

O Futuro Climático da Amazônia

Relatório de Avaliação para a Articulación Regional Amazônica (ARA)

Autor: [Antonio Donato Nobre](#), PhD

Pesquisador Sênior do INPA

Pesquisador visitante no Centro de Ciência do Sistema Terrestre INPE

Sumário Executivo

Este relatório de avaliação do futuro climático da Amazônia consiste de uma revisão condensada da literatura científica, articulada com análises interpretativas das questões mais importantes. Sem perder o foco na ciência, trata dos temas com linguagem acessível e aspiração holística, isto é, busca ligar fontes e as análises individuais em um todo coerente. Suas linhas mestras são o potencial climático da grande floresta, sua destruição com o desmatamento e o fogo e o que precisa ser feito para frear o trem desgovernado em que se transformaram os efeitos sobre o clima da ocupação humana em áreas de floresta.

O tema é vasto, o que recomenda tratar dos acontecimentos em certa sequência cronológica.

1) O texto começa pelo pano de fundo na história geológica: *o tapete tecnológico da biodiversidade Amazônica que levou dezenas de milhões de anos para formar sua capacidade funcional*. Os processos da vida que operam na floresta contêm complexidade quase incompreensível, com número astronômico de seres funcionando como engrenagens articuladas em uma fenomenal máquina de regulação ambiental.

2) Passa, então, para a descrição das capacidades da floresta no seu estado intocado: *o oceano verde e sua relação com o oceano gasoso da atmosfera, com o qual troca gases, água e energia, e com o oceano azul dos mares, fonte primária e repositório final da água que irriga os continentes*. Desde Humboldt até hoje a ciência revelou muitos segredos acerca do poder da grande floresta sobre os elementos que fazem o clima. O primeiro foi que a floresta mantém úmido o ar em movimento, o que leva chuvas para áreas continente adentro, distantes dos oceanos. Isso se dá pela capacidade inata das árvores de transferir grandes volumes de água do solo para a atmosfera através da transpiração.

Alianza estratégica:



O segundo segredo foi a formação de chuvas abundantes em ar limpo. As árvores emitem substâncias voláteis precursoras de sementes de condensação para o vapor d'água, cuja eficiência na nucleação de nuvens resulta em chuvas fartas e benignas. O terceiro segredo foi a sobrevivência da floresta a cataclismos climáticos e sua competência em sustentar um ciclo hidrológico benéfico mesmo em condições externas desfavoráveis. Segundo a teoria da bomba biótica, a transpiração abundante das árvores, maior que a evaporação nos oceanos contíguos, leva através da correspondente condensação nas nuvens a um rebaixamento de pressão atmosférica sobre a floresta, que suga o ar úmido sobre o oceano para dentro do continente, mantendo as chuvas em quaisquer circunstâncias. O quarto segredo indicou a razão de a porção meridional da América do Sul, a leste dos Andes, não ser desértica como áreas na mesma latitude a oeste dos Andes e em outros continentes. A floresta amazônica não somente mantém o ar úmido para si mesma, mas exporta rios aéreos de vapor que no verão hemisférico transportam matéria-prima para chuvas fartas que irrigam aquela região, a qual, de outra forma, seria árida.

O quinto segredo estava no motivo de a região Amazônica e oceanos próximos não fomentarem a ocorrência de fenômenos atmosféricos como furacões e extremos climáticos. A atenuação da violência atmosférica tem explicação no efeito dosador, distribuidor e dissipador da energia nos ventos exercido pelo rugoso dossel florestal e da aceleração lateral dos ventos na baixa atmosfera promovida pela bomba biótica, o que impede a organização de furacões e similares. Todos esses efeitos em conjunto fazem da floresta-oceano verde a melhor e mais valiosa parceira de todas as atividades humanas que requerem chuva na medida certa, um clima ameno e proteção de eventos extremos.

3) O relatório continua com a descrição dos efeitos do desmatamento e do fogo sobre o clima: *a devastação da floresta-oceano verde gera o clima inóspito*. Modelos climáticos anteciparam há mais de 20 anos variados efeitos danosos do desmatamento sobre o clima, já confirmados por observações, entre eles a redução drástica da transpiração, a modificação na dinâmica de nuvens e chuvas e o prolongamento da estação seca. Outros efeitos não previstos, como o dano por fumaça e fuligem à dinâmica de chuvas mesmo sobre áreas de oceano verde também estão sendo observados. Das observações, das projeções atualizadas de modelos climáticos e também de nova análise baseada em teoria física, torna-se evidente que o dano do desmatamento ao clima, além também de fogo, fumaça e fuligem, é extensivo. Desta análise emerge, como fator principal a afetar o clima, a extensão acumulada do desmatamento, que é muito grave (medida em quase 763 mil km² até 2013), que precisa ser somada à fração de impacto da extensão acumulada da menos falada e menos estudada degradação florestal (estimada em mais de 1,2 milhão de km²).

4) Prossegue o relatório relacionando os dois itens anteriores, floresta-oceano verde e desmatamento, no contexto temporal mais estendido: *o equilíbrio vegetação-clima, que balança na beira do abismo*. Modelos climáticos ligados interativamente a modelos de vegetação exploram quais as extensões de tipos de vegetação e as condições climáticas capazes de gerar estáveis equilíbrios vegetação-clima. Para a Amazônia, estes modelos projetam a possibilidade de equilíbrio duplo, em que um favorece a floresta (úmido, atual para a bacia Amazônica e histórico) e outro favorece a savana (mais seco, atual para o cerrado, futuro para a bacia Amazônica). O ponto preocupante desses exercícios de modelagem foi a indicação de que aproximadamente 40% de remoção da floresta-oceano verde poderia deflagrar a transição de larga escala para o equilíbrio de savana, liquidando com o tempo até as florestas que não tenham sido desmatadas. O desmatamento corte raso atual roça os 20% da cobertura original e a degradação florestal estima-se já tenha perturbado a floresta remanescente em variados graus, afetando diretamente mais de 20% da cobertura original.

5) Por fim, o relatório usa a solidez científica dos diagnósticos observacionais, projeções numéricas e previsões teóricas para propor ação mitigadora: *reversão do dano, um esforço de guerra*. Apesar da dificuldade em separar precisamente os efeitos de fundo das mudanças climáticas globais daquelas locais e regionais, não resta a menor dúvida de que os impactos do desmatamento, da degradação florestal e dos efeitos associados já afetam o clima próximo e distante da Amazônia. Afetam em tal grau, hoje, e prometem afetar tão mais seriamente, no futuro, que a única opção responsável parece ser agir vigorosamente no combate às causas.

Como primeira ação impõe-se a universalização de acesso às descobertas científicas, que podem reduzir a pressão da principal causa do desmatamento: a ignorância. Em segundo lugar, para estancar a sangria da floresta, zerar o desmatamento e a degradação florestal com todos e quaisquer recursos e meios éticos possíveis, no interesse da vida. A seguir, em vista do diagnóstico, apontar o desmatamento e a degradação acumulados como o mais grave fator de dano ao clima, o que torna inescapável um gigantesco esforço para replantar a floresta destruída. Tal esforço precisa ter perspectiva de médio e longo prazos, para culminar com a regeneração da floresta-oceano verde original.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais a todos que contribuíram para o aporte de informação qualificada a este relatório, em especial para Enéas Salati no histórico dos estudos isotópicos; Martin Hodnett, José Marengo e Celso Randow nos números da evapotranspiração; Diógenes Alves e Dalton Valeriano nos números do desmatamento; Sérgio Guimarães, Marcio Santilli, Paulo Nobre, Tasso Azevedo e Adriana Cuartas pelas excelentes revisões; e Marcelo Leite pela sóbria revisão profissional, essencial no ajuste e melhoria do texto. Agradecimentos também à secretaria executiva da ARA, em especial ao Sérgio Guimarães e Claudio Oliveira pelo suporte e estímulos. Agradecimentos a Avina e ao Fundo Vale pelo suporte.

Aliança estratégica:

3



Alianza estratégica:

4



Índice

Introdução

A tecnologia da floresta é insubstituível

1) As Florestas Geram o Clima Amigo

- 1.1) Reciclagem de Umidade: *geisers* de madeira
- 1.2) Nucleação das nuvens: o pó de pirlimpimpim no oceano verde
- 1.3) Bomba Biótica de Umidade: doar água para receber chuva
- 1.4) Rios Aéreos: água fresca pelas artérias suspensas
- 1.5) Dossel rugoso: freio de arrumação nos ventos

2) O Desmatamento Leva ao Clima Inóspito

- 2.1) Desmatamento Virtual: simulando a aniquilação das árvores
- 2.2) Desmatamento Real: olhos de águia no espaço

3) Amazônia: Calcanhar de Aquiles

- 3.1) Ponto de Não-Retorno: O passo em falso no abismo
- 3.2) Savanização ou Desertificação? Dano total ou dano impensável?

4) O Destino Climático da Amazônia

- 4.1) Reciprocidade Climática: O desmatamento acumulado cobra sua fatura
- 4.2) Ordem de Urgência: Antes tarde do que nunca
- 4.3) Frestas de Oportunidade: Cinco passos para recuperar o clima

5) Epílogo: o Prólogo de uma nova era

Referências

Alianza estratégica:



Introdução

A tecnologia da floresta é insubstituível

Numa definição solta, a floresta amazônica é um tapete multicolorido, estruturado e vivo, extremamente rico, um tapete que evoluiu nos últimos 400 milhões de anos. Uma colônia gigantesca de organismos que saíram do oceano e vieram para a terra; dentro das folhas ainda existem condições semelhantes às da primordial vida marinha. Funciona assim como um mar suspenso, que contém uma miríade de células vivas, muito elaborado e adaptado. A floresta tropical é o maior parque tecnológico que a Terra já conheceu, porque cada organismo seu, entre trilhões, é uma maravilha de miniaturização e automação. Em temperatura ambiente, usando mecanismos bioquímicos de complexidade quase inacessível, a vida processa átomos e moléculas, determinando e regulando fluxos de substâncias e de energia. O conforto climático que apreciamos na Terra, desconhecido em outros corpos siderais, pode ser atribuído, em grande medida –além de muitas outras competências–, à colônia de organismos que tem a capacidade de fazer fotossíntese. O gás carbônico (CO₂) funciona como alimento para a planta, matéria-prima transformada pelo maquinário bioquímico com o uso de luz e água em madeira, folhas, frutos, raízes. De forma encadeada, quando as plantas consomem CO₂, a concentração desse gás na atmosfera diminui. Com isso, num primeiro momento o planeta se esfria, o que faz as plantas crescerem menos, consumindo menos CO₂; no momento seguinte, isso leva ao aquecimento do planeta, e assim sucessivamente, num ciclo oscilante de regulação. Desta forma as plantas funcionam como um termostato que responde às flutuações de temperatura através do ajuste da concentração do principal gás-estufa na atmosfera depois do vapor d'água. Mas esta regulação da temperatura via consumo mediado do CO₂ é apenas um entre muitos mecanismos da vida que resultam na regulação favorável do ambiente.

As florestas favorecem o clima que lhes favoreça, e com isso geram estabilidade e conforto sob cujo abrigo florescem sociedades humanas

Como se verá neste trabalho, as florestas tropicais são muito mais que uma aglomeração de árvores, repositório passivo de biodiversidade ou simples estoque de carbono. Sua tecnologia viva e dinâmica de interação com o ambiente lhe confere poder sobre os elementos, uma capacidade inata e resiliente de condicionamento climático. Assim, as florestas favorecem o clima que lhes favoreça, e com isso geram estabilidade e conforto cujo abrigo favorece o florescimento de sociedades humanas.

A América do Sul foi um continente privilegiado pela extensiva presença de florestas megabiodiversas. Não por acaso, esse continente teve e ainda tem um dos climas mais favoráveis em comparação com qualquer outro. Contudo, ao longo de 500 anos a maior parte da vegetação nativa fora da bacia Amazônica foi aniquilada, como a mata atlântica, que perdeu mais de 90% da sua cobertura

original. O efeito desse desmatamento histórico no clima foi menos notado do que seria de se esperar, e a razão foi a “*costa quente*” (e úmida) da floresta Amazônica, que manteve o continente razoavelmente protegido de extremos com um clima ameno. Mas, nos últimos 40 anos, a última grande floresta, a cabeceira das águas atmosféricas da maior parte do continente, esteve sob o ataque implacável do desmatamento. Coincidentemente, aumentam as perdas com desastres naturais ligados a anomalias climáticas, tanto por excessos (de chuva, calor e ventos), quanto por falta (secas). As regiões andinas, e mesmo da costa do Pacífico, que dependem do derretimento das geleiras para seu abastecimento de água, estão sob ameaça, já que quase toda a precipitação nas altas montanhas, que suprem as geleiras ano a ano, tem sua matéria-prima no vapor procedente da floresta amazônica. A leste dos Andes a escala da dependência do ciclo hidrológico amazônico é incomensuravelmente maior. As regiões de savana na parte meridional, onde há hoje um dos maiores cinturões de produção de grãos e outros bens agrícolas, também recebe da floresta amazônica vapor formador de chuvas. Não fosse também a língua de vapor que no verão hemisférico pulsa da Amazônia para longe, levando chuvas essenciais, seriam desertos as regiões Sudeste e Sul do Brasil (onde hoje se encontra sua maior infraestrutura produtiva) e outras áreas como o Pantanal e o Chaco, as regiões agrícolas na Bolívia, Paraguai, Uruguai e Argentina.

Este trabalho mostrará primeiro o que sabemos sobre como a floresta Amazônica funciona e mantém sua capacidade de existir e persistir por eras geológicas. Depois exibirá o efeito sobre o clima que a destruição do sistema natural já está gerando e as previsões sobre o que ainda vai gerar. Por fim, explorará as ameaças ao equilíbrio climático que as alterações em curso podem disparar, analisando sob alguns ângulos os riscos climáticos à espreita.

As Florestas Geram o Clima Amigo

No afã de modelar com o uso de computadores os fluxos colossais de massa e energia, para simular o clima, inicialmente os meteorologistas prestaram pouca atenção na cobertura de vegetação. Essa abordagem mudou radicalmente. Por um número grande e crescente de evidências, hoje se sabe do papel vital exercido pela vegetação em muitos processos do clima, e praticamente todos os modelos do clima, mais recentemente também do sistema terrestre, passaram a incluir representações elaboradas da vegetação. As descobertas científicas sobre

Por um número grande e crescente de evidências sabe-se hoje do papel vital exercido pela vegetação em muitos processos do clima

o papel determinante das florestas nos ciclos local, regional e planetário de água, energia, carbono e outros valem para todas as florestas naturais do globo. Mas aqui vamos focalizar mais as florestas tropicais da América do Sul, especialmente a Amazônia. Todos estudos de modelagem climática consideram a bacia

Alianza estratégica:



Amazônica inteira. Mas, por haver mais dados disponíveis, é na Amazônia brasileira¹ que se realizou a maioria dos outros trabalhos científicos, como o monitoramento do desmatamento. Não obstante, dada a importância da bacia Amazônica como um todo, a chamada Pan-Amazônia, e também porque a atmosfera e os rios não se importam com limites políticos, no futuro as observações, mapeamentos e análises precisam romper as fronteiras nacionais, a exemplo do que já fazem projetos como o RAISG.²

Reciclagem de Umidade: *geisers de madeira*

Trezentos anos após a invasão europeia nas Américas, a aura de Jardim do Éden nas selvas tropicais já sofria decaimento do seu apelo romântico, possivelmente pela trombada dos cobiçosos conquistadores espanhóis com o inferno verde, aquele labirinto infundável, monótono e perigoso que passou a inspirar mais medo e desespero do que fascinação. O século 19, com seus naturalistas científicos, vê acender-se a fascinação, mas agora tingida por um apelo racional. Alexander von Humboldt, o aclamado e influente cientista-naturalista alemão que explorou as Américas na virada do século 18 para 19, é considerado o pai de ciências como geografia física, meteorologia e ecologia. Ele empregou o termo *hileia* [do grego floresta selvagem] para a Amazônia e, com a riqueza e encantamento das suas descrições minuciosas, inspirou gerações de naturalistas, Darwin entre eles. De Humboldt vêm as primeiras sugestões da ligação entre a floresta, a umidade do ar e o clima.

Porém, no início do século 20, o polímata, autor prolífico e militar Euclides da Cunha rompe com suas descrições desapontadas da hileia o encantamento do naturalismo científico. Seu discípulo Alberto Rangel, que, como o mestre, também se sensibilizara com a miséria dos seringueiros e as agruras da vida na selva, ressuscita na obra *Inferno Verde* a perspectiva de danação dos invasores espanhóis e desmonta de vez a imagem de paraíso verde. O voluntarismo verbal contra o habitat selvagem, lastreado pela admitida ignorância desses autores quanto ao valor intrínseco da floresta, em compasso com a falência do fausto da borracha, muito provavelmente deixou sua herança de valores a influenciar corações e mentes. Quanto do subsequente ímpeto para “ocupação” da Amazônia, com a radical supressão da mata, não teve raízes aí? Euclides da Cunha, prefaciando o livro do discípulo, nega valor para a abordagem holística de Humboldt (“a epistemologia da ‘ciência amazônica’ florescerá se se preocupar menos em revelar a hileia por inteiro”) e antecipa a demanda reducionista que viria.

A reciclagem de umidade da
chuva pela evaporação da
floresta mantém o ar úmido
por mais de 3.000 km
continente adentro

¹ Definida dentro do que durante a ditadura (1964-1985) se convencionou chamar de Amazônia Legal

² [Red Amazônica de Información Socioambiental Georreferenciada](#)

Alianza estratégica:



Tardios foram os estudos que finalmente começaram a revelar os segredos da grande floresta. Buscando testar cálculos preliminares de balanço hídrico para a Amazônia³ que indicavam reciclagem importante da água, Enéas Salati⁴ liderou nos anos 1970 estudos observacionais de chuva e evaporação que demonstraram inequivocamente como, através da reciclagem de umidade, a floresta mantém o ar úmido por mais de 3.000 km continente adentro.

Mas ainda faltavam muitas outras explicações sobre onde, quanto, como, por que e com que implicações. Adotando sem saber a sugestão reducionista de Euclides da Cunha, nas três décadas seguintes aos estudos de Salati, duas dúzias de grandes projetos de investigação⁵ congregando centenas de cientistas e usando muitos laboratórios, instrumentos sofisticados, torres, aviões, barcos, satélites, supercomputadores e o que mais há de ferramenta científica produziram milhares de artigos, dezenas de livros e bancos de dados alentados, a maioria informação de difícil interpretação isolada. Diz-se que o cientista de hoje é aquele que estuda cada vez mais sobre cada vez menos, até que conhece tudo sobre o nada. Como é irônico que, 200 anos depois, a forma mais produtiva de extrair sentido da enormidade dessas pesquisas pontuais seja justamente retomar a abordagem holística de Humboldt, articulando a riqueza de dados soltos e construindo uma narrativa integrada e funcional a respeito da concentração fenomenal de vida e seu poder sobre os elementos nas florestas da Amazônia.

Box 1

Transpiração: plantas não usam desodorante

As plantas suam. A água, ao evaporar, resfria a folha e o ambiente. Mas a transpiração nas plantas é muito mais importante que isso. A transpiração promove a sucção pelas raízes e o fluxo ao longo do tronco, até as folhas, da água do solo, que carrega consigo nutrientes; permite que a folha abra seus micro portais para a atmosfera (estômatos), por onde sai o vapor, mas também por onde entra o adubo gasoso mais essencial, o CO₂. E os odores produzidos pelas plantas, os gases orgânicos que desempenham muitos papéis no funcionamento da atmosfera e das chuvas, saem junto com a água transpirada. Portanto, sem transpirar a planta deixaria de regular seu próprio bem-estar, cessaria de controlar o ambiente e acabaria morrendo por falta de nutrientes e excesso de temperatura.

Em 2007 Adriana Cuartas e eu fizemos um cálculo revelador. Usando os dados de evaporação coletados nas torres de fluxo do projeto LBA estimamos a quantidade total diária de água fluindo do solo para a atmosfera através das árvores. Encontramos que uma árvore grande, com diâmetro de copa em torno de 20 m, poderia bombear e transpirar até mil litros num único dia. Quantas árvores existem na Amazônia? O número total estimado varia de 400 a 600 bilhões de indivíduos com diâmetro de tronco acima de 10 cm. Com 5,5 milhões de km² de um dossel contínuo cobrindo a porção equatorial da América do Sul, o cálculo para toda a Amazônia resultou no fantástico número de 20 bilhões de toneladas de água transpirada ao dia (ou 20 trilhões de litros). Para comparação: o volume despejado no oceano

Uma árvore grande pode bombear do solo e transpirar até mil litros de água num único dia

³ (Molion 1975) A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects (Villa Nova et al. 1976) Estimative de evapotranspiração na Bacia Amazonica (Marques et al. 1977) Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus

⁴ (Salati et al., 1979) Recycling of Water in the Amazon Basin : An Isotopic Study.

⁵ Projetos de pesquisa na Amazônia: ARME, NASA-GTE ABLE, ABRACOS, TRACE-A, RBLE, CAMREX, LBA, LBA-EUSTACH, LBA-CARBONSINK, LBA-CLAIRE, LBA-ECO, LBA-Barca, LBA-DMIP, GEWEX, ISLSCP, GEOMA, PPBio, Rainfor, AmazonFlux, Amazon Fire, Amazalert, AMAZONICA, Changing Amazônia, ATTO, GreenOceanAmazon, etc. Somente dentro do grande projeto LBA foram desenvolvidos 217 subprojetos de pesquisa em 16 anos de operação.

20 bilhões de toneladas de água por dia são transpiradas por todas as árvores na bacia Amazônica

Alianza estratégica:



Atlântico pelo rio Amazonas é de 17 bilhões de toneladas ao dia. As árvores, essas benevolentes e silenciosas estruturas verdes vivas da natureza, similares a *geisers*, jorram para o ar um rio vertical de vapor mais importante que o rio Amazonas. A água do solo começa seu retorno para a atmosfera absorvida por profundos e sofisticados sugadores, as raízes; depois sobe desafiando a força da gravidade por 40 a 60 m, ou mais, em elaboradas tubulações no xilema dos troncos; sua última etapa passa pelas estruturas laminares evaporadoras das folhas, versáteis painéis solares químicos capazes de absorver a energia do sol e aproveitar a carícia dos ventos para transpirar e transferir copiosos volumes de água vaporosa para a atmosfera, completando assim o retorno do ciclo vertical iniciado com a chuva. Como em um edifício com muitos pisos, um metro quadrado de chão na Amazônia pode ter sobre si até 10 m² de superfície foliar distribuída em diferentes níveis no dossel. Nisso reside a explicação para o fato de uma superfície terrestre florestada poder evaporar muito mais água que a superfície líquida de um oceano ou um lago, na qual 1 m² de superfície evaporadora coincide com apenas o mesmo 1 m² da superfície geométrica.

Corroborando esses números fantásticos, um estudo publicado recentemente no periódico científico *Nature*⁶ fez avançar o ciclo de descobertas sobre a

importância extraordinária da vegetação global no processo de transferência de água para a atmosfera: quase 90% de toda a água que chega à atmosfera oriunda dos continentes chegou lá através da transpiração das plantas, e somente pouco mais de 10% como simples evaporação sem mediação das plantas. Como essa transferência por transpiração se dá com grande absorção de calor na superfície, as antes insuspeitas plantas interferem –e muito– com a chuva, os ventos e o clima.

Todo esse movimento de água custa energia, olhemos para um paralelo próximo. Para gerar a eletricidade de que tanto se necessita, fala-se muito em aproveitar a energia das águas na Amazônia. Ora, a energia hidráulica de queda nos rios somente existe porque a água foi elevada e transportada pela atmosfera para suas altas cabeceiras. A transpiração das árvores, como elo vital no ciclo das águas, absorve a energia solar no bombeamento da água do solo e na sua transpiração. Assim, as árvores funcionam como estações elevatórias, alçando e lançando as águas nas altitudes

⁶ (Jasechko et al., 2013) Terrestrial water fluxes dominated by transpiration.

Na transpiração as plantas transferem para a atmosfera 90% de toda a água evaporada nos continentes

Box 2

Potência climática da floresta

Quanta energia do sol é consumida para evaporar 20 trilhões de litros de água ao dia? Para dar uma noção da grandeza de energia envolvida na transpiração amazônica, basta fazer uma comparação com as hidrelétricas. Evaporar um grama de água líquida consome 540 calorias de energia térmica. Para converter isso em energia hidráulica/elétrica, imagine uma chaleira gigante que comporte esse volume d'água, daquelas que se liga na tomada elétrica. Quanta eletricidade seria necessária para ferver e evaporar toda essa água? A usina de Itaipu, com 14 mil megawatts de potência, precisaria gerar eletricidade em sua capacidade máxima por 145 anos para que a chaleira evaporasse a água equivalente àquela transpirada em apenas um dia amazônico. Ou, para rivalizar com as árvores amazônicas e fazer o trabalho em um dia, seria preciso somar a eletricidade de 50 mil usinas hidrelétricas como Itaipu (ou 200 mil como Belo Monte). Esta comparação deixa claro que, diante da potência climática da floresta, as maiores estruturas humanas se mostram microscópicas.



da atmosfera, águas que mais adiante retornarão ao solo como chuva, transferindo parte da energia solar embutida no vapor à energia potencial da água que enche os reservatórios das hidrelétricas.

Alianza estratégica:

11



Nucleação das Nuvens: o pó de pirlimpimpim no oceano verde

Retornar volumes colossais de vapor de água para a atmosfera é somente a primeira metade da receita para ter e manter chuvas copiosas e benignas. Em 1999 um dos primeiros estudos utilizando aviões e observações do [satélite TRMM](#) feitos no projeto LBA constatou que na Amazônia o ar na baixa atmosfera (troposfera) é tão limpo de poeira quanto o ar sobre o oceano, onde as fontes de poeira são muito reduzidas, e que as nuvens típicas na Amazônia se pareciam muito com as nuvens marítimas. Essa inusitada semelhança inspirou aqueles pesquisadores a batizar a Amazônia de “Oceano Verde”. Mas havia na semelhança um mistério, pois a maior parte do oceano azul tende à aridez, com pouquíssimas chuvas, enquanto no oceano verde as chuvas eram torrenciais e constantes. Tanto que, antes do avanço do desmatamento, dizia-se haver ali apenas duas estações, a úmida e a *mais* úmida. Agora surgiu uma estação seca pronunciada, e a duração da estação úmida diminui progressivamente.

Amazônia Oceano Verde é o nome dado porque a atmosfera amazônica possui o ar limpo como a atmosfera do oceano azul

Nuvens são aglomerados de pequenas gotículas em suspensão no ar. Gotas visíveis se condensam a partir do vapor, que é invisível, pelo efeito da baixa temperatura. Mas somente temperatura não inicia o processo de condensação, é preciso haver também uma superfície sólida ou líquida que funcione como “semente” para que se inicie a deposição das moléculas de vapor. Essas sementes, ou núcleos de condensação, são em geral aerossóis atmosféricos: partículas de poeira, grãos de pólen ou de sal, fuligem e muitos outros. Mas no oceano verde os aerossóis são encontrados em baixas concentrações, como no azul. Se a limpeza do ar pode ser creditada por um lado ao efeito de tapete verde úmido segurando a poeira embaixo, e por outro à lavagem do ar pelas chuvas constantes, como explicar a formação de chuvas tão abundantes sem as sementes usuais para nucleação?

Estudando as trocas de gás carbônico através de torres de fluxo, cientistas brasileiros do INPA e da USP e europeus da Holanda, da Alemanha e da Itália colaboraram no projeto LBA para investigar também as trocas de outros gases contendo carbono, produzidos pelas plantas, para verificar se constituíam parte importante dessas trocas. Esses outros gases são os aromas da floresta, também chamados de compostos orgânicos voláteis (VOCs⁷). Como um vidro de perfume aberto perde seu líquido por evaporação e o gás-perfume se difunde pelo

Os aromas das plantas, quando no ar úmido e com a luz do sol, formam uma poeira finíssima com afinidade pela água: os núcleos de condensação

ambiente, uma variedade de substâncias orgânicas se evapora nas folhas e ganha a atmosfera. Em termos de massa, as quantidades de

7 VOCs = Volatile Organic Carbon

Aliança estratégica:



carbono perdidas para a atmosfera pelos VOCs são muito pequenas. Um grupo liderado por Meinrat Andreae, do Instituto Max Planck da Alemanha, que estuda a química dos gases na atmosfera, investigou o que acontecia com esses VOCs quando misturados ao ar amazônico e desvendou o mistério da nucleação das nuvens.⁸ Os VOCs (isopreno, terpenos etc.), numa atmosfera úmida e na presença da radiação solar, se oxidam e se precipitam, formando uma poeira finíssima, com afinidade pela água (higroscópica) e gerando eficientes núcleos de condensação. Esse é o *pó de pirlimpimpim* que surge magicamente no ar carregado de vapor e provoca as chuvas a cântaros das nuvens baixas, os regadores do Jardim do Éden. Enquanto os VOCs estão na forma de gás, dissolvidos no ar, a chuva não os lava; quando se oxidam e se precipitam como aerossóis formando as chuvas, são lavados. Mas sempre há mais VOCs esperando para formar mais *pó de pirlimpimpim* para a próxima chuva.

⁸ (Pöschl et al., 2010) Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon.

Bomba Biótica de Umidade: doar água para receber chuva

Em 2005, no pico da mais poderosa seca a atingir a Amazônia até aquele momento, iniciou-se a integração dos primeiros seis anos de dados do projeto LBA⁹. Depois de ponderar sobre as evidências das observações e analisar resultados de modelos, muitos passaram a se perguntar: “Com o aquecimento global, a floresta úmida na Amazônia vai secar e morrer?”

Ao longo de milhares, ou provavelmente milhões de anos, a floresta tropical da América do Sul evoluiu sua biota luxuriante sem sinais de ter sido desligada por eventos climáticos extremos, como aridez ou congelamento. No mesmo espaço de tempo, no entanto, é improvável que o impacto do clima externo tenha permanecido igualmente benigno, especialmente considerando as interferências cósmicas e sua conhecida relação com mudanças climáticas profundas em escala planetária. Em face dessa adversidade externa, como este magnífico bioma conseguiu resistir à extinção? Hoje há linhas suficientes de evidências de que a biosfera não só pode resistir, mas, na verdade, pode alterar, modular e até regular seu próprio ambiente.¹⁰ As florestas tropicais da América do Sul estão entre os mais densos, diversos e complexos biomas terrestres no planeta. Do mecanismo de chuvas no oceano verde pode-se imaginar como essas florestas poderiam regular o clima. Controlar a precipitação significa também controlar a convecção, o que por sua vez significa interferir com uma poderosa correia transportadora de massa e energia: a circulação de Hadley.¹¹ Através da regulação de chuvas a biologia poderia definir o ritmo dos ventos alísios do Atlântico, arrastando a necessária umidade do oceano para o interior do continente.

*Uma região florestada, que
evapora muito mais água do
que uma superfície oceânica
contigua, irá sugar para a
terra os ventos do mar que,
carregados de umidade,
trarão chuvas para a área
florestada*

Na mesma época, Anastassia Makarieva e Victor Gorshkov examinavam os mecanismos que ligam a transpiração das plantas com efeitos físicos na atmosfera. Cientes da minha proposição da resiliência amazônica, eles desenvolveram a teoria da bomba biótica de umidade,¹² explicando como processos de transpiração e condensação mediados e manipulados pelas árvores mudam a pressão atmosférica e arrastam a necessária umidade do oceano

⁹ (Nobre, 2004) Is the Amazon Forest a Sitting Duck for Climate Change? Models Need yet to Capture the Complex Mutual Conditioning between Vegetation and Rainfall

¹⁰ (Foley and Costa, 2003) Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate (Gorshkov et al., 2004) Revising the fundamentals of ecological knowledge: the biota-environment interaction (Pielke and Avissar, 1998) Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate

¹¹ (Poveda and Mesa, 1997) Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena

¹² (Makarieva and Gorshkov, 2007) Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.

para o interior do continente.

Até então, meteorologistas consideravam o aquecimento diferencial de superfície e seu efeito na atmosfera como a principal força geradora dos ventos. Makarieva e Gorshkov descobriram que a condensação do vapor na atmosfera gera uma redução localizada de pressão, o que produz gradientes de energia que aceleram os ventos. O ponto crucial da teoria é que contrastes na evaporação da superfície, muito mais que contrastes na temperatura de superfície, determinam a direção e a intensidade dos ventos. Assim, uma região florestada, que evapora muito mais água do que uma superfície oceânica contígua, irá sugar os ventos do mar para a terra que, carregados de umidade, trarão chuvas para a área florestada. Ao contrário, se a floresta for removida, o continente terá muito menos evaporação do que o oceano contíguo, o que determinará uma reversão dos fluxos que irão da terra para o mar, criando um deserto onde antes havia floresta.

Entre as previsões baseadas na teoria da bomba biótica feitas por Makarieva e Gorshkov estava que as secas nas florestas nativas seriam contrapostas por transpiração vigorosa das árvores. Ora, essa previsão contrariava o senso comum, pois qualquer pessoa sabe que basta deixar um vaso com plantas sem regar por alguns dias para que as plantas murchem e até morram. Contrariava também o conhecimento de ecofisiologistas, segundo o qual quando para de chover, e a água no solo diminui, as plantas fecham logo seus estômatos e deixam de transpirar para economizar água. Surpreendentemente, entretanto, Scott Saleska e colaboradores publicaram na revista científica *Science*¹³ observações que corroboravam a correção da previsão teórica dos autores russos. Durante o pico da seca de 2005, as partes mais atingidas da Amazônia foram as que mais “verdearam”, isto é, na zona onde choveu menos (conforme registro do satélite TRMM) brotaram mais folhas novas nas copas das árvores (de acordo com o sensor MODIS no satélite Terra). As conclusões desse estudo a partir de imagens de satélite já contava com apoio de medições em terra das torres de fluxo do projeto LBA, que haviam constatado não ocorrer uma redução de transpiração das árvores nas épocas secas. Em outras palavras, parece que, quando a seca chega, as árvores com raízes profundas (e acesso a grande quantidade de água subterrânea) executam um programa para manter ou aumentar a transpiração. Assim, com o fluxo de vapor da transpiração na superfície e a correspondente condensação nas nuvens,

Box 3

Amazônia, Coração do Mundo

Como podemos entender a circulação da água pela paisagem? A água irriga e drena os solos na paisagem de forma análoga ao sangue, que irriga e drena os tecidos do corpo. Se os familiares rios são análogos às veias, que drenam a água usada e a retornam para a origem no oceano, onde ficam as artérias do sistema natural? São os rios aéreos, que trazem a água fresca, renovada na evaporação do oceano. Para completar o sistema circulatório faltava somente o coração, a bomba que impulsiona os fluxos nas artérias aéreas. A teoria da bomba biótica veio explicar que a força que propela os ventos canalizados nos rios aéreos deve ser atribuída à grande floresta que funciona então como coração do ciclo hidrológico.

¹³ (Saleska et al., 2007) Amazon forests green-up during 2005 drought.



mantém-se a sucção do ar úmido sobre os oceanos próximos, o que significa continuar a importar água pela atmosfera, contrapondo a seca, e garantir a continuidade da floresta.

Alianza estratégica:

16



Rios Aéreos: água fresca pelas artérias suspensas

Um mapa-múndi revela interessantes arranjo e simetria na distribuição de florestas e desertos ao redor do globo, com três cinturões chamando a atenção: um de florestas ao redor da linha do Equador e outros dois de desertos, ao redor dos trópicos de Câncer e Capricórnio. Tal geografia de paisagens contrastantes tem explicação conhecida, a circulação de Hadley. Há maior incidência solar na zona equatorial e, portanto, ocorre por efeitos físicos maior ascensão de ar ali, que se resfria e faz chover, favorecendo florestas. O ar que subiu e perdeu umidade precisa ir para algum lugar, deslocando-se em altitude, nos dois hemisférios, na direção dos trópicos. Esse ar seco, quando desce e se aquece, remove umidade da superfície, favorecendo desertos. Mas existem exceções, e a parte centro-meridional da América do Sul é uma delas. Pela influência da circulação de Hadley, essa região tenderia à aridez. Basta ver o deserto de Atacama no outro lado dos Andes, ou os desertos de Namíbia e Kalahari na África e o deserto da Austrália, todos alinhados latitudinalmente com a afortunada área verde, responsável por 70% do PIB do continente no quadrilátero delimitado por Cuiabá ao norte, São Paulo a leste, Buenos Aires ao sul e a cordilheira dos Andes a oeste.

As escolas ensinam que a água evapora do mar, “vai” para os continentes, cai como chuva, é coletada nos rios de superfície e retorna ao mar. Ao fazer a ligação entre evaporação da água no mar com seu trânsito em terra, esse conceito simplório do ciclo hidrológico não explica quase nada, por exemplo por que existem desertos ou por que o vapor segue para os continentes. Já as complicadas explicações da meteorologia tendem mais a alienar os leigos do que a esclarecê-los.

Salati e colaboradores,¹⁴ comparando as assinaturas químicas entre o fluxo de entrada de vapor oceânico no grande anfiteatro Amazônico, com as correspondentes assinaturas da água de escoamento que retorna ao oceano pelo rio Amazonas, perceberam que parte significativa da água que entrava como vapor no canal aéreo não retornava pelo canal terrestre. Daí concluíram que a Amazônia devia estar exportando esse vapor para outras regiões do continente e irrigando outras bacias hidrográficas que não a do Amazonas. Análises preliminares feitas à época nas águas de chuva coletadas na cidade do Rio de Janeiro detectaram sinais de que parte dela vinha do interior do continente, não do oceano contíguo. E, mais especificamente, que havia passado pela

¹⁴ (Salati et al., 1979) Recycling of Water in the Amazon Basin : An Isotopic Study. (Matsui et al., 1976) Isotopic hydrology in the Amazonia, 2, Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through ¹⁸O concentrations

A parte centro-meridional da América do Sul, pela influência da circulação de Hadley, tenderia à aridez

Rios aéreos ligam os ventos alísios carregados de umidade do Atlântico equatorial com os ventos sobre a grande floresta, até os Andes, e daí sazonalmente para a parte meridional da América do Sul

Amazônia. Esse grupo foi o primeiro a sugerir que chuvas na América do Sul fora da Amazônia poderiam ser alimentadas pelo transporte continental de vapor.

O conceito de rios atmosféricos foi introduzido em 1992 por Reginald Newell e Nicholas Newell¹⁵ para descrever fluxos filamentosos na baixa atmosfera capazes de transportar grandes quantidades de água como vapor, tipicamente em volumes superiores ao transportado pelo Rio Amazonas (que tem vazão de 200 mil metros cúbicos por segundo, ou 200 milhões de litros por segundo). Quase três décadas depois dos achados de Salati, a circulação que liga os ventos alísios carregados de umidade do Atlântico equatorial com os ventos sobre a grande floresta até os Andes, e daí sazonalmente para a parte meridional da América do Sul, foi descrita por José Marengo e colaboradores.¹⁶ Embora eles tenham chamado esse transporte de *jatos de baixos níveis*, o conceito é muito similar ao dos rios atmosféricos. Segundo sua explicação, funciona na América do Sul um sistema de monções semelhante ao da Ásia, e, devido ao efeito da floresta e também da cordilheira dos Andes (uma barreira de 6 km de altura), o ar úmido amazônico faz a curva no Acre e, durante o verão, leva quantidades generosas de vapor d'água para o quadrilátero afortunado, contrariando sua tendência para a aridez.

Recentemente Josefina Arraut¹⁷ e colaboradores fizeram uma revisão climatológica dos “rios aéreos” da América do Sul, estimando o transporte de vapor associado e introduzindo um novo conceito, “lagos aéreos”, ou seja, região de remanso atmosférico com um estoque de vapor precipitável. Com o conceito de rios aéreos estabelecido e tornando-se popular, Dominick Spracklen¹⁸ e colaboradores desenvolveram uma abordagem inovadora ao correlacionar a superfície coberta por vegetação à exposição de uma parcela de ar num rio aéreo (medida pelo índice de área foliar ao longo da trajetória) com chuva a jusante daquela mesma parcela. Ou seja, um rio aéreo conecta regiões doadoras de umidade com outras receptoras de umidade. Daí a importância crucial das florestas a montante: constatou-se que a Amazônia é de fato a “cabeceira” dos mananciais aéreos das chuvas na América do Sul.

Box 4

Rios Voadores: vendendo uma bela história

Em 2006, contemplando a floresta amazônica do alto de uma torre de estudo do projeto LBA, eu e o aviador Gerard Moss trocamos as primeiras ideias que levaram ao projeto de aventura, pesquisa, divulgação e educação ambiental [Rios Voadores](#). Com financiamento da Petrobras e a participação de Enéas Salati, o pioneiro dos estudos sobre reciclagem de umidade na Amazônia, além de outros cientistas de renome, Gerard Moss perseguiu os rios de vapor com seu avião monomotor, coletando numerosas amostras para estudo e capturando a atenção lúdica das pessoas na aventura que criou e soube vender para a mídia em escala global. Fez também um trabalho extraordinário de educação ambiental nas escolas e pela Web, postando frequentemente em redes sociais as trajetórias dos rios voadores e mostrando como estes levam água para as pessoas. O mais valioso desse projeto foi sua capacidade de tocar o lado emocional das pessoas através do estímulo lúdico, da aventura, da ciência engajada, conectando-as ao sentimento pelo ambiente, pela água e pela floresta.

¹⁵ (Newell and Newell, 1992) Tropospheric Rivers? - A Pilot Study.

¹⁶ (Marengo et al., 2004) Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalysis: Characteristics and temporal variability.

¹⁷ (Arraut et al., 2012) Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America.

¹⁸ (Spracklen et al., 2012) Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests.



Alianza estratégica:

19



Dossel rugoso: freio de arrumação nos ventos

Makarieva e Gorshkov¹⁹ introduziram uma elegante definição física para furacões, ciclones ou tornados: *“implosões (explosões em reverso) que se passam em câmara lenta, decorrentes do desaparecimento volumétrico de vapor d’água na atmosfera por condensação”*. Paulo Nobre,²⁰ apresentou-lhes então um problema: *“A questão que se coloca... é entender por que os furacões não se desenvolvem sobre as florestas tropicais, como na Amazônia, onde o fornecimento de vapor de água pela floresta e sua extinção, na forma de chuva tropical, é tão abundante.”*

Muito além de dar uma simples resposta, Makarieva e Gorshkov demonstraram teoricamente como uma grande área terrestre coberta por floresta não permite a formação de furacões e outras circulações anômalas: *“... sob as condições em que a superfície de fricção turbulenta [superfície rugosa] é suficiente para impedir aceleração de massas de ar, um estado estacionário é possível quando a taxa de condensação é igual à taxa de evaporação, em qualquer instante do tempo.”*

Entre os serviços da floresta ao clima está um seguro contra eventos atmosféricos destrutivos, atenuando a concentração de energia nos ventos

Ou seja, além de todos os outros serviços da floresta ao clima, ela ainda oferece um seguro contra destrutivos eventos atmosféricos de alta energia, atenuando por meio da turbulência produzida pela rugosidade a concentração de energia nos ventos. Outras funções clássicas das florestas na regulação do ciclo hidrológico em terra são bem conhecidas, como o favorecimento da recarga de aquíferos e a [atenuação de enchentes](#) entre outros.

Box 5

Eventos extremos: a vida buscando equilíbrio

Com o aquecimento global ocorre maior acumulação de energia na atmosfera, o que aumenta a probabilidade de ocorrências de fenômenos climáticos mais intensos. A natureza desta tendência foi prevista há décadas pela comunidade de meteorologistas. Mas a maior intensidade e frequência dessas ocorrências está sendo observada décadas antes do previsto. Algum fator na complexidade do clima deve explicar a aceleração dos efeitos. O registro geológico mostra que climas extremos já ocorreram na história da Terra, muito antes da humanidade aqui chegar. Mas, ao contrário do que seria de esperar depois dos cataclismos, todas as evidências apontam sempre para uma resiliente recuperação estabilizadora, atenuando os extremos. Sistemas puramente geofísicos não teriam essa capacidade. Somente a vida e seus processos de autorregulação oferecem explicação satisfatória para a história climática da Terra.

¹⁹ (Makarieva et al., 2008) On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine.

²⁰ (Nobre P., 2009a) Peer Review Question Interactive comment on “On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine”

Desmatamento leva ao Clima Inóspito

Em vista dos efeitos extensivos e elaborados das florestas sobre o clima, detalhadamente demonstrados pela ciência, que efeitos esperar da sua devastação? Para avaliar os impactos do desmatamento no clima vem sendo feito um número crescente de experimentos de campo e modelagem, estudos observacionais e, mais recentemente, análises teóricas. Quais as consequências projetadas do desmatamento e quais as já observadas?

Desmatamento Virtual: simulando a aniquilação das árvores

Uma das maiores virtudes dos modelos climáticos está em sua capacidade de simular cenários distantes do presente. Este tipo de exercício não é preditivo no sentido físico, mas, onde a teoria física ainda não estiver disponível, é o melhor conhecimento e a única ferramenta para analisar sistemas complexos e fazer extrapolações bem fundamentadas. Tais exercícios de simulação são valiosos para situações específicas, como explorar riscos climáticos associados ao desmatamento. No ambiente virtual, como num simulador de voo, é possível avaliar repetidamente cenários de desastres, esmiuçando os fatores atuantes, as condições iniciais e as consequências potenciais de manobras arriscadas.

Em 1991 Carlos Nobre liderou um dos mais citados estudos²¹ para simular o impacto no clima do desmatamento total da floresta Amazônica. Usando um modelo geral de circulação da atmosfera (GCM²²) com um módulo acoplado de representação da vegetação (SiB²³), concluiu que, quando as florestas são substituídas por pasto degradado no modelo, verifica-se um aumento significativo na temperatura média de superfície (cerca de 2,5°C) e uma diminuição da evapotranspiração anual (redução de 30%), precipitação (redução de 25%) e escoamento superficial (redução de 20%). Na simulação ocorre também um aumento da duração da estação seca na metade sul da bacia Amazônica.

Nas duas décadas seguintes outros estudos avançaram no detalhamento e generalização dessas conclusões. Deborah Lawrence e Karen Vandecar fizeram

²¹ (Nobre C. et al., 1991) Amazonian Deforestation and Regional Climate Change.

²² Definição de GCM por Lawrence e Vandecar (2014): "...são modelos computacionais tridimensionais globais do sistema climático que operam em larga escala... Os modelos mais recentes incluem representações da atmosfera, oceanos e da superfície da terra... e incorporam o ciclo hidrológico e uma representação explícita ... da vegetação e seus efeitos sobre os fluxos de energia e de água, incluindo as transferências radiativas e turbulentas, e os controles físicos e biológicos da evapotranspiração."

²³ Simple Biosphere Model (Sellers et al., 1986)

recentemente uma revisão da literatura²⁴ sobre os impactos do desmatamento tropical no clima e concluíram que os GCMs concordam em que o desmatamento em escala regional leva a um clima mais quente e seco sobre a área desmatada. Os modelos que simulam o desmatamento completo somente da Amazônia preveem um clima com aquecimento na faixa de 0,1-3,8°C (média de 1,9°C) e redução de chuvas na faixa de 140-640 mm ao ano (média de 324 milímetros/ano, ou 10-15% de redução).

Mas o desmatamento pode ter implicações muito mais sérias. Em 1997 German Poveda e Oscar Mesa²⁵ apontaram o papel de ponte hidrometeorológica da floresta amazônica ao conectar os dois grandes oceanos próximos. Mais recentemente, Paulo Nobre²⁶ e colaboradores estudaram o impacto do desmatamento na chuva amazônica tendo como referência a inclusão ou a exclusão das respostas dos grandes oceanos aos cenários de desmatamento. Comparando simulações feitas com GCM atmosférico usual²⁷ com um GCM acoplado a outro modelo que simula as condições internas dos oceanos (salinidade, correntes etc.), esses autores encontraram uma redução consideravelmente maior na precipitação quando o GCM acoplado com o oceano foi rodado para um cenário de desmatamento total da Amazônia: 42% de redução da chuva, contra 26% sem considerar os mecanismos internos dos oceanos. Os oceanos sempre estiveram presentes, e a inclusão das suas respostas internas dá mais realismo às simulações.

Já existem comprovações de muito do que foi projetado pelos modelos como consequência do desmatamento, especialmente a ampliação da estação seca. Porém, esses experimentos virtuais indicavam um prolongamento da estação seca após destruição de 100% da floresta, o que já se observa com o corte raso de apenas 20% da floresta. Ou seja, esses modelos tendem a subestimar as consequências negativas nos cenários simulados. Os resultados de projeções mais recentes, como a que inclui os oceanos, somente vêm agravar o quadro e aumentar o alerta.

Mas é preciso também considerar a teoria da bomba biótica e sua previsão de redução de chuvas. Diferentemente dos modelos numéricos convencionais, uma teoria física constrói entendimento baseada exclusivamente em leis fundamentais da natureza. Se a teoria estiver correta, torna possível prever quantitativamente efeitos físicos apenas com a análise dos cenários e de sua lógica funcional. Makarieva e Gorshkov preveem

*A eliminação da floresta,
principal agente da
transpiração, equivale a
desligar o interruptor de uma
bomba de umidade
atmosférica*

²⁴ (Lawrence and Vandecar, 2014) The impact of tropical deforestation on climate and links to agricultural productivity, não publicado.
²⁵ (Poveda and Mesa, 1997) Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena.

²⁶ (Nobre P. et al., 2009) Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation.

²⁷ Que utiliza apenas a série histórica observada das temperaturas da superfície dos oceanos

que um desmatamento completo da Amazônia reduzirá a precipitação primordialmente como resultado da redução da condensação, que é simultânea a uma redução da evaporação de superfície. Como a teoria da bomba biótica estabelece que a precipitação na Amazônia é resultado dessa capacidade de transpirar, a eliminação total do principal agente da transpiração leva à cessação completa do “bombeamento biótico”. Desligado o interruptor da bomba que puxa o ar para o continente, a circulação deve mudar de direção quando a condensação passar a ser relativamente maior sobre o oceano (a *bomba oceânica*, mais fraca que a biótica, está sempre ligada), o que sugaria o ar do continente, criando aridez em terra. Os modelos climáticos usados para simular o desmatamento ainda não embutiram essa nova física, portanto não projetam esse efeito, que poderia significar até 100% de redução nas chuvas.

Desmatamento Real: olhos de água no espaço

O desmatamento real é imenso e seus efeitos sobre o clima são bem documentados. Estudos em torres micrometeorológicas mostram que a substituição de floresta por pastagem leva, como previsto pelos modelos, a um aumento da temperatura de superfície e uma redução da evapotranspiração.²⁸

Observações mostram que durante a estação seca, como previsto pela teoria da bomba biótica, a evapotranspiração das florestas continua a ocorrer ou até aumenta, mas não nas áreas desmatadas

Observações de satélite mostram que, durante a estação seca, como previsto pela teoria da bomba biótica, a evapotranspiração das florestas continua a ocorrer ou até aumenta, mas não nas áreas desmatadas.²⁹ Dados similares também indicam que a transpiração da floresta é bem maior do que aquela prescrita pelos modelos, o que explica em parte a subestimativa dos modelos de larga escala no caso da redução de precipitação com o desmatamento. Embora alguns estudos observacionais tenham revelado um aumento localizado da chuva com o desmatamento, estudos mais abrangentes, simulações com modelos climáticos e mesmo análises teóricas esclareceram o caráter local e transitório desse efeito,³⁰ que depende basicamente da existência de matas circundantes à área desmatada e da extensão destas matas. O aumento de chuva converte-se em redução tão logo as florestas remanescentes fiquem mais distantes que um certo limiar de área aberta. Daí em diante haverá redução das chuvas.

O estudo de Spracklen e colaboradores³¹ com dados de satélites para chuva e presença de floresta encontrou redução da precipitação, a jusante dos

Dados de satélites para chuva e presença de floresta mostraram redução da precipitação a jusante dos ventos que passaram sobre desmatamento

²⁸ Por exemplo (Gash, 1996) Amazonian Deforestation and Climate. (von Randow et al., 2004) Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in southwest Amazonia.

²⁹ Hughes et al., 2006) Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season, (Saleska et al. 2007) Amazon forests green-up during 2005 drought.

³⁰ Por exemplo (Oyama and Nobre, 2003) A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America, (Sampaio et al., 2007) Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion.

³¹ (Spracklen et al., 2012) Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests.

ventos, com o desmatamento. Em 60% das áreas tropicais, o ar que passa sobre densas florestas produz pelo menos duas vezes mais chuva que o ar que passa sobre áreas desmatadas. Apesar de ainda não terem considerado o mecanismo e os efeitos da teoria da bomba biótica, esses autores demonstraram com evidências fortes que o impacto negativo do desmatamento no clima não é somente local, pode afetar regiões próximas e distantes. Aplicando os conceitos da bomba biótica, Makarieva e colaboradores colocaram os achados de Spracklen em perspectiva,³² explicando quantitativamente quais os fatores físicos responsáveis pela redução nas chuvas decorrentes do desmatamento a jusante dos ventos. E apontaram que essa redução de chuvas deverá ser bem maior do que o indicado pelo grupo de Spracklen.

Para a porção mais desmatada da Amazônia já se constata progressivo retardo no início da estação úmida, o que gera significativo impacto no setor agrícola

Assim, a discussão sobre desmatamento passa longe de dúvidas sobre seus evidentes efeitos diretos e indiretos na redução das chuvas e recai sobre a extensão da área desmatada. No período 2011/2012 foram “apenas” 4.571 km² desmatados. Se comparado com taxas de desmatamento em anos de pico, como 2004 (27.772 km²), esse valor é modesto, e o Brasil merece reconhecimento por haver logrado essa redução. A velocidade e a eficácia atingidas na redução recomendam essa estratégia para esforços ainda requeridos no sentido de zerar e reverter o desmatamento no Brasil e no mundo. A despeito da notícia encorajadora, essa taxa seria suficiente para desmatar toda a Costa Rica em meros dez anos. Além disso, reduções nas taxas anuais atenuam a percepção momentânea de perda e mascaram o desmatamento acumulado na Amazônia, que é muito grave.

No que respeita ao clima, importa sobretudo a área total devastada e sua distribuição espacial. Compilando estudos pioneiros com dados de satélite,

Box 7

Desmatamento acumulado: 762.979 km²

Esse valor é maior que as áreas somadas de três Estados de São Paulo, ou às áreas da França e da Alemanha somadas. Uma unidade de área mais próxima do brasileiro, o campo de futebol (4.136 m²), dá uma noção da magnitude da devastação: 184 milhões de unidades --quase um campo de futebol desmatado na Amazônia para cada Brasileiro. Colocado na perspectiva temporal, teriam sido em média 12.635 campos desmatados por dia [526 campos por hora; 8,8 campos -- ou 36.291 m²-- por minuto; 605 m² por segundo] ininterruptamente, nos últimos 40 anos. Para caber na compreensão o gigantismo destes números é preciso estender a imaginação para além destas analogias. Um mega-trator ficcional, operando uma lâmina frontal com 3 m de largura, precisaria acelerar quase à velocidade de um avião a jato (726 km/h) para desmatar a área raspada na Amazônia no ritmo registrado do espaço em imagens. Como um trator desmata muito mais lentamente (0,24- 0,36 ha/h, ou ~0,8 km/h se essa área tivesse 3 m de largura),³³ com a mesma lâmina de 3 m seria necessário mais de 900 tratores simultaneamente derrubando a floresta, lado a lado, formando uma frente destrutiva com quase 3 km de largura.

³² (Makarieva et al., 2013) Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure and atmospheric moisture content.

³³ (Viana, 2012) Máquinas e Métodos de Desmatamento.

Diógenes Alves³⁴ contabilizou até 2004 um desmatamento total de 663 mil km². Agregando-se os números mais recentes do [projeto PRODES do INPE](#), o desmatamento acumulado total até 2013 chega a 762.979 km.²

Pelo viés do dano ao clima, o que se tem na Amazônia é um passivo gigantesco de destruição do oceano verde. Não há, portanto, qualquer motivo para comemorar as taxas relativamente mais baixas de corte raso dos últimos anos, mesmo porque depois da aprovação do novo Código Florestal (2011), com sua ampla anistia a desmatadores, já se observa uma nítida tendência de aumento das taxas anuais. O corte raso brasileiro (sem considerar o dos demais países da bacia Amazônica) chegou a 18,85% da área original de floresta em 2012.³⁵ Mas a destruição não é uniforme, pois ocorre grande concentração de corte raso no chamado Arco do Fogo.³⁶ Se a vastidão já é gravíssima para o clima, a situação torna-se ainda pior ao se considerar o oceano verde ferido. A exploração madeireira e o desmatamento gradual produzem extensas áreas de florestas degradadas que raramente entram na contabilidade oficial da destruição, mas que a depreender das informações e estimativas disponíveis podem ter impacto significativo sobre o clima. Estudo sobre degradação [feito pelo INPE](#) encontrou no Estado do Mato Grosso, no período de 2007 a 2010, "somente" 7.856 km² com corte raso, mas outros 32.926 km² de florestas degradadas. Somando corte raso com degradação, sobrou pouco do propriamente chamado *Mato Grosso*. No mesmo período o INPE mapeou 64.205 km² de floresta degradada versus 39.026 km² de corte raso para a Amazônia brasileira. Usando a proporção entre estas áreas pode-se extrapolar a área de floresta degradada para toda Amazônia brasileira. Neste calculo, até 2013 a área total degradada pode ter alcançado 1.255.100 km². Somando com a área mensurada de corte raso, o impacto cumulativo no bioma pela ocupação humana pode ter atingido 2.018.079 km². Mas a área de impacto no sentido ecológico pode ser ainda maior, porque florestas contíguas a áreas de degradação ou corte raso sofrem indiretamente dos efeitos das mudanças biogeofísicas e biogeoquímicas vizinhas. No processo de degradação, a destruição do dossel, frequentemente superior a 60% da cobertura,³⁷ muda as características estruturais, ecológicas e fisiológicas da floresta, comprometendo suas capacidades ambientais.

³⁴ (Alves 2007) Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon.

³⁵ [Prodes Municípios](#), opções: Estado/região Amazônia Legal, ano 2012 ordenar -extensão do desmatamento, -consolida

³⁶ Desmatados até 2012: TO 75%, MA 72%, RO 41%, MT 40%, PA 22% e AC 13%.

³⁷ (Valeriano et al., 2008) Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites. Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e QUEIMADAS 2007-2008

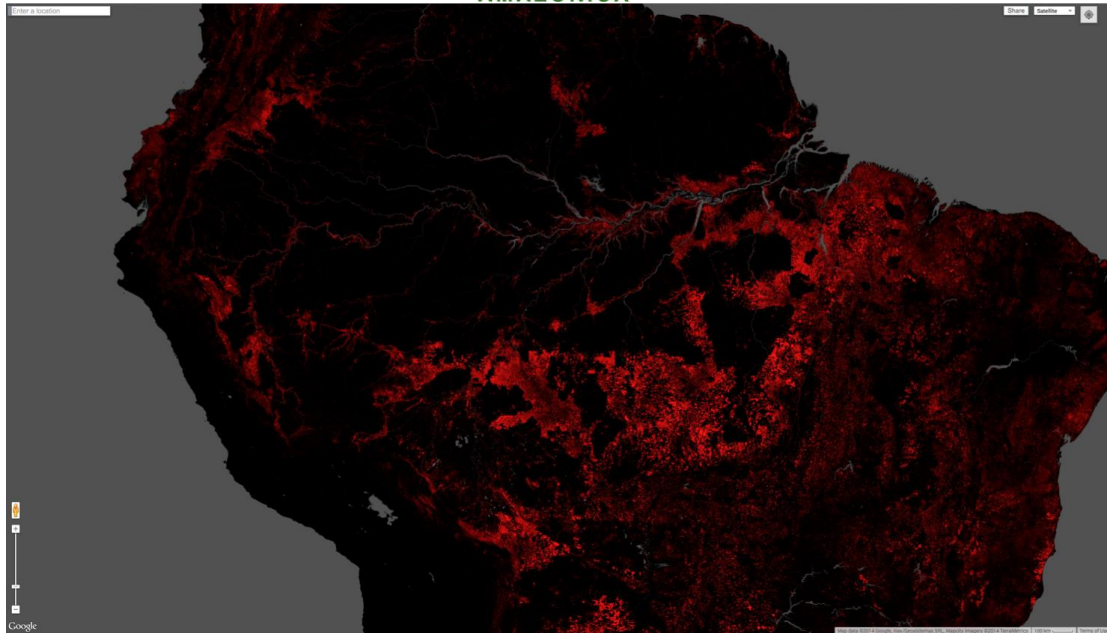


Figura 1 Desmatamento acumulado de 2000 até 2010 (tons fortes) e anterior (tons mais fracos) na América do Sul.³⁸

³⁸ [University of Maryland Global Forest Cover](#)

Alianza estratégica:



Amazônia: Calcanhar de Aquiles

A floresta sobreviveu por dezenas de milhões de anos a vulcanismos, glaciações, meteoros. Mas em menos de 50 anos, se encontra ameaçada pela ação de humanos. Existe um paralelo entre a lenda grega do calcanhar de Aquiles e a importância da grande floresta amazônica para o clima da Terra. A Amazônia, essa assembleia astronômica de extraordinários seres vivos, deve possuir algum tipo de capacidade que a tornou uma guerreira invulnerável como o herói grego, por dezenas de milhões de anos, resistindo aos cataclismos geofísicos que chacoalharam o planeta. A teoria da bomba biótica, agregada dos outros achados quanto ao poder sobre os elementos da grande floresta, esclarece e comprova mecanismos elaborados de invulnerabilidade. Onde está então o ponto fraco?

Resposta: *na degradação e no desmatamento*

Como a grande floresta presta um rol determinante de serviços para a estabilidade do clima local, regional e global, sua ruptura física significa levar a “grande guerreira” à derrota nesses papéis, a exemplo da ruptura do calcanhar de Aquiles, que o fez perder a guerra. A flecha do inimigo é a motosserra, o correntão, o fogo, a fumaça, a fuligem e outros fatores de origem humana, que surgiram do uso errado, descontrolado e terrível das invenções do [Antropoceno](#), a nova era em que a humanidade tornou-se uma força geológica capaz de mudar a face do planeta.

Ponto de Não-Retorno: passo em falso no abismo

Se imaginarmos a metáfora de um veículo (a grande floresta) trafegando em estrada esburacada (clima), cujos pneus flexíveis absorvem e amortecem os impactos dos buracos (resiliência eco-climática), qual seria a profundidade do buraco climático necessária para estourar o *pneumático* da Amazônia oceano-verde? Em 2005, houve o impacto da estiagem mais severa em um século. Cinco anos depois, o impacto da seca de 2010 foi bem maior e mais extensivo.³⁹ Em 2010 emergiram, nas rochas no fundo do rio Negro, pinturas rupestres feitas quando o nível dos mares estava mais de 100 m abaixo do atual, durante a era glacial de milhares de anos atrás. As explicações físicas para esses dois megaeventos são em geral

A floresta-oceano verde tem muitos recursos para absorver os impactos de secas, regenerando-se completamente ao longo dos anos

³⁹ (Marengo et al., 2011) The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.

inconclusivas, mas numerosas observações, em terra e do espaço,⁴⁰ não deixam dúvidas sobre os danos e prejuízos registrados na floresta, indicando que o *pneumático* amazônico já apresenta sinais de fadiga, ou pelo menos cicatrizes significativas dos impactos sofridos.

Em condições estáveis de oceano verde, a floresta tem amplo repertório de respostas ecofisiológicas para absorver os impactos de secas como essas,⁴¹ regenerando-se completamente ao longo dos anos. Mas o que se vê em áreas extensas, principalmente ao longo do arco do desmatamento, é uma “falência múltipla de órgãos” nos fragmentados remanescentes florestais e até em áreas mais contínuas. Vários fatores deletérios combinam seus efeitos, de modo que secas resultantes de pressão externa fazem estrago maior do que o usual, atrapalhando a capacidade de regeneração da floresta. O primeiro e principal desses fatores é o próprio desmatamento. Sem floresta, desaparecem todos os seus serviços para o clima, o que por sua vez afeta a parte de mata que restou. Remover florestas quebra a bomba biótica de umidade, debilitando a capacidade de trazer ar úmido e chuvas para a região. No processo de remoção com queima, a fumaça e a fuligem causam pane no mecanismo de nucleação de nuvens, criando nuvens poluídas e dissipativas que não produzem chuvas.⁴² Sem precipitação na estação seca, a floresta acaba secando além do limite em que se torna inflamável, o fogo entra na mata, queima raízes superficiais e mata árvores grandes.⁴³ Todos esses efeitos do desmatamento se potencializam. Assim, rapidamente os inimigos humanos vão golpeando o calcanhar da guerreira. Quando ela tombará de vez? Quando ultrapassar o ponto de não retorno.⁴⁴

O desmatamento quebra o mecanismo das chuvas. Sem chuvas, a floresta se torna inflamável, o fogo entra pela mata, queimando raízes superficiais e matando árvores grandes

O ponto de não retorno é o início de uma reação em cadeia, como uma fileira de dominós em pé. Tombando o primeiro, tombarão todos os demais. O sistema vivo na floresta, brutalmente desequilibrado, saltará para outro estado de equilíbrio.

Savanização e Desertificação: Dano total ou dano impensável?

⁴⁰ Por exemplo: (Brando et al., 2014) Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions; (Saatchi et al., 2013) Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy; (Fu et al., 2013) Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection; (Marengo et al., 2013) Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation; (Phillips et al., 2009) Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest; (Cox et al., 2008) Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution; (Hutyra et al., 2005) Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia.

⁴¹ (Phillips et al., 2010) Drought-mortality relationships for tropical forests.

⁴² (Andreae et al., 2004) Smoking rain clouds over the Amazon.

⁴³ (Nepstad et al., 2004) Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis.

⁴⁴ (Nobre and Borma, 2009) “Tipping points” for the Amazon forest.

Equilíbrio estável é um estado parecido com o de uma bola dentro de uma bacia, que em condições normais sempre volta para a parte mais funda do recipiente.

Com o ressecamento, o fogo e a alteração da floresta, a savana passaria a ser favorecida pelo novo equilíbrio climático, em detrimento da floresta

Com oscilações crescentes da bacia, a bola se movimenta cada vez mais perto das bordas. Quando o vigor do movimento da bacia impulsiona a bola para além da borda, esta salta para fora e deixa a bacia do primeiro equilíbrio para trás.

Em 2003, Marcos Oyama e Carlos Nobre⁴⁵ lançaram a hipótese da savanização da Amazônia em seu estudo de modelagem usando um GCM e um modelo de equilíbrio de vegetação (desenvolvido a partir do SSiB). Como o clima interage com a vegetação, ao mudar um o outro tende a mudar em retroalimentação positiva (desestabilizadora) ou negativa (estabilizadora), até que surja um novo equilíbrio. Clima e vegetação na Amazônia oceano-verde estão em equilíbrio estável e resiliente na condição úmida. Com o desmatamento, o clima muda gradualmente e se instabiliza até ultrapassar um ponto de não retorno (borda da bacia úmida). O sistema pode então saltar para outro equilíbrio (*muito mais seco*). Haveriam dois estados possíveis de equilíbrio para a vegetação na Amazônia. Com o ressecamento progressivo, a entrada de fogo e a modificação em larga escala da floresta, a savana passaria a ser favorecida pelo novo equilíbrio climático, em detrimento da floresta. No segundo estado de equilíbrio, mesmo áreas remanescentes de florestas não desmatadas desaparecerão como tal, virando savanas. Esta hipótese indica que somente proteger a floresta que sobrar não impedirá seu desaparecimento subsequente por força da mudança climática no novo equilíbrio.

Com florestas, os ventos sopram do mar para a terra; sem florestas, irão da terra para o mar, levando à redução de 100% das chuvas. Zero de chuvas determina deserto, não savana

Tais extrapolações em geral consideram cenários de redução relativamente modesta de chuva, sempre presumindo que a direção dos ventos não mudará muito sem a floresta. Nesse cenário, os ventos alísios carregando umidade do oceano continuariam a entrar pelo continente, e apenas as trocas verticais sobre a Amazônia se alterariam. Mas a teoria da bomba biótica prevê que a redução significativa de evaporação/condensação em terra deve levar a um enfraquecimento dos alísios, até uma possível inversão na circulação dos ventos. Poderíamos comparar essa relação terra-mar com um cabo de guerra: o lado que evaporar mais, resultando em maior condensação atmosférica, ganhará a disputa, puxando os ventos para si. Com a floresta, os ventos fluem do mar para a terra; sem floresta, os ventos irão da terra para o mar, o que pode eliminar até 100% das chuvas. Zero de chuvas leva a um deserto, não a uma savana.

⁴⁵ (Oyama and Nobre, 2003) A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America.

O cenário projetado pelo modelo de Oyama e Nobre (e mais tarde detalhado por outros estudos),⁴⁶ caso venha a se materializar, já é ruim o suficiente ao prever a savanização, com aniquilação de um tesouro da biodiversidade florestal. Mas na savana ainda há chuva, e a agricultura continua com alguma chance. Já a desertificação decorrente do desmatamento progressivo, prevista pela teoria da bomba biótica, aniquilaria tudo, inclusive a maioria das atividades humanas na Amazônia.

E fora da Amazônia? Como a maior parte da água que irriga o celeiro produtivo no quadrilátero da América do Sul meridional procede das florestas da Amazônia, o futuro clima do continente poderia secar consideravelmente, no extremo chegando a se assemelhar com o presente da Austrália: um imenso deserto interior, cercado em um dos lados por franjas de áreas úmidas próximas ao mar.

O Futuro Climático da Amazônia

Se esses cenários se materializarem ou não, e quanto tempo isso demorará, depende de muitos fatores difíceis de prever, entre eles quanto da cobertura vegetal original terá sido modificada e com qual velocidade. Acelerando o desmatamento e ultrapassando o ponto de não retorno que parece estar próximo, seriam poucas décadas até o clima saltar para outro estado de equilíbrio. Zerando o desmatamento e ocorrendo a regeneração da floresta, afasta-se a ameaça imediata para um futuro mais ou menos distante, tudo a depender da extensão de floresta-oceano verde remanescente e das forças climáticas externas.

O que a ocupação humana da Amazônia deflagrou foi uma competição impensável. A corrida onde duas forças nefastas disputam o pódio

Modelos climáticos são extrapolações bem fundamentadas e úteis, mas climas passados podem não ser boa base para prever o futuro

⁴⁶(Malhi et al., 2009) Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.
(Cox et al., 2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model.

Box 8

Falta de Chuva: Ameaça mortal para a Amazônia

Em 2000 Peter Cox e colaboradores do Hadley Center publicaram um impactante artigo na revista *Nature*.⁴⁷ Pela primeira vez haviam unido um modelo geral de circulação da atmosfera com um modelo interativo de vegetação em que o ciclo do carbono era bem detalhado. Entre os resultados o modelo projetava uma redução acentuada, progressiva e permanente da chuva na Amazônia, o que levaria à sua morte gradual. Com a floresta seca entraria o fogo e liberaria vastas quantidades de carbono, o que resultaria em piora acentuada do aquecimento global. Ou seja, pela primeira vez um modelo climático gerava um vaticínio terrível para a grande floresta. Catorze anos depois o novo modelo do Hadley Center está similar aos demais, isto é, já não suprime a floresta por efeito externo como antes.⁴⁶ Não obstante, os efeitos do modelo original do Hadley Center afetavam a floresta pela redução de chuvas, como decorrência do excesso de CO₂ na atmosfera e seu resultante aquecimento. Mas erros na previsão de chuvas são comuns nos modelos climáticos. E é justamente na redução de chuvas que está a maior ameaça à floresta. Se esses modelos não previrem corretamente a redução de chuvas, não colocarão a floresta em perigo. Como nenhum modelo climático atual incorpora os mecanismos e os efeitos previstos pela teoria da bomba biótica de umidade, principalmente nos efeitos da inversão da circulação dos ventos, suas projeções são incertas. Podemos vir a descobrir, décadas no futuro, que o modelo original do Hadley Center foi o único a prever –talvez não pelas razões certas– o futuro climático da Amazônia.

A floresta oceano-verde não perturbada tem capacidades inatas para resistir a impactos climáticos externos, como oscilação nas chuvas

Aliança estratégica:



na destruição final da maior e mais diversa floresta tropical da Terra: o desmatamento e as mudanças climáticas globais. Nos últimos dez anos a maioria dos modelos climáticos concordaram em atribuir alguma resistência da floresta ao impacto do aquecimento global. Ainda assim, existem incertezas sobre qual a resistência efetiva das florestas tropicais úmidas à ação direta do homem, o que torna difícil, a partir desses modelos, projetar uma data segura para a floresta extinguir-se por essa causa. De forma grosseira pode-se extrapolar a história conhecida de desmatamento –20% da cobertura florestal removida em 40 anos, com efeitos sobre o clima já salientes– e projetar outros 40 anos para remover mais 20%, totalizando 40% de corte raso acumulado, o número sugerido pelos modelos como o limiar climático. Mas os efeitos do desmatamento se compõem com os impactos do fogo, da degradação florestal e das mudanças climáticas, o que implica uma aceleração do cenário esperado. Apesar de modelos climáticos serem extrapolações bem fundamentadas e úteis, os climas passados podem não oferecer uma boa base para prever o futuro, especialmente quando se tratar de sistemas complexos e quando os equilíbrios climáticos estiverem próximos da “borda da bacia”, na iminência de saltar para outro estado de equilíbrio. Sabemos com certeza quando o futuro chegar, mas seria irresponsável esperar.

A perturbação antropogênica, embora já extensiva e provavelmente demasiada, é o fator mais imprevisível numa projeção sobre o futuro da Amazônia. A razão simples é que temos o livre arbítrio. Se escolhermos continuar no ritmo deixa-como-está-para-ver-como-é-que-fica (*business as usual*), e principalmente se optarmos por não recuperar os estragos infligidos à grande floresta, a teoria sugere que o sistema amazônico pode entrar em colapso em menos de 40 anos. Os limiares de desmatamento nos quais as simulações indicavam ruptura do sistema climático atual estão se aproximando. Os efeitos locais e regionais no clima já estão sendo observados, especialmente ao longo das zonas mais devastadas, mas também nas áreas mais afastadas que dependiam da floresta para sua chuva.

O futuro climático da
Amazônia chegou. A
responsabilidade é nossa
sobre o que faremos com
esse conhecimento

Assim, pelas evidências de alterações, o futuro climático da Amazônia já chegou. Portanto, a decisão urgente e já tardia pela ação não pode esperar, se é que existe qualquer chance de reverter o quadro ameaçador. O investimento feito na atividade científica na Amazônia rendeu frutos de informação rica, fundamentada e disponível. A responsabilidade é nossa sobre o que faremos com esse conhecimento.

Reciprocidade Climática: o desmatamento acumulado cobra sua fatura

⁴⁸ (Cox et al., 2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model.

⁴⁹ (Good et al., 2013) Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC

Com uma redução espetacular nas taxas anuais de desmatamento, o Brasil desponta como exemplo de país que fez a lição de casa em relação às mudanças climáticas. Para uma nação que passou 40 anos descumprindo a própria lei, a redução do desmatamento não é conquista pequena e deve ser louvada. Mas a redução de taxas anuais, embora essencial, se assemelha a fechar com as mãos um buraco no fundo do bote inflável, depois que a água vazada nos últimos 40 anos (desmatamento) já ameaça colocar o clima a pique. O foco usual quando se discute o futuro do clima na Amazônia é o desmatamento futuro, ou quanto cortar da mata que sobrou. Injustificadamente ausente, o assombroso desmatamento acumulado do passado precisa voltar ao foco, pois é sobre ele que recai o principal da reciprocidade climática. Sem tratar da devastação passada, o assombro se converterá em assombração.

*A farra do
desmatamento sem
limites está
encontrando no clima
um juiz que sabe contar
árvores e que não
esquece nem perdoo*

Com uma média diária em torno de 4 mm de água transpirada,⁵⁰ o que equivale a 4 litros por m², a floresta é a parceira generosa do clima amigo. Removida, a transpiração despenca –se ainda chover– para 1 mm, no caso de pastagens,⁵¹ e menos ainda com a aridificação. Adicione ao caldeirão de iniquidades o fogo, a fumaça e a fuligem, com seu efeito aniquilador sobre a floresta, as nuvens e as chuvas, e a maldição do clima inóspito terá sido a punição justa para tanta destruição. O problema é que o castigo atinge a todos indistintamente, e isso não parece justo, porque a maioria dos brasileiros foi e continua sendo contra o desmatamento.

Ordem de Urgência: antes tarde do que nunca

Para contemplarmos o que precisa ser feito em relação ao futuro climático da Amazônia (e como consequência da América do Sul), imaginemos um futuro próximo no qual o Brasil fosse atacado por uma poderosa nação inimiga com uma tecnologia secreta que emprega ondas perturbadoras emitidas por satélites para dissipar nuvens e, assim, reduzir as chuvas. A nação inimiga tem interesses comerciais ameaçados pelo sucesso do setor agrícola brasileiro. Sua arma mata-chuvas serve para minguar as plantações que com eles competem, quebrando safras e fazendo os preços internacionais explodirem. Informados pelo nosso serviço secreto dos malfeitos daquele país sobre o nosso, qual seria a reação dos agricultores brasileiros? Qual seria a reação da sociedade e do governo? Com toda a humilhação que o ultraje impõe, não precisamos de clarividência para suspeitar que a reação seria imediata e poderosa.

⁵⁰ (von Randow et al., 2013) Inter-annual variability of carbon and water fluxes in Amazonian forest, Cerrado and pasture sites, as simulated by terrestrial biosphere models. (Marengo, 2004) Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget

⁵¹ (Hodnett et al., 1996) Comparisons of long-term soil water storage behavior under pasture and forest in three areas of Amazonia

A remoção de florestas não derrota somente a agricultura; falta de água afeta a produção de energia, as indústrias e as cidades

Saindo da ficção e voltando para a realidade, vemos que o ultraje contra o Brasil está em pleno curso sem qualquer envolvimento de nação estrangeira. Em uma guerra não declarada, nos últimos 40 anos centenas de milhares se dedicaram a exterminar as florestas. Sua remoção, ameaçando as chuvas e o clima, não derrotaria somente nossa competitiva agricultura; falta (ou excesso) de água afeta a produção de energia, as indústrias, as cidades. Mas, diferentemente da

Europa e dos Estados Unidos na Segunda Guerra, nós estivemos e permanecemos inertes em relação aos ataques sofridos, deixando que sigam, ano após ano, a destruir o *berço esplêndido*. Quem são os que atentam contra o bem estar da nação? Por que nosso Exército não foi acionado em nossa defesa?

Para enfrentar a gravidade da situação precisamos de uma mobilização semelhante a um esforço de guerra, mas não para o conflito. É urgente uma “guerra contra a ignorância”, um empenho sem precedentes para o esclarecimento da sociedade, inclusive e especialmente daqueles que ainda se aferram ao grande erro de acreditar que é inócua a devastação das florestas. A *ignorância* tem o controle de motosserras, tratores com correntão e tochas incendiárias, além dos grupos que financiaram, controlaram e deram cobertura legislativa, legal e propagandística aos *comandos* da devastação. Contudo, apenas uma pequena minoria da sociedade brasileira esteve e ainda está diretamente envolvida na destruição de florestas que empurra a nação na direção do abismo climático. Essa minoria desmatadora não é uniforme, mas sua cultura privilegia interesses arraigados numa visão de curto prazo, descompromissada com as consequências. Os maiores desmatadores ignoram que a supressão das matas possa colocar o clima em risco. Há chances de que tais agentes desmatadores venham a ser convencidos a mudar, se compreenderem que a destruição sistemática das florestas é um tiro em seu próprio pé. A eliminação da ignorância quanto à função essencial das florestas na geração do clima amigo haverá por si só de participar como vetor nas conversões de desmatadores em protetores das florestas.

Box 9

Esforço de Guerra

Nas grandes ameaças a uma nação as forças militares entram logo em prontidão. Depois do ataque japonês a Pearl Harbor, os Estados Unidos decidiram ser necessário entrar na Segunda guerra mundial. Em poucos meses montou-se um “esforço de guerra” em que fábricas de automóveis passaram a produzir tanques e aviões de guerra e outras fábricas não bélicas passaram a produzir munição, armamentos e outros materiais e equipamentos requeridos. Até à Amazônia chegou aquele esforço de guerra, com os soldados da borracha. Sem tal esforço concentrado e extraordinário, os Aliados não teriam vencido.

Os desmatadores ignoraram ou não acreditaram que a supressão das matas pudesse colocar o clima em risco

Fresta de Oportunidade: Cinco passos para recuperar o clima

Enquanto não ultrapassarmos o ponto de não retorno, existem umas poucas frestas de oportunidade para a ação reparadora. Este é o momento para engajar aquele vigoroso e saneador esforço de guerra na tentativa de reverter o desastre

Alianza estratégica:

33

climático decorrente da destruição da floresta oceano-verde. Nessa direção, várias tarefas se impõem:

1) Popularizar a ciência da floresta

Floresta: quem conhece protege

É vital fazer chegar à sociedade e tornar-se conhecimento corrente os fatos científicos sobre o papel da floresta para o clima amigo e o efeito do desmatamento na geração do clima inóspito. Todos esforços devem ser feitos para simplificar a mensagem sem deturpar-lhe a essência. Deve-se antes de tudo falar para a sensibilidade das pessoas.

2) Zerar o desmatamento

Zerar o desmatamento no curto prazo é indispensável se quisermos conter dano maior ao clima

É preciso erradicar a complacência com a destruição. Um nível adequado de rigor se compara com o tratamento dado ao tabaco. Constatados os males ao ser humano e os prejuízos econômicos à sociedade, uma série de medidas foram adotadas para desestimular o tabagismo. No que diz respeito ao desmatamento, várias providências do governo federal iniciaram esse processo de controle e desestímulo. Mas tais medidas apenas tocam a superfície do problema. São políticas do Executivo, vulneráveis a ações desagregadoras do Legislativo, como a anistia a desmatadores no novo Código Florestal. Infelizmente, as discussões em torno do Código Florestal não incluíram as consequências climáticas do uso do solo. Mas uma situação extraordinária requer medidas extraordinárias. Sempre é tempo de rever leis para adequá-las às demandas da realidade e da sociedade. Outras vulnerabilidades do programa de controle do desmatamento incluem o estímulo de ciclos econômicos,⁵² a demanda crescente de mercados por madeiras e produtos agrícolas, a cobiça por terras e os vetores representados por estradas, hidrelétricas e outros programas de desenvolvimento cujas debilidades de planejamento fomentam a invasão e ocupação de áreas florestadas. Para que o desmatamento seja zerado no curto prazo, como é indispensável para conter dano maior ao clima, todos esses buracos precisam ser tapados com estratégia e inteligência.

3) Acabar com o fogo, a fumaça e a fuligem

Todas as formas de ignição originárias de atividades humanas precisam ser extintas. O fogo em áreas florestais, mas também em pastos e áreas agrícolas próximas e distantes da Amazônia, é um problema grave. Quanto menos fontes de fumaça e fuligem existirem, menor o dano à

'Quanto menos fumaça e fuligem menor o dano à formação de nuvens e chuvas, menor dano à floresta oceano verde

⁵² Picos de desmatamento em 1995 (29.059 km²) e 2004 (27.130 km²) deram-se no auge de forte desempenho da economia.

formação de nuvens e chuvas, portanto menor dano à floresta-oceano verde. Dada a cultura do fogo, prevalente no campo, essa não será uma tarefa fácil. Durante décadas a indústria do tabaco mascarou a realidade sobre os danos do fumo à saúde. Empregou elaboradas estratégias e muitos recursos no embaralhamento cognitivo, buscando desmerecer a ciência e confundir a sociedade. Mas a verdade triunfou, e algo que parecia impossível tornou-se tendência mundial irreversível. O mesmo percurso de banimento em relação ao fogo é facilitado pela existência de uma infinidade de alternativas não danosas à queima que podem ser empregadas com vantagens pelos produtores.

4) Recuperar o passivo do desmatamento

Embora o esforço de reflorestamento seja desafiador, é o melhor e talvez único caminho para desviar um risco maior em relação ao clima

Embora zerar o desmatamento seja tarefa obrigatória, somente isso não será suficiente para reverter as ameaçadoras tendências climáticas. É preciso confrontar o passivo do desmatamento acumulado. Felizmente, a própria floresta nos oferece a solução, pois dispõe de engenhosos mecanismos para recompor-se, ou cicatrizar-se, com o processo natural de regeneração das árvores em clareiras. Há uma coleção rica de espécies de plantas pioneiras que têm a capacidade de crescer em condições ambientais extremas. As plantas colonizadoras formam uma floresta secundária densa, criando assim condições para que a complexa e duradoura floresta tropical possa restabelecer-se por sucessão ecológica de médio e longo prazos. Quando a área desmatada é muito grande, o processo natural entra em falência por não conseguir fazer chegar ao solo descoberto as sementes das pioneiras. Aí torna-se necessário o plantio das espécies nativas. Se ainda houver chuvas, a floresta se regenerará nas áreas replantadas. Embora tal esforço de reflorestamento seja desafiador, é o melhor caminho para desviar-se do risco maior em relação ao clima. A China, com todos os seus graves problemas ambientais, já trilha esse caminho e se tornou o país que mais refloresta. Replantar florestas nativas é a mais garantida apólice de seguro que se pode obter contra o caos climático.

5) Regenerar o oceano verde

Na perspectiva do clima, precisamos e devemos regenerar tudo que foi alterado

Uma coleção de árvores plantadas é melhor que o solo exposto, mas ainda está longe de reconstituir, em toda sua complexidade, parte funcional do ecossistema destruído. Precisamos e devemos regenerar tudo que foi alterado. Somente a integridade do oceano verde original garantiu ao longo de eras geológicas a saúde benigna do ciclo hidrológico na América do Sul. Mas isso implicará reverter o uso do solo em vastas áreas hoje ocupadas. O caos climático previsto tem o potencial de ser incomensuravelmente mais danoso do que a Segunda Guerra Mundial. O

Alianza estratégica:

35

que é impensável hoje pode tornar-se uma realidade incontornável em prazo menor do que esperamos.

É preciso fazer um uso mais inteligente da paisagem, zoneando as terras por suas potencialidades, vulnerabilidades e riscos

Porém, existe um caminho alternativo com chances de criar condições imediatas de aceitação. Trata-se de fazer um uso inteligente da paisagem, com aplicação de tecnologias para o zoneamento das terras em função das suas potencialidades, vulnerabilidades e riscos.⁵³ A agricultura e outras atividades econômicas nas zonas rurais podem ser otimizadas, aumentando sua capacidade produtiva e liberando espaço para o reflorestamento com espécies nativas. Variados estudos da EMBRAPA mostram como intensificar a produção pecuária, reduzindo grandemente a demanda por área de pastos. Projetos como o [Y Ikatu Xingu](#) e [Cultivando a Água Boa](#) demonstram como é possível a associação de interessados dos vários setores na recuperação de matas ciliares e outras valiosas ações de sustentabilidade.

Há muitas e ótimas alternativas para reviver a competência de convívio respeitoso com a floresta das civilizações ancestrais

É necessário, desejável, viável e até lucrativo alterar o *modus operandi* da ocupação humana na Amazônia. Embora todas as cinco tarefas sejam requeridas para a regeneração e o restabelecimento funcional da regulação climática pela floresta, a novidade estaria em enfrentar o passivo de desmatamento com reflorestamento. O esforço de guerra contra a ignorância é a melhor estratégia para harmonizar a sociedade em torno do objetivo comum de recuperar o tempo perdido, criando chances reais de evitarmos o pior dos desastres climáticos. Se, a despeito da montanha de evidências científicas, ainda não formos capazes de agir, ou se formos lentos demais, então é provável que tenhamos de lidar com um prejuízo incompreensível para quem sempre teve sombra e água fresca providos graciosamente pela grande floresta.

Epílogo: o Prólogo de uma nova era

A mítica floresta amazônica é imensamente maior do que a humanidade tem enxergado nela. Vai muito além de museu geográfico de espécies ameaçadas nas unidades de conservação e representa muito mais do que um simples depósito de carbono, referenciado como massa morta nos tratados climáticos. A floresta é um espetacular parque tecnológico da natureza, um complexo vivo que forma uma poderosa e versátil usina de serviços ambientais. Qualquer apelo que se faça pela valorização da floresta precisa recuperar esse valor intrínseco. É preciso

⁵³ Tecnologia aplicando o [Modelo HAND](#) de terrenos, desenvolvida no grupo de Modelagem de Terrenos do Centro de Ciência do Sistema Terrestre do INPE.

despertar a capacidade de espantar-se diante do gigantismo da biologia tropical em todas as escalas, desde a manipulação dos ínfimos átomos e moléculas até a interferência nos oceanos e na atmosfera global. O que vemos de ações humana sobre a floresta amazônica revela enorme desproporção entre a mega-ignorância de uma aferrada minoria envolvida na sua destruição e ocupação, e o megamarasmo reinante na maioria dos que vagamente desejam sua proteção. Cada nova iniciativa em defesa da floresta tem trilhado os mesmos caminhos e pressionado as mesmas teclas. Neste comportamento insistimos no que Einstein definiu como a própria insanidade: “Fazer a mesma coisa sempre, de novo, esperando resultados diferentes.”

O abundante conhecimento científico e também outras formas acessíveis de percepção e entendimento já nos permitem resolver problemas empregando uma nova abordagem –iluminada, integrativa, propositiva e construtiva.⁵⁴ Análises sérias e abrangentes mostram numerosas oportunidades para a harmonização da presença e dos interesses da sociedade contemporânea com uma Amazônia viva e vigorosa, reconstituída em suas múltiplas capacidades. Para chegarmos lá é preciso compenetração e modéstia, dedicação e compromisso com a vida. Com os recursos tecnológicos disponíveis podemos revelar muitos segredos ainda bem guardados da resiliente biologia tropical, e com isso ir muito além de apenas compreender seus mecanismos.

Pioneira na percepção dessas possibilidades, a professora universitária, escritora e ativista Janine Benyus lançou em seu livro *Biomimética, a inovação inspirada pela Natureza*,⁵⁵ uma revolução extraordinária na ideia de conexão entre Natureza e tecnologia. Apresentando a proposta de que os seres humanos deveriam copiar conscientemente o gênio da Natureza nas suas próprias criações, ela enuncia três princípios básicos para essa reaproximação dar certo:

- *Natureza como modelo*: estudar os sistemas da Natureza e então copiá-los ou inspirar-se nos seus designs e processos para resolver problemas humanos. Ex: uma célula solar inspirada por uma folha.
- *Natureza como medida*: usar um padrão ou critério ecológico para julgar a “correção” de nossas inovações. Após 3,8 bilhões de anos de evolução, a Natureza aprendeu o que funciona, o que é apropriado e o que tem durabilidade.
- *Natureza como mentor*: um novo modo de ver e valorizar a Natureza, do qual surge uma era baseada não naquilo que podemos “extrair” do mundo natural, mas no que podemos aprender dele.

⁵⁴ Respondendo a Einstein: “não podemos resolver problemas empregando o mesmo tipo de pensamento que usamos ao criá-los.”

⁵⁵ (Benyus, 1997) *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*

Além desses três sábios e abrangentes princípios, a revolução da Biomimética reconhece uma série de outros princípios que guiam o funcionamento da Natureza e que apresentam potencial para, se absorvidos pela civilização global, resolver uma grande parte dos problemas atuais. Nesta proposta, uma lista curta desses princípios específicos constata que a Natureza é propelida pela luz solar; utiliza somente a energia de que necessita; ajusta forma à função; recicla todas as coisas; recompensa a cooperação; aposta na diversidade; demanda conhecimento local; limita os excessos internamente; e aproveita o poder dos limites.

Referências

- Alves D.S., 2007. Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon Tschardt T, Leuschner C, Zeller M, Guhardja E, Bidin A (eds), The stability of tropical rainforest margins, linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation, Springer Verlag Berlin, pp 493-512
- Andreae, M.O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, a, Frank, G.P., Longo, K.M., Silva-Dias, M. a F., 2004. Smoking rain clouds over the Amazon. Science 303, 1337–42.
- Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M.J., Obregon, G., Marengo, J., 2012. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. J. Clim. 25, 543–556.
- Benyus, J.M., 1997. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature, Harper-Colins, 320 p.
- Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silvério, D., Macedo, M.N., Davidson, E. a, Nóbrega, C.C., Alencar, A., Soares-Filho, B.S., 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.
- Cox, P.M., Betts, R. a, Jones, C.D., Spall, S. a, Totterdell, I.J., 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature 408, 184–7.
- Cox, P.M., Harris, P.P., Huntingford, C., Betts, R. a, Collins, M., Jones, C.D., Jupp, T.E., Marengo, J. a, Nobre, C. a, 2008. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. Nature 453, 212–5.
- Foley, J., Costa, M., 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. Front. Ecol. ... 1, 38–44.
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. a, Dickinson, R.E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., Myneni, R.B., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 110, 18110–5.

- Gash, J.H.C. et al, 1996. Amazonian Deforestation and Climate, 1st ed. John Wiley & Sons, West Sussex.
- Good, P., Jones, C., Lowe, J., Betts, R., Gedney, N., 2013. Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC. *J. Clim.* 26, 495–511.
- Gorshkov, V.G., Makarieva, A.M., Gorshkov, V. V, 2004. Revising the fundamentals of ecological knowledge: the biota–environment interaction. *Ecol. Complex.* 1, 17–36.
- Hodnett, M.G., Oyama, M.D., Tomasella, J., Filho, A.O.M., 1996. Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. *Amaz. Deforestation Clim.* Chapter 3, 1–21.
- Huete, A.R., Didan, K., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, S.R., Hutya, L.R., Yang, W., Nemani, R.R., Myneni, R., 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophys. Res. Lett.* 33.
- Hutya, L.R., Munger, J.W., Nobre, C. a., Saleska, S.R., Vieira, S. a., Wofsy, S.C., 2005. Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia. *Geophys. Res. Lett.* 32, L24712.
- Jasechko, S., Sharp, Z.D., Gibson, J.J., Birks, S.J., Yi, Y., Fawcett, P.J., 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347–50.
- Lawrence, D., Vandecar, K., 2014. The impact of tropical deforestation on climate and links to agricultural productivity.
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V.G., Li, B.-L., 2008. On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 8, 17423–17437.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., 2007. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1013–1033.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.V.G., Sheil, D., Nobre, A.D., Bunyard, P., Li, B.-L.B.-L., 2013. Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure and atmospheric moisture content. pre-print, *J. Hydrometeorol.* 130726133841000.
- Malhi, Y., Aragão, L., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., Mcsweeney, C., Meir, P., 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 20610–20615.
- Marengo, J. a., 2004. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Clim. Dyn.* 24, 11–22.

- Marengo, J. a., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D. a., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* 38, n/a–n/a.
- Marengo, J., Borma, L., Rodriguez, D., 2013. Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation. *Am. J. Clim. Chang.* 2013, 87–96.
- Marengo, J., Soares, W., Saulo, C., Cima, M., 2004. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. *J. Clim.* 17, 2261–2280.
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes da Silva, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solorzano, L., Moutinho, P., Ray, D., Guerreira Benito, J., 2004. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Glob. Chang. Biol.* 10, 704–717.
- Newell, R., Newell, N., 1992. TROPOSPHERIC RIVERS? - A PILOT STUDY. *Geophys. Res. Lett.* 12, 2401–2404.
- Nobre, A.D., 2004. Is the Amazon Forest a Sitting Duck for Climate Change? Models Need yet to Capture the Complex Mutual Conditioning between Vegetation and Rainfall, in: Silva Dias, P.L., Ribeiro, W.C., Nunes, L.H. (Eds.), *A Contribution to Understanding the Regional Impacts of Global Change in South América*. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, São Paulo, pp. 107–114.
- Nobre, C., Borma, L., 2009. “Tipping points” for the Amazon forest. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 28–36.
- Nobre, C., Sellers, P., Shukla, J., 1991. Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *J. Clim.* 4, 957–988.
- Nobre, P., 2009. Peer Review Question Interactive comment on “On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine” by AM Makarieva et al. *Atmos. Chem. Phys. Discuss* 8669–8670.
- Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D.F., de Almeida, R. a. F., Giarolla, E., 2009. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *J. Clim.* 22, 5686–5697.
- Oyama, M.D., Nobre, C.A., 2003. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. *Geophys. Res. Lett.* 30, 2199.
- Phillips, O., Aragão, L., Lewis, S., Fisher, J., 2009. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science* (80-.). 323, 1344–1347.
- Phillips, O.L., van der Heijden, G., Lewis, S.L., López-González, G., Aragão, L.E.O.C., Lloyd, J., Malhi, Y., Monteagudo, A., Almeida, S., Dávila, E.A., Amaral, I., Andelman, S., Andrade, A., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Blanc, L., Bonal, D., de Oliveira,

Alianza estratégica:

40

- A.C.A., Chao, K.-J., Cardozo, N.D., da Costa, L., Feldpausch, T.R., Fisher, J.B., Fyllas, N.M., Freitas, M.A., Galbraith, D., Gloor, E., Higuchi, N., Honorio, E., Jiménez, E., Keeling, H., Killeen, T.J., Lovett, J.C., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Vargas, P.N., Patiño, S., Peh, K.S.-H., Cruz, A.P., Prieto, A., Quesada, C. a, Ramírez, F., Ramírez, H., Rudas, A., Salamão, R., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Slik, J.W.F., Sonké, B., Thomas, A.S., Stropp, J., Taplin, J.R.D., Vásquez, R., Vilanova, E., 2010. Drought-mortality relationships for tropical forests. *New Phytol.* 187, 631–46.
- Pielke, R., Avissar, R., 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Glob. Chang. Biol.* 461–475.
- Pöschl, U., Martin, S.T., Sinha, B., Chen, Q., Gunthe, S.S., Huffman, J. a, Borrmann, S., Farmer, D.K., Garland, R.M., Helas, G., Jimenez, J.L., King, S.M., Manzi, A., Mikhailov, E., Pauliquevis, T., Petters, M.D., Prenni, a J., Roldin, P., Rose, D., Schneider, J., Su, H., Zorn, S.R., Artaxo, P., Andreae, M.O., 2010. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. *Science* (80-.). 329, 1513–6.
- Poveda, G., Mesa, O., 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *J. Clim.* 2690–2702.
- Saatchi, S., Asefi-Najafabady, S., Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Anderson, L.O., Myneni, R.B., Nemani, R., 2013. Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 565–70.
- Salati, E., Dall'Olio, A., Matsui, E., Gat, J., Pernambuco, U.F. De, 1979. Recycling of Water in the Amazon Basin : An Isotopic Study. *Water Resour. Res.* 15, 1250–1258.
- Saleska, S.R., Didan, K., Huete, A.R., da Rocha, H.R., 2007. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science* 318, 612.
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B.S., Cardoso, M., 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophys. Res. Lett.* 34.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A., 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.* 43, 505–531.
- Spracklen, D. V, Arnold, S.R., Taylor, C.M., 2012. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature* 489, 282–5.
- Valeriano, D. de M., Monteiro, A.M.V., Rennó, C.D., Linhares, C.A., Almeida, C.A., Arai, E., Soares, J.V., Maurano, L.E.P., Escada, M.I.S., Motta, M. da, Amaral, S., Pinheiro, T.F., Duarte, V.T., 2008. Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites. *Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD E QUEIMADAS 2007-2008 INPE.* Sao Jose dos Campos.
- Viana, E. de S., 2012. Máquinas e Métodos de Desmatamento.



- Von Randow, C., Manzi, a. O., Kruijt, B., de 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., 2004. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 5–26.
- Von Randow, C., Zeri, M., Restrepo-Coupe, N., Muza, M.N., de Gonçalves, L.G.G., Costa, M.H., Araujo, A.C., Manzi, A.O., da Rocha, H.R., Saleska, S.R., Arain, M.A., Baker, I.T., Cestaro, B.P., Christoffersen, B., Ciais, P., Fisher, J.B., Galbraith, D., Guan, X., van den Hurk, B., Ichii, K., Imbuzeiro, H., Jain, A., Levine, N., Miguez-Macho, G., Poulter, B., Roberti, D.R., Sahoo, A., Schaefer, K., Shi, M., Tian, H., Verbeeck, H., Yang, Z.-L., 2013. Inter-annual variability of carbon and water fluxes in Amazonian forest, Cerrado and pasture sites, as simulated by terrestrial biosphere models. *Agric. For. Meteorol.* 182-183, 145–155.

