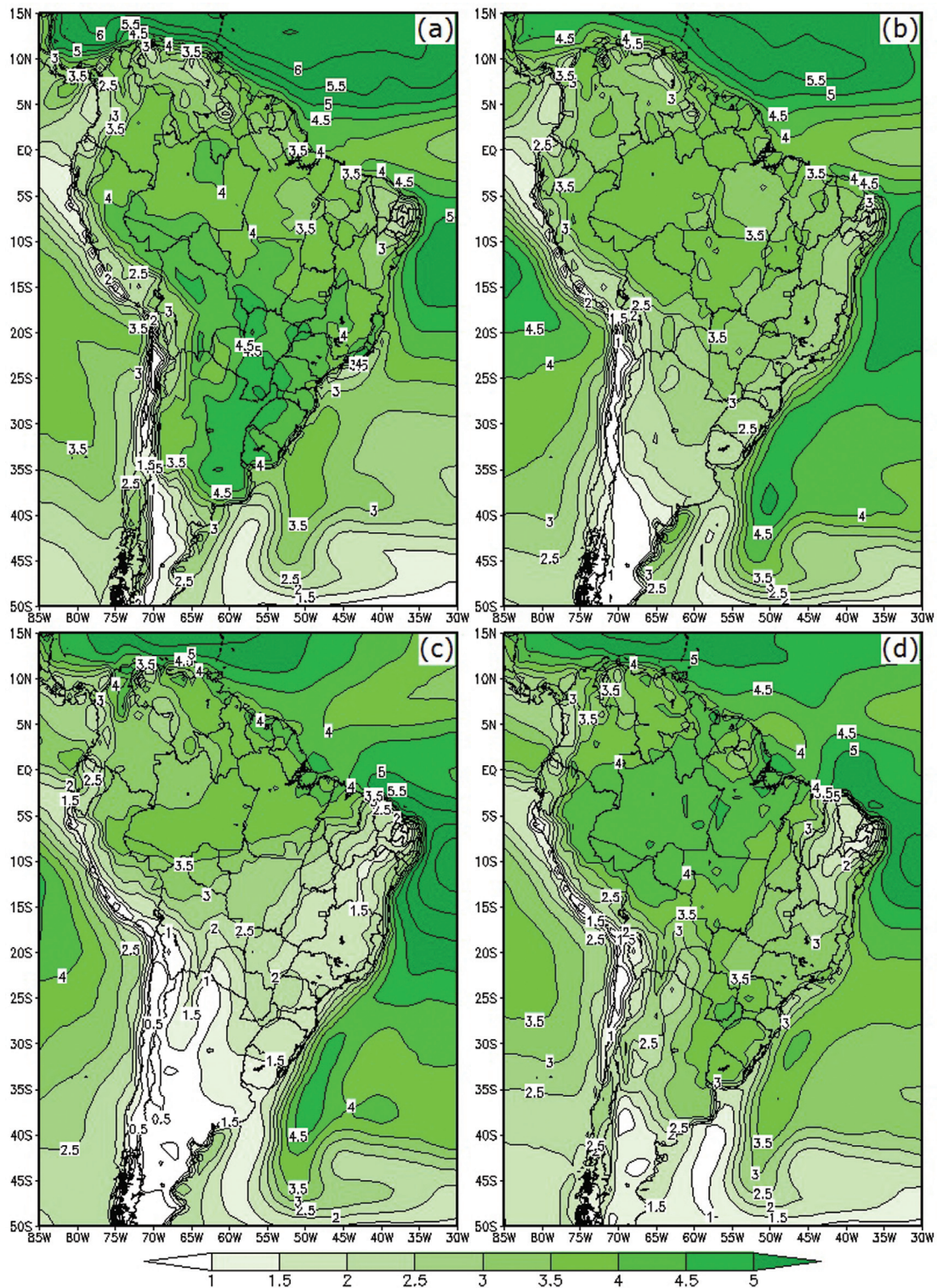
A Fig. 5 apresenta os campos médios sazonais do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente sobre a América do Sul. Em DJF observa-se uma baixa térmica (movimento circular ciclônico e convergente) persistente sobre a região do Chaco posicionada entre 20° e 30°S, associada à máxima nebulosidade sobre a Amazônia central e o Altiplano da Bolívia no período em que a ZCAS é mais ativa e intensa. Uma importante característica da circulação equatorial durante o verão e outono são os ventos alísios que transportam umidade para o interior da bacia

amazônica, associados à maior pressão atmosférica no Oceano Atlântico tropical norte. Conforme apresentam Arraut e Satyamurty (2009), Arraut *et al.* (2012), Satyamurty *et al.* (2013) e Drumond *et al.* (2014), esse fluxo de vapor d'água proveniente do Atlântico equatorial é a principal fonte de umidade para a Amazônia. Quando os ventos alísios encontram os Andes o fluxo de vapor d'água é desviado para sudeste e a umidade, por sua vez, é transportada da Amazônia para o Centro-Sul do Brasil, bacia do Prata e norte da Argentina através do jato de baixos níveis (JBN) canalizado à leste da cadeia de montanhas (Fig. 5a). Nesse período, a atividade convectiva e a precipitação na Amazônia central e meridional (Fig. 3a) estão associadas à intensa convergência de umidade sobre essas áreas. O JBN da América do Sul parece ocorrer durante todo o ano, transportando massas de ar úmida tropical da Amazônia para o Centro-Sul do Brasil e norte da Argentina, principalmente no verão, e conduzindo massa de ar tropical marítima da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) mais frequentemente no inverno. As características da circulação atmosférica observadas sobre a América do Sul tropical e subtropical durante o verão austral configuram o que Arraut e Satyamurty (2009) e Nobre *et al.* (2009b) denominam de regime de Monção de Verão da América do Sul (MVAS), determinado pela intensa convergência de umidade sobre a Amazônia e o Brasil Central. A MVAS se enfraquece entre março e maio, quando a atividade convectiva progride-se em direção ao norte. Neste período, a precipitação se intensifica, sobretudo, na Amazônia setentrional e no Nordeste do Brasil (Fig. 3b).

Em JJA, a climatologia sazonal da circulação em baixos níveis (Fig. 5c) mostra que há uma convergência dos ventos alísios de sudeste e nordeste transportando umidade para a América Central, e também para o leste do Nordeste do Brasil e o noroeste da América do Sul, o que aumenta a precipitação sobre essas áreas. Por outro lado, a divergência de umidade é preponderante sobre a Amazônia meridional e a porção central do continente, determinando a redução da atividade convectiva e, portanto, da precipitação, configurando-se a estação seca na América do Sul.

### 3.3. Reciclagem de precipitação

A umidade que da origem à precipitação sobre regiões continentais é proveniente de duas fontes: (i) advecção de vapor d'água oriundo de outras regiões por meio de movimentos de massas de ar e (ii) o vapor d'água local por meio da evapotranspiração da superfície da própria região. A evapotranspiração tem efeito pronunciado quando o fluxo de umidade é menos significativo. O transporte de umidade para a região depende da dinâmica atmosférica e das fontes de origem da umidade. A evapotranspiração, por sua vez, depende da disponibilidade de umidade na área ou abaixo da superfície (zona insaturada), que é evaporada diretamente ou através da transpiração da vegetação. Conseqüentemente, qualquer alteração de uso e cobertura da terra e do clima que modifiquem esses processos pode

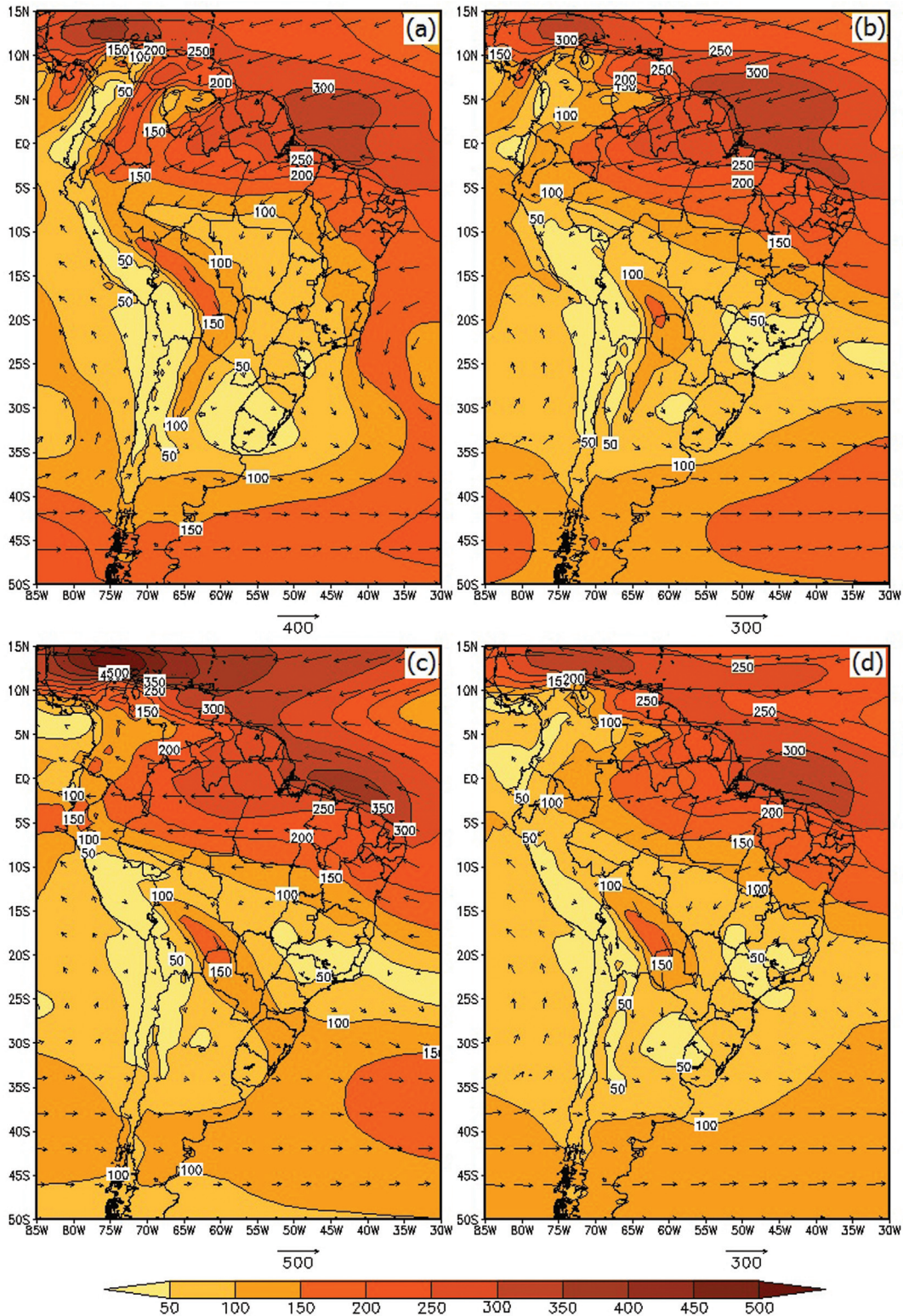


**Figura 4** - Evapotranspiração média sazonal ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) sobre a América do Sul utilizando as reanálises do ERA-Interim (ECMWF), para o período de 1980 a 2005: (a) verão – DJF; (b) outono – MAM; (c) inverno – JJA; (d) primavera – SON.

afetar a reciclagem de precipitação, assim como a precipitação total sobre a região.

A Fig. 6(a-d) apresenta os campos médios sazonais da reciclagem de precipitação sobre a América do Sul. De

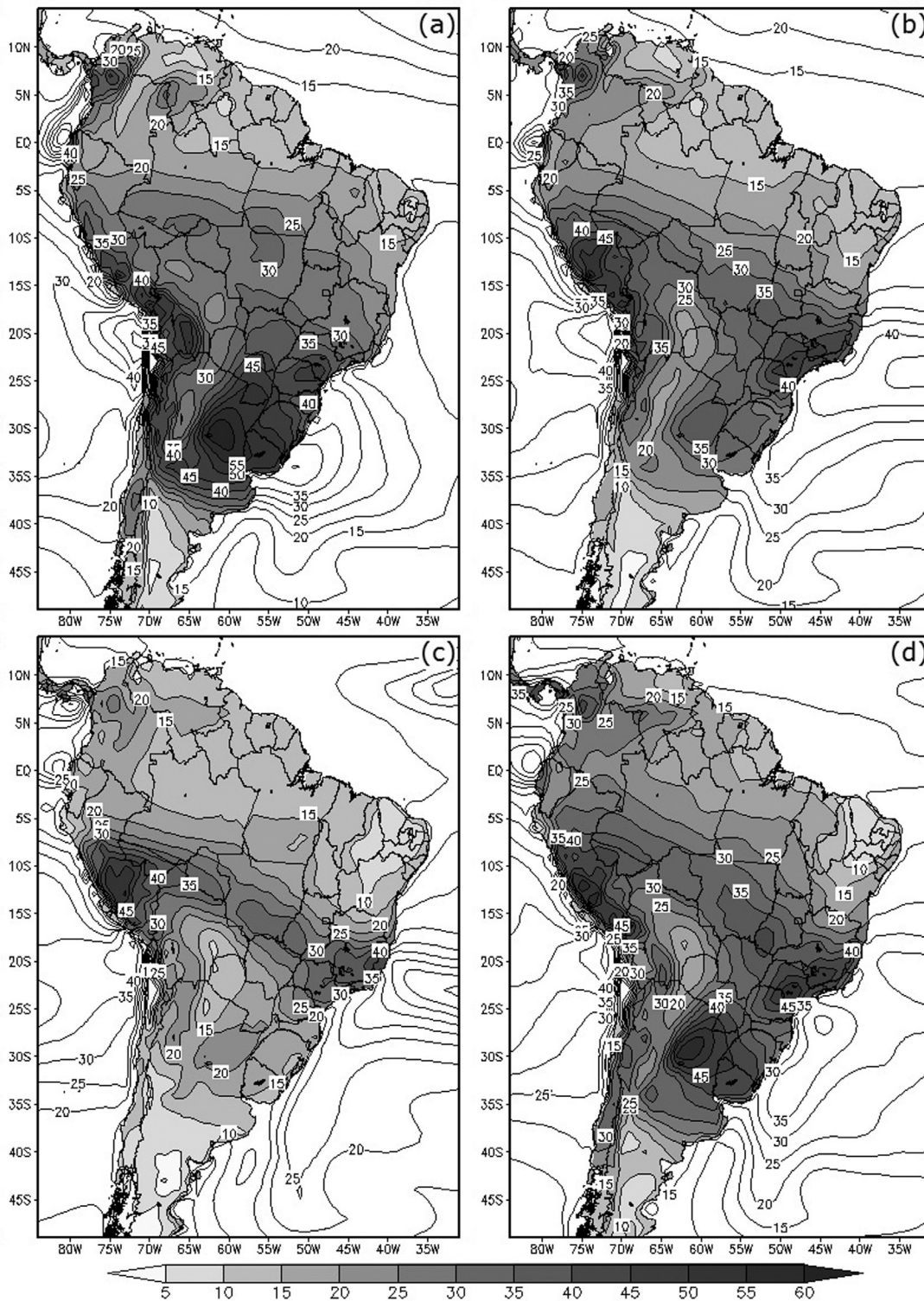
modo geral, a reciclagem de precipitação é mais intensa sobre a porção centro-sul do continente, sendo diretamente influenciada pela evapotranspiração dessa região. Em DJF, a reciclagem de precipitação apresenta valores maiores



**Figura 5** - Média sazonal do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) sobre a América do Sul utilizando as reanálises do ERA-Interim (ECMWF), para o período de 1980 a 2005: (a) verão – DJF; (b) outono – MAM; (c) inverno – JJA; (d) primavera – SON.

(menores) sobre o setor sul (norte) da bacia amazônica associados à menor (maior) intensidade do fluxo de umidade e valores altos (baixos) da evapotranspiração. No

entanto, os máximos são observados na região da bacia do Prata, área em que a evapotranspiração apresenta valores significativos e onde ocorre a desintensificação do JBN



**Figura 6** - Média sazonal da reciclagem de precipitação (%) sobre a América do Sul utilizando as reanálises do ERA-Interim (ECMWF), para o período de 1980 a 2005: (a) verão – DJF; (b) outono – MAM; (c) inverno – JJA; (d) primavera – SON.

situado a leste dos Andes. Os valores da reciclagem de precipitação na Amazônia tendem a aumentar de leste para oeste devido à redução da intensidade do fluxo de vapor d'água para oeste. Os maiores valores da reciclagem obser-

vados no sudoeste da bacia amazônica durante o outono mostram que o efeito do aumento na evapotranspiração se sobrepõe a redução do transporte de umidade naquela região. Os máximos observados sobre o continente ocor-



reram no Pantanal e Sudeste do Brasil e, segundo Trenberth (1999) e Nóbrega *et al.* (2005), estão associados à evapotranspiração, devido ao alto teor de umidade do solo, e a redução do transporte de umidade próximo a ASAS. Em JJA, embora sobre a Amazônia setentrional a evapotranspiração e a precipitação tenham apresentado valores significativos, o aumento na intensidade do fluxo de umidade foi preponderante para que a reciclagem de precipitação apresentasse valores inferiores em relação à Amazônia meridional. Os máximos observados sobre a América do Sul estão situados na faixa que se estende desde o oeste da bacia amazônica a região Sudeste do Brasil, incluindo o Pantanal, também associados à desintensificação do fluxo de vapor d'água sobre essas áreas. A primavera é a estação em que a reciclagem de precipitação apresentou os maiores valores sobre a bacia amazônica (~ 24%). A evapotranspiração da floresta, que é maior neste período, se sobrepôs ao efeito do fluxo de umidade apresentando-se como o fator preponderante para a reciclagem e a precipitação regional.

Considerando a América do Sul, os valores médios da reciclagem de precipitação variaram entre 5% e 65%, com índices extremos da ordem de 55% a 65% sobre os Andes. Sazonalmente, os valores diminuem do verão para o inverno. Na média anual, a reciclagem de precipitação na bacia amazônica foi de 20%, com valores variando de 40% na porção sul a 15% na porção norte. Com base nos resultados de trabalhos anteriores (ver Rocha *et al.*, 2015) e deste estudo, estima-se que a reciclagem de precipitação na bacia amazônica é da ordem de 20-35%. Esses resultados mostram que, do total da precipitação sobre a bacia amazônica, aproximadamente, 20% é decorrente do processo de evapotranspiração local; mostrando que, a contribuição local para a precipitação total representa um percentual significativo no balanço de água regional. A contribuição advectiva é mais importante para a precipitação sobre a bacia amazônica do que a contribuição local, isto é, aquela decorrente da evapotranspiração. Isso significa que, a advecção de umidade domina o fornecimento de vapor d'água em grande parte da região, no entanto, o papel da evapotranspiração local na reciclagem de precipitação é mais importante no setor sul da bacia. Entretanto, as variabilidades e mudanças naturais e/ou antropogênicas no sistema climático podem afetar de maneira significativa os componentes do balanço de água e, conseqüentemente, a reciclagem de precipitação, influenciando os padrões espaciais de umidade do solo, a produtividade e a ocorrência de eventos extremos, tais como secas e enchentes. Embora os estudos sobre reciclagem de precipitação tenham produzido novos conhecimentos acerca da interação entre os processos de superfície e o ciclo hidrológico, os efeitos das variabilidades e mudanças do clima na reciclagem precisam ser ainda investigados.

### 3.4. Ciclo anual

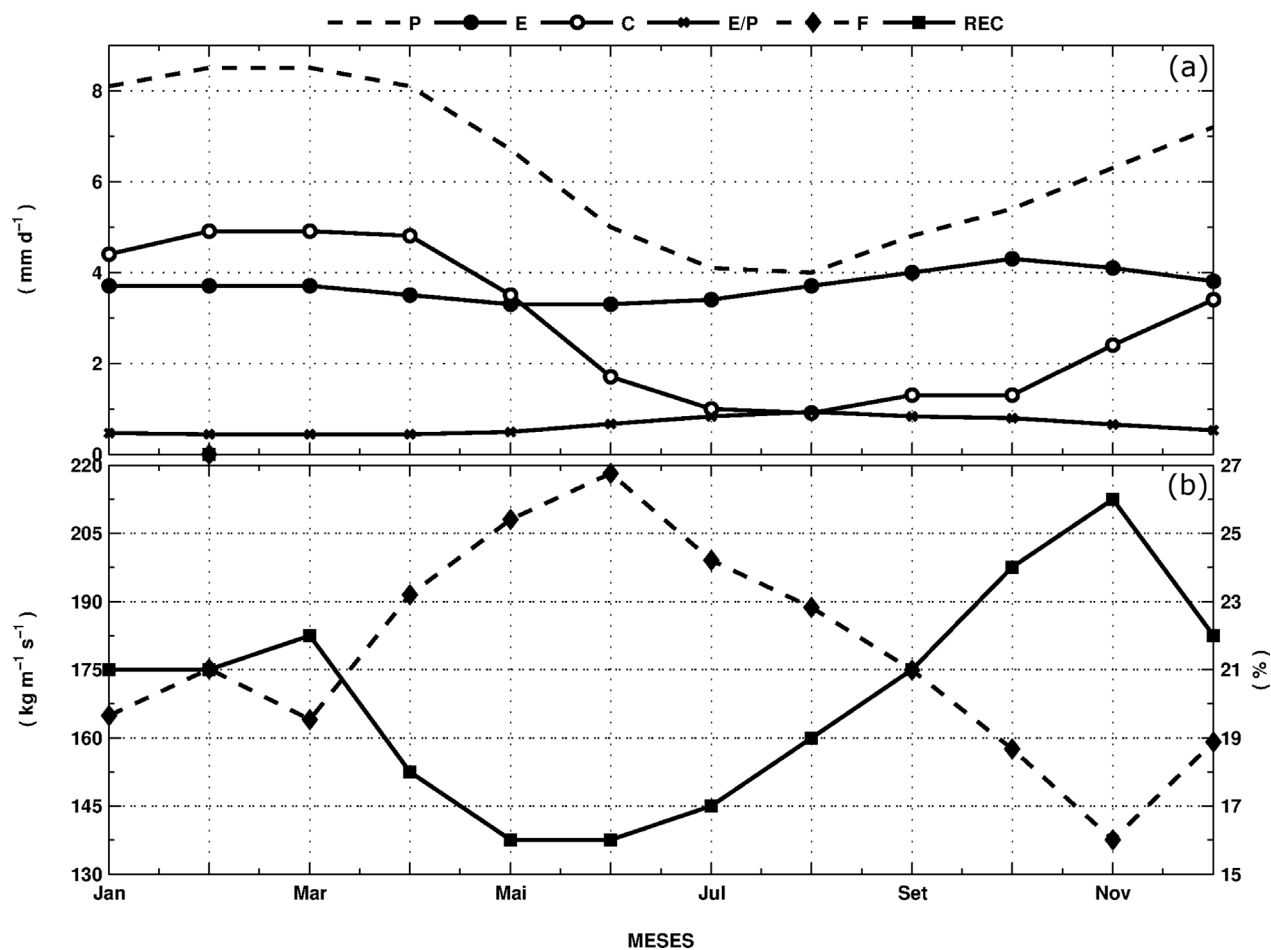
A Fig. 7a,b apresenta o ciclo anual dos componentes do balanço de umidade e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica. Diferente do observado em outros estu-

dos, a precipitação (P) apresenta-se em fase com a convergência de umidade (C) com um coeficiente de correlação de 95% (não mostrado), aproximadamente. O início da estação chuvosa acontece no final da primavera e no começo do verão, com precipitação média de aproximadamente 8,0 mm dia<sup>-1</sup> em DJF (Tabela 1), terminando em abril. A precipitação média durante a estação seca (JJA) é da ordem de 4,4 mm dia<sup>-1</sup>. A variabilidade interanual do início e do fim da estação chuvosa depende dos campos de anomalias de temperatura da superfície do mar no Pacífico ou no Atlântico Tropical, que exercem um papel dinâmico no controle do início e do fim da estação chuvosa (Marengo e Nobre, 2009). A sazonalidade da precipitação está associada ao padrão do regime de monção da América do Sul e à oscilação no sentido norte-sul da ZCIT.

A taxa de evapotranspiração na bacia amazônica é praticamente constante ao longo do ano, comparada às variabilidades da precipitação e convergência de umidade. Ademais, a correlação entre o ciclo da precipitação e o ciclo da evapotranspiração é muito pequena (< 0,2). A razão E/P é um indicador da taxa de evapotranspiração continental (Marengo, 2005 e 2006). Em outras palavras, a razão E/P representa uma fração da precipitação continental. A razão E/P é mais significativa em JJA, indicando que o papel da evapotranspiração no ciclo hidrológico é relativamente mais importante durante a estação seca. No entanto, na média anual, a bacia amazônica se comporta como um sumidouro de umidade da atmosfera, uma vez que, a taxa de precipitação é maior que a taxa de evapotranspiração (P > E), porém, na escala regional a Amazônia representa-se como uma importante fonte de umidade para outras regiões do continente.

As médias mensais dos componentes do ciclo hidrológico na bacia amazônica mostram claramente que, embora a contribuição da evapotranspiração para a precipitação seja importante, o ciclo anual é determinado pela convergência do vapor d'água. Portanto, a variabilidade sazonal na região dos ventos alísios determina o ciclo anual sobre a bacia.

Considerando o ciclo anual do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente e da reciclagem de precipitação, observa-se que, de maneira geral, a reciclagem de precipitação é inversamente proporcional à intensidade do transporte de umidade. Isto é, quanto maior (menor) o fluxo de vapor d'água sobre a Amazônia, menor (maior) é a reciclagem de precipitação. Outrossim, a evapotranspiração exerce efeito preponderante quando o fluxo de umidade é menos intenso. Na bacia amazônica, a reciclagem de precipitação apresenta valores máximos (mínimos) em SON – 24% (JJA – 17%) associados à maior (menor) evapotranspiração da floresta e a desintensificação (intensificação) do fluxo de umidade integrado verticalmente durante a primavera (inverno).



**Figura 7** - Ciclo anual dos componentes do balanço de umidade e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica: (a)  $P$  precipitação ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $E$  evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $C$  convergência de umidade ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); (b)  $F$  fluxo de umidade integrado verticalmente ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $REC$  reciclagem de precipitação (%). Climatologia gerada com base nas reanálises Era-Interim (ECMWF) para o período de 1980 a 2005.

**Tabela 1** - Média das estações sazonais contrastantes e anual dos componentes do balanço de umidade e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica, com base nas reanálises Era-Interim (ECMWF) para o período de 1980 a 2005:  $P$  precipitação ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $E$  evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $C$  convergência de umidade ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $F$  fluxo de umidade integrado verticalmente ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) e  $REC$  reciclagem de precipitação (%).

Componente	Estação úmida (DJF)	Estação seca (JJA)	Média anual
P	8,0	4,4	6,4
E	3,7	3,5	3,7
E/P	0,46	0,8	0,58
C	4,2	1,2	2,9
F	166,3	202,0	178,2
REC	21	17	20

#### 4. Conclusões

O presente estudo avaliou a distribuição dos componentes do balanço de água e reciclagem de precipitação na Amazônia abordando os mecanismos físicos envolvidos

neste processo. A análise observacional foi realizada com base nas reanálises do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF (Era-Interim), no período de 1980 a 2005. Para estimar a reciclagem de precipitação utilizou-se o método fundamentado no balanço de umidade na atmosfera descrito por Eltahir e Bras (1994). Observou-se que, geralmente, a bacia amazônica se comporta como um sumidouro de umidade da atmosfera, recebendo vapor d'água tanto do transporte de origem oceânica quanto da evapotranspiração da floresta por meio do processo de reciclagem de precipitação. Em escala regional, a Amazônia representa uma importante fonte de umidade para outras regiões da América do Sul, contribuindo para o regime da precipitação.

A potencial capacidade de reciclagem de uma região é simplesmente a razão  $E/P$ , em escala de tempo sazonal ou anual. Esta razão é notoriamente maior que 100% sobre os oceanos, onde a evaporação excede a precipitação. Entretanto, sobre áreas continentais esta razão também pode exceder 100%, sobretudo, durante períodos secos. Tais regiões são encontradas sobre o Nordeste, por exemplo, em todas as estações. Por outro lado, na Amazônia o valor da

razão E/P é de, aproximadamente, 50% em DJF, quando a precipitação sazonal é elevada.

De forma geral, a reciclagem de precipitação na bacia amazônica foi da ordem de 20%, com valores variando entre 15% na porção norte e 40% na porção sul. Os resultados mostram que, do total da precipitação na bacia amazônica, cerca de 20% é decorrente do processo de evapotranspiração local; indicando que, a contribuição local para a precipitação total representa um percentual significativo no balanço de água regional e desempenha um importante papel no ciclo hidrológico amazônico. Os aspectos climatológicos da reciclagem de precipitação mostram que a contribuição advectiva é mais importante para a precipitação sobre a Amazônia, enquanto que na região centro-sul do continente a contribuição local tem importante papel na precipitação. Contudo, as variabilidades e mudanças no sistema climático devido tanto às variações naturais (não lineares) inerentes ao próprio sistema quanto às antropogênicas, tais como o aumento na concentração de gases do efeito estufa na atmosfera e as mudanças no uso e cobertura da terra, por exemplo, desflorestamento, atividades agrícolas, desertificação e urbanização, podem afetar a dinâmica dos ecossistemas amazônicos, reduzindo sua capacidade de absorver o carbono da atmosfera, aumentando a temperatura à superfície, modificando o ciclo hidrológico regional, influenciando os padrões espaciais de umidade do solo e a ocorrência de eventos extremos (secas e enchentes) e, conseqüentemente, afetando a reciclagem de precipitação. Embora os resultados apresentados tenham produzido novos conhecimentos acerca da interação entre os processos de superfície e o ciclo hidrológico, os efeitos das variabilidades e mudanças do clima (sejam elas naturais e/ou antropogênicas) sobre a reciclagem de precipitação na Amazônia necessitam ainda ser investigados.

## Agradecimentos

Este trabalho é parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, desenvolvida no Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) em parceria com a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), sob orientação do segundo autor. O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

## Referências

- ARRAUT, J.R.; 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, n. 9, p. 1902-1912, 2009.
- ARRAUT, J.R.; NOBRE, C.; BARBOSA, H.M.J.; OBREGON, G.; MARENGO, J.A. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 25, n. 2, p. 543-556, 2012.
- ARTAXO, P.; GATTI, L.V.; LEAL, A.M.C.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; LARA, L.L.; PAULIQUEVIS, T.M.; PROCÓPIO, A.S.; RIZZO, L.V. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 185-196, 2005.
- AVISSAR, R.; NOBRE, C.A. Preface to special issue on the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 1-2, 2002.
- BOSILOVICH, M.G.; SCHUBERT, S.D. Precipitation Recycling over the Central United States Diagnosed from the GEOS-1 Data Assimilation System. **Journal of Hydro-meteorology**, v. 2, n. 1, p. 26-35, 2001.
- BRUBAKER, K.L.; ENTEKHABI, D.; EAGLESON, P.S. Estimation of Continental Precipitation Recycling. **Journal of Climate**, v. 6, n. 6, p. 1077-1089, 1993.
- BUDYKO, M.I. **Climate and Life**. New York, USA: Academic Press, 1974. 508 p.
- COHEN, J.C.P.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.
- CORREIA, F.W.S.; MANZI, A.O.; CÂNDIDO, L.A.; dos SANTOS, R.M.N.; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007.
- COSTA, M.H.; FOLEY, J.A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D12, p. 14189-14198, 1999.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- DRUMOND, A.; MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T.; NIETO, R.; MOREIRA, L.; GIMENO, L. The role of Amazon Basin moisture on the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. **Hydrology and Earth System Sciences Discussion**, v. 11, n. 1, p. 1023-1046, 2014.
- ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 120, n. 518, p. 861-880, 1994.
- ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation Recycling. **Reviews of Geophysics**, v. 34, n. 3, p. 367-379, 1996.
- FEARNSIDE, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.
- MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R.A.; KILLEEN, T.J.; LI, W.; NOBRE, C.A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169-172, 2008.
- MARENGO, J.A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. **Climate Dynamics**, v. 24, n. 1, p. 11-22, 2005.
- MARENGO, J.A. On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 1-19, 2006.
- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Clima da Região Amazônica. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DA SILVA, M.G.A.J.; SILVA DIAS, M.A.F. (Orgs.). **Tempo e Clima**

- no Brasil.** São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. p. 197-212.
- MARENGO, J.A.; SOARES, W.R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.
- MARQUES, J.; SANTOS, J.M.; VILLA NOVA, N.A.; SALATI, E. Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus. **Acta Amazonica**, v. 7, n. 3, p. 355-362, 1977.
- MOLION, L.C.B. **A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects.** 1975. Ph.D. Thesis – University of Wisconsin, Madison, USA, 1975.
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; ARTAXO, P. Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). **Amazonia and Global Change.** Geophysical Monograph Ser, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, 2009a. p. 145-147.
- NOBRE, C.A.; OBREGÓN, G.O.; MARENGO, J.A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). **Amazonia and Global Change.** Geophysical Monograph Ser, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, 2009b. p. 149-162.
- NÓBREGA, R.S.; CAVALCANTI, E.P.; SOUZA, E.P. Reciclagem de vapor d'água sobre a América do Sul utilizando reanálises do NCEP-NCAR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 253-262, 2005.
- ROCHA, H.R.; MANZI, A.O.; SHUTTLEWORTH, J. Evapotranspiration. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). **Amazonia and Global Change.** Geophysical Monograph Ser, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, 2009. p. 261-272.
- ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; FONSECA, P.A.M. Reciclagem de precipitação na Amazônia: Um estudo de revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 59-70, 2015.
- SATYAMURTY, P.; da COSTA, C.P.W.; MANZI, A.O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 1-2, p. 195-209, 2013.
- SAVENIJE, H.H.G. New definitions for moisture recycling and the relation with land-use changes in the Sahel. **Journal of Hydrology**, v. 167, n. 1-4, p. 57-78, 1995.
- TRENBERTH, K.E. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. **Journal of Climate**, v. 12, n. 5, p. 1368-1381, 1999.
- VAN DER ENT, R.J.; SAVENIJE, H.H.G.; SCHAEFLI, B.; STEELE-DUNNE, S.C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. **Water Resour Research**, v. 46, n. 9, p. 1-12, 2010.
- VERA, C.; BAEZ, J.; DOUGLAS, M.; EMANUEL, C.B.; ORSINI, J.A.M. *et al.* The South American Low Level Jet Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 1, p. 63-77, 2006.