



# TRAJETÓRIAS DE PESQUISA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

O IRD \_\_\_\_\_  
e seus parceiros

---

# TRAJETÓRIAS DE PESQUISA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

O IRD \_\_\_\_\_  
e seus parceiros

---

IRD Éditions

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Marseille, 2022

#### Coordenação editorial

Frédérique Seyler

#### Preparação editorial

Sabrina Milani

#### Design do modelo

Charlotte Devanz

#### Layout

Aline Lugand – Gris Souris

Maíra Zannon – Ilha Design

A menos que de outra forma indicado, todas as fotos deste livro são oriundas da base fotográfica do IRD Multimedia (<https://multimedia.ird.fr/>).

#### Foto de capa

*Pupunha*, fruta da palmeira *Bactris gasipaes*, Amazônia brasileira

© IRD/Laure Empeaire



Esta publicação de livre acesso é colocada à disposição do público nos termos da Creative Commons CC BY-NCND 4.0 licença, disponível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>. Autoriza qualquer distribuição do trabalho original (compartilhar, copiar, reproduzir, distribuir, comunicar), desde que os autores e editores sejam mencionados e um link para a licença CC By-NC-ND 4.0 está incluído. Nenhuma modificação é permitida e o trabalho deve ser distribuído em sua totalidade. Nenhuma utilização comercial é permitida.

© IRD, 2022

ISBN papel: 978-2-7099-2968-4

ISBN PDF: 978-2-7099-2968-1

ISBN epub: 978-2-7099-2970-7

#### COMITÊ CIENTÍFICO

Frédérique Seyler

Marie-Pierre Ledru

Laure Empeaire

#### Assistente de Redação

Eduardo Falconi



Apoio à esta publicação: Embaixada da França no Brasil

## SUMÁRIO

- 9 Prefácios
- 19 Introdução

---

### PARTE 1 24 **Monitorar as dinâmicas, entender os processos**

---

- 28 **1** O Observatório HyBAm em grandes rios da Amazônia
- 34 **2** Mensurar a diversidade florestal
- 40 **3** Monitorar o desmatamento e a degradação florestal
- 48 **4** Os solos: da dinâmica das lateritas à degradação da terra e da biodiversidade
- 56 **5** O papel essencial das várzeas no funcionamento do hidrossistema amazônico
- 62 **6** Ictiologia amazônica
- 68 **7** Recursos hídricos e dados espaciais

---

### PARTE 2 76 **As interações global-local**

---

- 80 **8** O sistema estuarino amazônico
- 86 **9** O sistema costeiro da Amazônia
- 94 **10** Processos físicos na foz do Amazonas
- 98 **11** Climas do passado
- 104 **12** Climas atuais

---

### PARTE 3 112 **Povos indígenas, populações locais e o ecossistema**

---

- 116 **13** Um observatório socioambiental na Amazônia, o INCT Odisseia
- 124 **14** Reconfigurações dos padrões de vida e dinâmicas territoriais
- 132 **15** Plantas cultivadas: produção e conservação da diversidade
- 142 **16** O sistema alimentar
- 148 **17** Biodiversidade espontânea nos agrossistemas: plantas silvestres úteis e plantas invasoras
- 156 **18** Desmatamento, garimpo e mercúrio
- 162 **19** Meio ambiente e saúde na Amazônia, uma abordagem de saúde única

- 
- 171 Lista de autores



---

## Prefácio

---

# Um enigma a decifrar: o papel da ciência na Amazônia

---

MARCEL BURSZTYN  
Socioeconomista,  
Professor titular do Centro de Desenvolvimento Sustentável  
na Universidade de Brasília

Tema recorrente nos debates sobre meio ambiente, mudanças climáticas e sustentabilidade, a Amazônia é formada por um complexo bioma e um também intrincado sistema de relações entre humanos e o meio natural. Sua grandeza (territorial, cultural, de biodiversidade, hídrica, mineral...) desperta interesses e o imaginário desde a chegada dos colonizadores europeus, há cinco séculos. Mas ainda muito pouco se conhece sobre a maior floresta tropical do planeta Terra.

Desde os relatos dos visitantes pioneiros, como Alexandre Rodrigues Ferreira (século XVIII), passando por von Martius e von Spix (no século XIX), até muito recentemente, a Amazônia tem sido objeto de interesse científico. Mas tais estudos são apenas gotas no grande mar de desconhecimento que ainda perdura. Diante de tamanha ignorância, a motivação do colonizador tem sido utilitária. Os jesuítas ibéricos buscavam ervas medicinais ao mesmo tempo em que subvertiam a cultura dos povos originários, em processo de catequese. O extrativismo da borracha, a partir do século XIX, se baseou em núcleos ribeirinhos de povoamento, para desenvolver um sistema mercantil internacional. Os colonos, levados por programas governamentais, na segunda metade do século XX, eram instalados em assentamentos rurais para enfrentar o “inferno verde” e tentar reproduzir ali o mesmo tipo de produção rural que aprenderam em suas regiões de origem, totalmente diferentes da realidade sociocultural e ambiental amazônica. Mineradores, garimpeiros e madeireiros foram atraídos pela possibilidade de riqueza e pelo sonho da prosperidade rápida, deixando um rastro de devastação no seu caminho. O resultado, inevitavelmente, foi inadaptação dos povos tradicionais, degradação ambiental, conflitos socioambientais e culturais. Em suma, uma enorme perda de patrimônio ambiental e cultural.

O modo como sucessivos governos têm lidado com a Amazônia é um reflexo do desconhecimento e da inadaptação, mas também da arrogância das autoridades públicas, que ditam políticas desconectadas da realidade Amazônica. Daí, constatamos que ainda há muitas perguntas para as quais não se tem resposta seguras e muitas respostas (ações) que são dadas sem se conhecer as verdadeiras perguntas.

Até hoje não se tem claro qual é a vocação da região, para servir de orientação às políticas de longo prazo. Não conhecemos ao certo quais são as potencialidades (sabemos que são muitas...) e quais são as limitações (temos certeza de que são preocupantes...). Sabemos que a dinâmica da floresta tem implicações sobre o clima do planeta, mas não sabemos ao certo em que medida e qual é, de fato, a ordem de grandeza das mudanças climáticas globais resultantes ou que resultarão das alterações físicas da imensa floresta tropical.

Temos plena consciência de que a floresta esconde um enorme potencial de aproveitamento econômico, seja na produção de fármacos, seja na de cosméticos, de alimentos, de minerais e tantos outros produtos, madeireiros ou não. Mas não sabemos como explorá-los de forma racional e sustentável. Como evitar que usos potenciais sejam pesquisados, apropriados e patenteados sem que revertam em benefícios para as comunidades locais, para a região ou para o País?

Sabemos das vantagens comparativas que representam possuir um gigantesco manancial de água doce, mas não sabemos como explorá-lo economicamente em benefício das populações locais e de forma sustentável. O máximo que conseguimos, até aqui, tem sido gerar energia elétrica, a partir da construção de grandes barragens que provocam degradação ambiental e geram efeitos sociais negativos, mas pouco contribuem para o desenvolvimento sustentável das comunidades afetadas. Sabemos que os recursos pesqueiros são uma riqueza real e potencial da região, mas não conseguimos transformar esta possibilidade em uso sustentável. A geração de hidroeletricidade barata, uma sedutora vantagem da região, viabiliza indústrias de transformação mineral intensivas em energia, mas não atende a populações lindeiras às barragens e linhas de transmissão.

Em suma, como ainda não aprendemos a usar de forma sustentável as riquezas da região, seguimos praticando “dumping ecológico”, ecocídio e o extermínio cultural dos povos originários. É um reverso da medalha da busca de crescimento econômico, da visão estreita do imediatismo e da mentalidade colonial.

A lista de perguntas sem resposta é longa. E a ela há que se somar as respostas sem pergunta, ou seja, ações que são empreendidas sem o prévio

conhecimento do contexto em que se inserem e das reais expectativas das populações tradicionais, ou sem análise prospectiva de seus resultados. É nesse sentido que uma complexa rede de infraestrutura tem sido implementada na região, ao longo das últimas décadas. E, da mesma forma, também incentivos econômicos e uma política de colonização vêm carreando para a Amazônia investimentos e fluxos de migração, provocando efeitos que demandam medidas corretivas: desmatamento, queimadas, conflitos fundiários, falta de saneamento ambiental nas cidades, contaminação dos rios, esgotamento dos estoques pesqueiros, demanda por serviços públicos em geral.

Respostas sem perguntas previamente formuladas e cientificamente fundamentadas, ou ações sem um Projeto para a região, tem sido a tônica da intervenção pública direta e da iniciativa privada espontânea na Amazônia. A ausência de mecanismos regulatórios efetivos tem permitido que, mesmo diante da retração de certos instrumentos – como os incentivos fiscais – a dinâmica de ocupação da fronteira amazônica não tenha arrefecido.

A construção de infraestrutura viária obedece a uma lógica que ora conflita com as diretrizes da regulação pública em matéria ambiental, ora funciona como validação a posteriori de um processo espontâneo e caótico de ocupação de fronteiras econômicas (agricultura, pecuária, mineração).

Na ausência de autênticas respostas endógenas às perguntas sobre a Amazônia, o que se constata é que vêm sendo empreendidas iniciativas que se revelam como “respostas” exógenas.

A Amazônia é um enigma. Como a esfinge da obra de Sófocles, ela lança, a quem busca penetrá-la, o desafio: decifra-me ou te devoro. Até aqui, ela ainda não tem sido decifrada. No entanto, não é o colono, o garimpeiro, o madeireiro ou o grande fazendeiro que estão sendo devorados. As vítimas são a floresta, os rios, a fauna, as riquezas naturais, a cultura e os povos tradicionais. E, como uma consequência, toda a dinâmica climática do nosso planeta é afetada. Nunca foi tão urgente conhecer melhor, decifrar, esta esfinge!

Diante desse contexto adverso, de descompasso entre intervenções humanas e desconhecimento da capacidade de suporte e das limitações da Amazônia, o papel da ciência é essencial. Há muito o que estudar e para isso o caminho é, inevitavelmente, uma sólida base institucional e a mobilização de pesquisadores(as) em iniciativas ad hoc duráveis e colaborativas.

O livro “Trajetórias de pesquisa na Amazônia Brasileira” é uma notável expressão do esforço em decifrar a palavra da esfinge, não simplesmente pela astúcia de quem soluciona uma charada. É o produto de atividades sistemáticas de pesquisa, reunindo uma ampla equipe internacional, interdisciplinar

e interinstitucional, sob a liderança do IRD (Institut de Recherches sur le Développement, da França), em colaboração com estudiosos(as) de várias instituições que atuam na região. Representa um grande passo para o conhecimento, ao mesmo tempo em que configura um modus operandi criativo e exitoso da condução de estudos colaborativos (entre campos científicos, entre instituições de pesquisa e entre atores).

Tendo como fundamento questões do interesse das ciências da natureza e da vida, a obra nos conduz a resultados de grande valia também para as ciências humanas e sociais. E, sendo assim, apresenta subsídios para que melhores decisões sejam tomadas quanto ao modo como a Amazônia tem sido objeto de políticas e práticas socioeconômicas.

Encontramos, ao longo dos capítulos, elementos que ajudam a explicar como diferentes aspectos da realidade atual estão em jogo, dentre os quais:

- o fator humano (a presença de população imigrante) e seus efeitos disruptivos sobre a cultura;
- o fator demográfico (em que se destaca o acelerado processo de urbanização da região);
- o fator econômico (caracterizado pelo avanço da fronteira do agronegócio, do garimpo, da geração de energia e do surgimento de atividades industriais);
- o fator climático (e seu papel no regime de chuvas e de temperaturas);
- o fator sociocultural (em particular em suas implicações sobre os modos de vida das populações tradicionais, da agricultura familiar e da pesca artesanal);
- o fator segurança (considerando a crescente presença do crime organizado), que se agrava diante da ausência do Estado e de seus mecanismo de governo no território.

Vale assinalar que, da forma como foi organizada e produzida, a obra é acessível e inteligível a um público mais amplo do que o universo acadêmico. É, portanto, um marco relevante tanto para a comunicação científica, quanto para a tomada de decisões. Um importante avanço para que o enigma seja melhor entendido e, quem sabe, um dia, decifrado.

---

## Prefácio

---

# Amazônia: a pesquisa e seu contexto

---

PHILIPPE LÉNA  
Geógrafo,  
Diretor de Pesquisa emérito do IRD

A Amazônia é uma excelente ilustração do que agora é conhecido como o «Antropoceno», devido à extensão e velocidade das transformações às quais está passando, induzidas pelo homem. Para o historiador Dipesh Chakrabarty, este período marca o encontro da história social e da história natural, em outras palavras, o entrelaçamento de duas temporalidades que até recentemente era possível estudar separadamente. A aceleração de fenômenos planetários como o aquecimento global e o colapso da biodiversidade são provas disso. A destruição das florestas (e da vegetação natural em geral) desempenha um papel importante nesta dinâmica. As florestas tropicais estão sendo desmatadas em ritmo acelerado, principalmente pela agricultura industrial e pecuária, apesar dos avisos dos cientistas sobre seu papel na manutenção da biodiversidade e da circulação atmosférica, em outras palavras, da habitabilidade da Terra. A Amazônia desempenha um papel importante nestes equilíbrios regionais e globais, e sua redução e degradação poderia, segundo especialistas, levar a um grande colapso ecológico num futuro próximo. Dois resultados científicos recentes apontam nessa direção. Por um lado, há evidências do que chamou de «rios voadores», ou seja, a circulação de correntes atmosféricas carregadas com a umidade produzida pela floresta e que fornecem água às áreas agrícolas mais produtivas do Brasil, bem como às usinas hidrelétricas: agora uma diminuição das chuvas, atribuída ao desmatamento da Amazônia, tem sido observada nos últimos anos nestas regiões. Por outro lado, a pesquisadora Luciana Gatti mostrou que a floresta está tendendo a

---

1 – O trabalho pioneiro do Professor Eneas Salati, que foi diretor do INPA (Manaus) de 1979 a 1981 e novamente no início dos anos 90, deve ser mencionado aqui. Este trabalho foi continuado por Antônio Nobre, Carlos Nobre, José Marengo, etc.

2 – Gatti, L. V.; et al. . *Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change*. NATURE, v. 595, p. 388-393, 2021.

perder seu papel de sumidouro de carbono e a se tornar uma fonte. De fato, há uma diminuição da precipitação, uma diminuição da umidade e um alongamento da estação seca em grandes partes da Amazônia. Um ponto de não retorno parece ser alcançado.

Além disso, os povos tradicionais que vivem nessas florestas e delas vivem estão ameaçados em todos os lugares, não apenas em seu modo de vida (apropriação de terra, expulsão), mas também em sua mera sobrevivência (danos à sua integridade física). A preservação dos ecossistemas florestais é, portanto, indissoluvelmente uma questão ambiental e social. Daí a relevância do neologismo brasileiro «sócioambiental» para se referir a ele.

Desde o período colonial, a expansão das fronteiras internas e a busca de riqueza para exportação tem sido uma constante. A Amazônia participou à sua maneira (migrações do nordeste para explorar borracha e produtos florestais), sem que houvesse continuidade territorial da dinâmica de povoamento da zona costeira, como foi o caso do resto do Brasil. A floresta amazônica permaneceu em grande parte intacta e representou uma espécie de obstáculo à exploração em larga escala. Tudo isso mudou com o plano «Operação Amazônia» (1968) e os vários projetos de ocupação-exploração dos governos civis ou militar. A abertura de estradas deu acesso ao coração da região e foram criados projetos de colonização ao longo do caminho, que incluíram parcelas para agricultura familiar mista e grandes propriedades para criação de gado. Este foi o início das grandes clareiras, cujas áreas foram calculadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE desde 1988, graças às imagens espaciais. Até 2004, elas oscilaram entre 11.000 e 29.000 km<sup>2</sup>/ano. A busca do projeto colonial, de «integração nacional», é claramente assumida, inclusive nos termos.

Os temas e questões de pesquisa evoluíram junto com seu objeto de estudo, eles se adaptaram e desenvolveram novos temas e métodos. Assim, a maior parte das pesquisas realizadas até 1990 sobre a sociedade regional ou formas de colonização (agrária, mineira, industrial) era do tipo clássico, e estava de acordo com o paradigma dominante da época, que era a questão do desenvolvimento. Em geral, de uma forma crítica. Mas a questão do meio ambiente, embora presente, raramente era primária.

Mudanças importantes vêm de várias direções a partir do final dos anos 1980. A expansão colonial se depara com territórios indígenas e formas tradicionais de ocupação, cujas populações começam a se organizar para resistir. Pesquisadores e ONGs estão se mobilizando. Graças aos avanços tornados possíveis pela Constituição de 1988, as reivindicações territoriais estão sendo expressas: reconhecimento de «territórios indígenas», reservas extrativistas, habitados ou não. A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro em 1992 está sendo

realizada sob pressão internacional para conter o desmatamento e com a participação da sociedade civil. O Programa piloto para a conservação das florestas tropicais brasileiras (PPG7), em grande parte financiado pelo G7 através do Banco Mundial, é lançado em parceria com o governo brasileiro. Este programa cria uma multiplicidade de projetos de desenvolvimento local que levam em conta a dimensão ambiental, e são destinados a agricultores familiares, populações ribeirinhas, extrativistas e ameríndios. Uma grande parte das pesquisas realizadas pelo IRD e seus parceiros foi feita sob a bandeira do desenvolvimento sustentável, mesmo que fosse para criticar as abordagens excessivamente econômicas e financeiras (mecanismos de mercado). Esta foi também a época em que os programas de pesquisa multidisciplinar se tornaram a regra.

Entretanto, as medidas tomadas não conseguiram frear a expansão espacial do agronegócio (especialmente a indústria da carne) e o desmatamento de terras não diminuiu. O novo governo do Partido dos Trabalhadores, que assumiu em janeiro de 2003, teve até a maior taxa de desmatamento (em 2004, 27.772 km<sup>2</sup>) desde o recorde absoluto de 1995. Em 2004, ele lançou o Programa de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia (PPCDAm) e uma série de políticas articuladas que, pela primeira vez, levou a um declínio constante do desmatamento, reduzido a 4.571 km<sup>2</sup> em 2012. Durante este período, os programas financiados pela Agência Nacional de Pesquisa francesa (ANR) permitiram que as parcerias sejam ampliadas e que os locais de estudo sejam multiplicados em uma perspectiva comparativa. As ciências naturais e sociais são freqüentemente associadas dentro de um mesmo projeto. No que diz respeito às ciências sociais (no sentido amplo), as populações locais e suas associações estão se tornando parceiros essenciais. Isto é particularmente verdadeiro para a criação de mapas participativos com a ajuda de imagens de satélite.

Esta dinâmica continua nos anos seguintes, apesar das condições menos favoráveis. Entre 2013 e 2018, os lobbies do agronegócio obtiveram algum relaxamento das regulamentações ambientais, e houve uma tendência ascendente no desmatamento, que atingiu 7.536 km<sup>2</sup> em 2018.

As taxas de desflorestamento são um bom indicador da força da dinâmica colonial e, portanto, dos conflitos. De 2018 a 2022, há quatro anos consecutivos de aumento do desmatamento, chegando a 13.235 km<sup>2</sup> em 2021, e dados parciais para 2022 indicam um novo aumento. A apropriação ilegal de terras públicas, o corte ilegal de madeira e a mineração ilegal de ouro sempre existiram, mas é a escala e a localização que fazem a diferença. Estima-se que 99,8% do desmatamento em 2020 foi ilegal. Por outro lado, depois de 600.000 km<sup>2</sup> terem sido desmatados desde 1980, principalmente ao longo das principais estradas, ou dentro de uma distância razoável, a expansão espacial do extrativismo (agroindústria, mineração, madeira, barragens...)

está agora atacando áreas protegidas, particularmente terras indígenas e áreas ocupadas por populações tradicionais. O aumento dos conflitos levanta novas questões para a pesquisa. Seja a nível físico (contaminação por mercúrio e pesticidas, mudanças nos ecossistemas, etc.) ou a nível social (assassinatos, percepção da violência, fraturas sociais, cooptações, etc.). Também podemos nos perguntar sobre o fato de que os lugares onde o desmatamento e os conflitos são mais intensos são aqueles onde os políticos locais que aderem à dinâmica predatória são favorecidos.

Outras questões surgem no âmbito geopolítico. Em 2020, a economia mundial consumiu 100,6 Gt de recursos naturais (uma pequena parte proveniente da reciclagem), e esta quantidade só pode aumentar, acentuando a pressão extrativista sobre regiões ainda ricas em recursos potenciais e, portanto, sobre povos e ecossistemas. Esta pressão é repassada por agentes econômicos que se beneficiam dela no âmbito nacional, regional e local. Que mudanças e regulamentações seriam necessárias para lidar com isso?

Estes novos desenvolvimentos sem dúvida colocam uma questão e novos desafios para os cientistas, que estão acostumados a considerar os fatos em vez dos objetivos, o «como» em vez do «por quê». Porém, diante do colapso ecológico em curso no mundo, a dimensão axiológica está se tornando inevitável. Está cada vez mais presente nas conferências internacionais (COP, definição de objetivos globais, etc.) e no desenvolvimento de diversas abordagens nas quais a ética é central: justiça climática, justiça ambiental, direitos da natureza, etc. Esta dimensão também está cada vez mais presente no trabalho da Comissão Europeia e nas abordagens de pesquisa.

É importante notar que a quantidade de pesquisas realizadas na Amazônia aumentou enormemente nos últimos trinta anos, especialmente a realizada por pesquisadores da região. O mesmo se aplica ao número de teses, especialmente nos últimos anos.

Qualquer que seja o período e o contexto, o IRD tem sido capaz, há mais de quarenta anos, de colaborar com um grande número de instituições científicas brasileiras e amazônicas, e de contribuir com seus parceiros para o aumento do conhecimento, seja sobre o funcionamento dos ecossistemas amazônicos, as formas de sua utilização por populações tradicionais ou originárias de outras regiões, ou as dinâmicas que levam à sua devastação. Sua apresentação e a riqueza de seu conteúdo certamente encorajarão o leitor a ir além das disciplinas com as quais está familiarizado e deixar a sua curiosidade orientá-lo a explorar áreas que não lhe são bem conhecidas... como muitos pesquisadores que participaram de programas multidisciplinares fizeram!

## Introdução

---

CATHERINE AUBERTIN  
Economista do meio ambiente,  
Diretora de pesquisa emérita do IRD

Este livro marca um passo adiante na pesquisa realizada conjuntamente pelas equipes brasileiras e francesas na Amazônia. De fato, a violência e encadeamento de eventos climáticos, ecológicos e políticos estão mudando as linhas. Em resposta, as abordagens disciplinares estão se hibridizando, as escalas temporal e espacial estão se ampliando, os cientistas estão estabelecendo o diálogo e estão cometidos com as populações locais, a barreira entre natureza e cultura está se tornando difusa. Mais do que nunca, o conhecimento está sendo mobilizado para defender as condições de habitabilidade dos ecossistemas do planeta.

Na atual emergência ecológica e política, a Amazônia é uma alegoria. Seu tamanho em termos de florestas tropicais, rios e pântanos, a riqueza dos recursos biológicos e minerais, a diversidade dos povos indígenas e comunidades locais, as ameaças que enfrenta... a tornam um símbolo para a luta contra a destruição da biodiversidade e dos povos.

Entre o sonho de uma natureza intocada e o sonho de conquista, a Amazônia sempre alimentou esperanças e desesperos. Ela continua sendo a Amazônia do futuro, onde o futuro do planeta pode ser jogado. Enquanto o recém eleito Presidente Lula fez de sua luta contra a fome e o restabelecimento do diálogo democrático com a sociedade suas prioridades, ele também declarou que o Brasil e o planeta precisam de uma Amazônia viva.

A história da Amazônia não começa com a colonização, e nossas pesquisas mostram isso. Seus ecossistemas florestais foram atravessados e modificados por quase dez mil anos pela ação humana. É o lar da domesticação de muitas espécies vegetais; é também o espaço onde várias sociedades foram forjadas, na maioria das vezes em interação. A Amazônia faz parte da história pioneira do Brasil, quando se trata de empurrar cada vez mais para o oeste, contra a floresta e os ameríndios, a linha divisória com a coroa espanhola, até consolidar hoje fronteiras com outros sete países. O Brasil sempre teve que afirmar sua soberania, seja em face do desejo de internacionalizar a navegação da Amazônia no XIX e ou os interesses estratégicos de fornecer borracha para os Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial. Hoje, a Amazônia, especialmente em sua parte brasileira, está no centro dos debates ambientais.



O escopo colossal dos processos ecológicos que ali operam fazem deste patrimônio brasileiro um bem de interesse além das fronteiras nacionais. Por causa de sua biodiversidade, seus serviços ecossistêmicos para regular as chuvas ou como um lugar onde vivem os povos indígenas, é um item chave na agenda das negociações internacionais. Embora seu papel como pulmão do planeta esteja sendo questionado, as negociações da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) ainda a vêem como um sumidouro de carbono que pode compensar as emissões de gases de efeito estufa dos países industrializados.

Assim, é possível explicar o progresso e os retrocessos da política brasileira em relação à Amazônia, mas também em relação à comunidade internacional, com base nos compromissos do Brasil com a UNFCCC.

Com seu compromisso voluntário de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (EGES) até 2020, o Presidente Lula, aproveitando o cenário internacional oferecido pela COP 15 Clima em Copenhague em 2009, coroou o Brasil como um campeão ambiental. A política nacional sobre mudança climática estabelece como meta uma redução de 80% na taxa de desmatamento na Amazônia em comparação com o período 1996-2005, e uma redução de 40% no bioma Cerrado em comparação com o período 1999-2005.

O desmatamento da Amazônia até os anos 2000 estava ligado ao seu modo de ocupação, segundo o mito da fronteira promovido pelo estado federal: ao longo das estradas e em projetos de colonização; em frentes pioneiras agrícolas seguindo o «arco do desmatamento» por ocasião da abertura de estradas federais, projetos de mineração e construções de barragens hidrelétricas. Isto terminou com o choque do desmatamento recorde de 27.772 km<sup>2</sup> em 2004. O Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) foi criado, juntamente com toda uma série de medidas: captação de recursos internacionais através do Fundo Amazônia, restrições aos créditos agrícolas, monitoramento via satélite, fortalecimento de órgãos ambientais como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis IBAMA e o Instituto Chico Mendes, criação de áreas protegidas, legalização de terras indígenas e quilombolas...

Naturalmente, a linha de base foi sabiamente escolhida, e em Copenhague o desmatamento não era mais do que um 5.000 km<sup>2</sup>, diminuindo constantemente desde 2004. A meta já estava quase atingida. Assim, o Brasil conseguiu ser triunfante ao anunciar sua Contribuição Nacional Planejada e Determinada (INDC) na COP 21 em Paris em 2015, com a meta de reduzir os GEE em 37% em 2025 e 43% em 2030 em relação a 2005. Ele confirma sua política com metas de desmatamento ilegal zero e compensação total das emissões de CO<sub>2</sub> devido à remoção legal da vegetação até 2030. Além disso,

um plano agrícola de baixo carbono (ABC) e o novo código florestal estão sendo promovidos.

Estas ações são apoiadas pela sociedade civil, cuja participação é necessária nos diversos órgãos de gestão. O movimento socioambiental reúne lutas pela justiça social e ambiental, enquanto as empresas privadas de soja e carne [especificar? marketing?] impõem moratórias aos produtos das áreas desmatadas. Os pesquisadores não são deixados de fora. Eles encontraram seu lugar na sociedade civil para desenvolver as ciências ambientais, graças a projetos apoiados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq e suas parcerias com Universidades, o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia INPA, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN e o Museu Goeldi... O tempo estava cheio de esperança diante da queda do desmatamento e da criação de áreas protegidas, a demarcação de terras indígenas e quilombos. Entretanto, houve preocupações com o Cerrado, menos conhecido na mídia, e cujo desmatamento foi maior do que o da Amazônia até 2019.

O mandato do Presidente Bolsonaro tem visto um retrocesso nas políticas ambientais, com o enfraquecimento das entidades ambientais e uma série de projetos de lei para legalizar a invasão de terras públicas e a exploração de terras indígenas. Apesar da resistência do judiciário a estes projetos, o ritmo do desmatamento, como o da especulação fundiária, tem se acelerado em consequência da apropriação ilegal de terras.

A contribuição do Brasil para as últimas Conferências das Partes, tanto Climáticas como de Biodiversidade, marca este retrocesso. O país deixou de ser líder nas negociações para passar a ser um país obstrutor. As metas de redução do EGES são reafirmadas, mas em uma linha de base modificada que torna a ambição menor, violando o princípio de não regressão do Acordo de Paris. Para alcançar a neutralidade de carbono até 2060, o governo Bolsonaro está confiando nos mecanismos do mercado, não na mobilização de todos os atores; ele está se afirmando como o principal ator no mercado voluntário de compensação de carbono.

Estas instabilidades tiveram repercussões nas parcerias científicas entre o Brasil e a França. Entretanto, graças a parcerias de longo prazo, tem sido possível continuar os projetos. O trabalho de campo com as populações envolvidas tem sido reforçado. Os programas de intercâmbio para o treinamento de estudantes e o intercâmbio de pesquisadores brasileiros e franceses continuaram.

Os programas de pesquisa têm acompanhado estes novos desafios socioambientais. Inicialmente focada em inventários e conhecimento de



espécies ou redes hidrológicas, a pesquisa se abriu para a gestão de recursos e proteção da biodiversidade. As parcerias agora incluem gestores de órgãos ambientais e populações locais. A adaptação das populações às mudanças ambientais, para a qual contribuem ou a que se submetem, é tanto um tema de estudos colaborativos como um objetivo de pesquisa. O objetivo é avaliar os impactos das políticas públicas que promovem ou restringem o desmatamento e dos grandes projetos de infraestrutura (barragens hidrelétricas, estradas, etc.) que perturbam os territórios.

Esta ciência comprometida, envolvida no diálogo com as sociedades, está lançando as bases científicas para uma adaptação sustentável. Ela contribui para os avanços tecnológicos. Em particular, as tecnologias baseadas na observação da terra, que tornam possível monitorar as mudanças e estão agora sendo aplicadas à hidrologia, juntamente com as ciências da informação e inteligência artificial, estão produzindo enormes quantidades de dados. Metabarcodificação e métodos de DNA ambiental revolucionaram a coleta e a interpretação das amostras de matéria orgânica coletadas. Uma vez processados, estes dados são disponibilizados gratuitamente nas plataformas que podem ser consultadas por qualquer pessoa, e todos podem usá-los para tomar medidas.

Não é mais possível realizar pesquisas na Amazônia isoladamente de seu contexto geográfico e político e, sobretudo, do contexto nacional, como vimos com o Cerrado. A pesquisa amazônica aproveita as questões, experiências e resultados que estão sendo realizados em outros continentes e em outros países, tanto quanto os alimenta. Observamos a importância das comparações com a floresta tropical mas também com os grandes rios e sistemas agrícolas da África, assim como com estudos realizados em países vizinhos e especialmente na Guiana Francesa. Os estudos mostram as inter-relações entre as mudanças do uso da terra e das chuvas na Amazônia e mudanças do clima nos países andinos, até o Cone Sul e através do Atlântico. O herbário do Museu Goeldi mantém trocas sustentadas com o herbário de Cayenne e com os grandes herbários internacionais. Os desafios ambientais, a mudança climática, a erosão da biodiversidade, a poluição, vão além das fronteiras da Amazônia.

Este livro não é uma exceção à tradição de seguir o caminho clássico das ciências da terra para as ciências da vida e finalmente para as ciências humanas e sociais. Entretanto, o que é notável aqui é que a maioria dos textos insiste na importância da multidisciplinaridade e reivindica uma ciência que é ao mesmo tempo comprometida e inclusiva. As questões ecológicas e sociais implicam em visões globais na escala do planeta, mas também na escala dos ecossistemas e territórios, aceitando a diversidade dos mundos.

Hoje, o Presidente Lula está baseando seu novo mandato na restauração do diálogo e na participação da sociedade no desenvolvimento de políticas públicas. Ele diz estar aberto à cooperação internacional para preservar a Amazônia, seja na forma de investimento ou pesquisa científica, respeitando ao mesmo tempo a soberania brasileira.

É esta ciência aberta à sociedade que é apresentada neste livro.

---

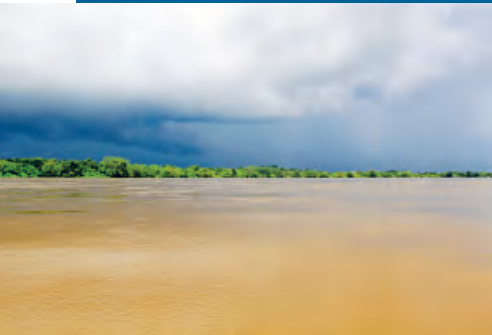
# MONITORAR AS DINÂMICAS, ENTENDER OS PROCESSOS

---

Cheia do Rio  
Amazonas em 2012,  
Iquitos, Peru.



A bacia amazônica é de grande importância para o equilíbrio hidrológico global e para o clima de nosso planeta. As muitas barragens em construção ou planejadas terão consequências ainda não avaliadas sobre as transferências de água e sedimentos na bacia. A qualidade da água é afetada pelas descargas de minas, por vazamentos de hidrocarbonetos, por descargas de substâncias tóxicas utilizadas na agricultura e por resíduos urbanos. O desmatamento, que é responsável pela perda de habitats e pela fragmentação dos ecossistemas, também afeta as transferências de água e aumenta a transferência de certos metais através da erosão do solo. Entretanto, as informações disponíveis sobre o ambiente amazônico ainda são fragmentárias e não homogêneas em toda a bacia. Por outro lado, o trabalho atual do IRD na bacia amazônica, enraizado em pesquisas de longo prazo, realizado em parceria com muitos parceiros acadêmicos e, em alguns casos, com gestores das bacias (observatório HyBam), cobre os principais campos de conhecimento necessários para o entendimento e monitoramento do ecossistema. O IRD também desenvolveu, com seus parceiros, metodologias inovadoras de monitoramento de recursos que provavelmente complementarão o monitoramento tradicional, tornando-o menos oneroso, ao passo que o homogeneizará em toda a bacia. Esta primeira parte apresenta estas informações resultantes da observação e do monitoramento, o que permite compreender os processos em jogo, sendo a base para a tomada de decisões para a gestão sustentável dos recursos.





1

# O observatório HyBAm em grandes rios da Amazônia

O observatório HyBAm nos principais rios da Amazônia permite informar e compreender as mudanças globais e locais que afetam a bacia, através de sua abordagem multidisciplinar e de longo prazo, através de sua estrutura em parceria, do acesso aberto aos dados e de um forte incentivo a pesquisa e capacitação.

## PARCEIROS

Instituto Nacional de Meteorologia e Hidrologia (INAMHI), Equador

Serviço Meteorológico e Hidrológico Nacional (SENAMHI), Peru

Senamhi, Bolívia

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasil

Departamento de Meio Ambiente, de Planejamento e Habitação (Negócio), Guiana Francesa

Office de l'eau da Guiana francesa

Grupo de Interesse Econômico para o Serviço Comum de Manutenção de Vias Navegáveis (SCEVN), Brazzaville, República do Congo

Instituto Venezuelano de Pesquisa Científica (IVIC), Venezuela

Instituto de Geofísica do Peru

A Amazônia tem um fluxo médio de 206.000m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, o que representa cerca de 20% do fluxo de água doce continental para os oceanos. Seu fluxo é, portanto, de longe, o mais alto de todos os rios do mundo. Mas, acima de tudo, é uma bacia hidrográfica quase continental sem paralelo, drenando cerca de 4% das terras emersas, com afluentes poderosos e diversos. A bacia abriga a maior floresta tropical do mundo, representando 58% das florestas tropicais do mundo e mais de 20% da biodiversidade mundial. Ela afeta a biosfera através dos imensos fluxos de água e matéria que a deixam na saída, mas também em direção à atmosfera (fluxos de umidade, gases de efeito estufa): ela contribui com 15% dos fluxos verticais da evapotranspiração continental e, portanto, desempenha um papel importante na circulação atmosférica global. Embora os Andes ocupem apenas 11% da superfície da bacia, eles são a principal fonte de entradas primárias de sedimentos (95%), mas também de elementos dissolvidos e nutrientes (36%), que são transportadas pelos diversos afluentes da Amazônia até o oceano. Estes fluxos são vitais para a biodiversidade amazônica e são a fonte da disponibilidade de muitos recursos naturais (por exemplo, hidrocarbonetos). Os Andes também desempenham um papel decisivo na transferência de água e materiais através da deformação tectônica da bacia, criando sumidouros de sedimentos e controlando a dinâmica morfológica dos rios e planícies aluviais.

A bacia amazônica é, portanto, uma sentinela do impacto da mudança climática no planeta. A hidrologia da Amazônia teve, e continua tendo, um impacto considerável no clima regional e global passado e presente (ver Capítulos 11 e 12).



Cheia do Rio Amazonas, Brasil.

Atualmente, toda a bacia está sujeita a fortes pressões antropogênicas: desmatamento, agricultura e pecuária, mineração legal e ilegal, poluição, mudanças no uso da terra devido à urbanização e construção de barragens. Além disso, uma aceleração de eventos extremos, como enchentes e secas, tem sido observada nas últimas décadas, o que tem um impacto considerável no meio ambiente e nas populações de toda a região.

## Um pouco de história

No Brasil, pesquisadores hidrológicos da Orstom (a predecessora do IRD) trabalharam principalmente na região Nordeste até o início dos anos 90. Em 1981, a Orstom criou um escritório permanente na DNAEE (Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica, hoje ANA, Agência Nacional de Águas), em parte para apoiar o crescente compromisso do Brasil com a gestão dos recursos hídricos, e em parte devido ao interesse da DNAEE nas disposições legais e econômicas francesas para a gestão da água. Esta necessidade de conhecimento da gestão da água por parte do Brasil se cruzou com um dos principais desenvolvimentos conceituais das ciências hidrológicas no IRD, que era modificar a abordagem da engenharia hidrológica (ou seja, aplicada e frequentemente pontual) para o conhecimento do envoltório fluido da terra (este conceito evoluiu agora para o conceito de

## PARCEIROS

Centro Regional do Clima para o Oeste da América do Sul (CiiFen), Equador

Universidade Nacional Agrícola "La Molina" (UNALM), Peru

Universidade Mayor de San Andres (UMSA), Bolívia

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil

Universidade Central da Venezuela (UCV)

Universidade Marien Ngouabi (UMNG), Brazzaville, República do Congo

'zona crítica') e a transferência de água e matéria através dos continentes e para os oceanos. Esta evolução apareceu pela primeira vez na África, mas logo voltou sua atenção para o maior objeto hidrológico do mundo: a bacia amazônica.

Para implementar esta nova abordagem, primeiro foi necessário construir bases de dados hidrológicos que fossem facilmente acessíveis a todos. Ao contrário da cooperação científica de outros países, o IRD concentrou-se, portanto, na criação de redes de medição de longo prazo, o que o levou a construir parcerias sustentáveis com diversas instituições, agências e universidades da bacia amazônica. Como resultado, o IRD tem sido capaz de conduzir uma extensa capacitação e formação de estudantes, muitos dos quais completaram seus estudos de doutorado na França. Alguns desses estudantes retornaram posteriormente aos seus países de origem para realizar pesquisas reconhecidas internacionalmente.

O programa HyBam no Brasil - que prefigurava o observatório do mesmo nome - e o PHICAB na Bolívia (1982-1992) são emblemáticos desta nova abordagem. Ambos visavam quantificar a transferência de água e matéria através dos rios amazônicos dos Andes para o Atlântico, e compreender os mecanismos que controlam essas transferências. Em 1992, o programa HyBAM começou a cooperar com os outros sete países que assinaram o Tratado de Cooperação Amazônica em Brasília, em 1978. Com base nestes dois programas regionais, o Observatório de Pesquisa Ambiental HyBAM (ORE) foi criado em 2003 para fornecer informações e compreender o impacto das mudanças globais que afetam os três maiores rios tropicais do mundo (Amazônia, Congo, Orinoco), focalizando na observação em longo prazo da dinâmica hidro-sedimentar e geoquímica. O observatório é hoje formado por 18 instituições parceiras (universidades, agências e serviços hidrometeorológicos) e conta com uma rede de 42 estações hidrológicas (17 das quais são certificadas pelo CNRS e pelo Instituto Nacional das Ciências do Universo [INSU]), distribuídas em sete países (Brasil, Equador, Peru, Bolívia, Venezuela, Congo e Guiana Francesa) e três continentes. Rotulado como Serviço do Observatório Nacional (SNO) em 2016, o HyBAM é agora apoiado financeiramente pelo IRD, o CNRS, o Observatório Midi-Pyrénées (OMP) e estruturas parceiras no Sul. Desde 2011, está envolvido nos Sistemas de Observação e experimentação de longo prazo para Pesquisa Ambiental (SOERE) e Redes de Bacias Hidrográficas (RBV) e aderiu à infraestrutura de pesquisa da Ozcar.

A missão da SNO HyBAM é:

- criar dados hidrológicos, sedimentares e geoquímicos, combinando observações *in situ*, observações espaciais e análises laboratoriais;
- disponibilizar essas informações para a comunidade científica através de um portal web, atualizado regularmente;
- realizar atividades de treinamento para a comunidade técnica e científica do Sul que trabalha com recursos hídricos na região amazônica;
- participar da análise e valorização dos dados produzidos através de publicações, atividades de animação e programas de pesquisa, dentro dos

quais são realizados estudos de mestrado e doutorado (estudantes do Norte e do Sul).

Desde sua criação, o observatório HyBAM tornou possível quantificar, na maioria dos casos pela primeira vez, os fluxos de água e materiais nos principais rios da Amazônia e construir bases de dados robustas em longo prazo. Abriu e apoiou muitos caminhos de pesquisa, incluindo o uso de dados espaciais para monitorar recursos hídricos, bem como o estudo de várzeas, zonas de inundação que são o local de trocas complexas com o rio. A compreensão dessas trocas é essencial para estabelecer o equilíbrio hídrico e material do rio, que é da mesma ordem de grandeza das vazões entregues ao oceano pelo rio Amazonas.

### Como a bacia é monitorada?

Operar uma rede hidrológica em uma área tão grande e em estações de medição que muitas vezes são de difícil acesso não é uma tarefa fácil. O sistema fluvial amazônico é composto por rios de vários milhares de quilômetros de comprimento, com trechos de mais de 10 km de largura, até 100 m de profundidade e com declives muito suaves (da ordem de um centímetro por quilômetro). Foi necessário, portanto, inventar protocolos de medição adaptados a esses rios incomuns.

Este foi o advento de uma verdadeira revolução técnica na medição de vazões em grandes rios, o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), que permitiu à SNO HyBAM estabelecer as primeiras curvas de classificação e quantificar as vazões dos principais rios da Amazônia. Esta técnica permite que o campo de velocidade em uma seção seja descrito por completo a partir de medições detalhadas, precisas e de alta frequência em rios amplos e profundos, ou seja, onde as técnicas tradicionais de aferição eram demoradas, complexas, imprecisas, incompletas, caras, perigosas ou até mesmo fisicamente impossíveis de serem implementadas.

Desde 2003, entre duas e quatro campanhas por ano dedicadas à medição de vazões ADCP para o estabelecimento de curvas chave cota/vazão foram realizadas em cada estação, tendo o cuidado de cobrir uma ampla variedade de condições hidrológicas. Foi dada especial atenção à medição a montante e a jusante de eventos extremos, tais como as inundações históricas de 2012 e 2015 na Amazônia ou 2014 no rio Madeira, e os mais severos baixos fluxos já registrados: 2005 e 2010.

Além disso, os registros do nível da água coletados em cada estação pelos observadores foram pacientemente criticados e ampliados pelos engenheiros do observatório. Estes dados são essenciais para o cálculo dos fluxos de água e, em seguida, dos fluxos de material. Se necessário, os dados *in situ* são complementados ou criticados com dados de satélite sobre o nível da água (altimetria espacial). O observatório também desenvolveu software para processamento e banco de dados hidrológicos e espaciais.

A fim de levar em conta a variabilidade temporal das concentrações médias transportadas pelos grandes rios amazônicos durante o ciclo hidrológico, o SNO HyBAM optou por uma estratégia de monitoramento inframensal das concentrações utilizando um método de amostragem índice: em cada local



Medições hidráulicas nos rios da Amazônia.



Medição por ADCP.



de medição, um observador tira regularmente uma amostra da superfície do rio, seguindo um plano de amostragem. O plano de amostragem varia de acordo com as estações, a fim de se adaptar aos hidrogramas observadas. Estas medições in situ são completadas com dados extraídos de imagens de satélite usando algoritmos desenvolvidos no coração do observatório. Durante as campanhas dedicadas às medições de fluxo ADCP, estas amostras são completadas por uma amostragem detalhada de toda a seção: estas medições permitem estabelecer uma calibração entre a amostra índice coletada pelo observador e a concentração média efetivamente transportada pelo rio.

Por exemplo, foi estimado que o fluxo sólido do rio Amazonas é de cerca de 1.100 milhões de toneladas/ano, com um aporte total de sedimentos da cadeia andina de 1,3 bilhões de toneladas/ano (cerca de 500 km<sup>3</sup>). Desde 2003, foram realizadas 1.200 medições de fluxo ADCP, correspondentes a 300 missões de campo, foram coletadas mais de 20.000 amostras de sólidos em suspensão (SS) e foram produzidos 140.000 dados geoquímicos. Como resultado dessas medições, foram produzidos 14.000.000 de dados de fluxo diário. Após avaliação, esses dados foram arquivados e compartilhados on-line no site do observatório.

### Quais são os desafios para esta bacia em transição?

Diante da pressão antrópica e dos desafios da mudança global (mudança climática e declínio da biodiversidade), a bacia amazônica está passando por grandes mudanças. Neste contexto, o observatório regional HyBAm tem em seus bancos de dados uma parte do passado e do presente dos rios, uma ferramenta fundamental para medir a extensão das mudanças atuais e futuras e para interpretar a origem dessas mudanças. Portanto, no âmbito científico, é essencial continuar mantendo as estações, o que implica em fornecer os recursos financeiros e humanos necessários para esta tarefa.

Ao mesmo tempo, o observatório continua a desenvolver seus protocolos de medição e a inovar para melhorar ainda mais a qualidade de suas medições, aumentar as variáveis observadas e refinar espacialmente seus balanços materiais: em média, o HyBAm possui apenas uma estação a cada 180.000 km<sup>2</sup> na bacia amazônica. Assim, o observatório está desenvolvendo uma abordagem integrada de monitoramento de fluxos hidrossedimentares, combinando observações de satélite e modelagem hidrológica. Ao calibrar e validar esta abordagem em suas estações e observações in situ, será possível criar as chamadas estações “virtuais” (isto é, sem observações in situ) para completar efetivamente a rede de medição.

Finalmente, no âmbito da sociedade, existem grandes desafios. A Amazônia é um mundo onde os rios são tanto recursos quanto vias de comunicação para as populações ribeirinhas. Portanto, eventos extremos significam interrupção das vias de comunicação e dificuldades de acesso aos serviços básicos, como saúde e educação, para milhares de pessoas. Neste sentido, foi criada uma iniciativa digital: Rios OnLine, um projeto de ciência cidadã e de divulgação concebido por pesquisadores e estudantes da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), do Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas (INPA) e da Universidade Estadual do Amazonas (UEA), que anda de mãos dadas com

o observatório. Seu objetivo é disseminar o conhecimento hidrológico de uma forma compreensível para o público em geral através de uma plataforma web. Também tem uma conta na mídia social que publica fotografias de rios tiradas pela população local. Através de tais iniciativas, o HyBAm espera aumentar a conscientização e iniciar um diálogo cívico para melhor se adaptar às mudanças futuras (ver Capítulo 13).

---

### Para ir mais longe

<https://hybam.obs-mip.fr/>

<https://sites.google.com/view/rios-on-line/>

[www.instagram.com/rios\\_online/](http://www.instagram.com/rios_online/)

---

### Participaram das observações (lista não exaustiva)

William Santini (IRD), Naziano Filizola (UFAM), Jean-Michel Martinez (IRD), Jean-Loup Guyot (IRD), Rodrigo Pombosa (Inamhi), Philippe Vauchel (IRD), Marco Paredes (Senamhi Peru), Jhonatan Pérez (Senamhi Peru), Pascal Fraizy† (IRD), Erick Paredes Vásquez (Autoridade Local del Agua, ALA, Atalaya, Peru), Hugo Cutile (Senamhi Bolívia), Oscar Puita (Senamhi Bolívia), David Terrazas (Senamhi Bolívia), André Martinelli (Serviço Geológico do Brasil, SGB-CPRM), Franck Timouk (IRD), Alain Laraque (IRD), Jean-Claude Doudou (IRD), Guy Moukandi (UMNG), Christelle Lagane (IRD), Jonathan Prunier (IRD), Noré Arevalo (Unalm), Hector Calle (Senamhi Bolívia), Keila Aniceito (Ufam), Ana Emilia Diniz (Ufam), Leylane Corrêa (Ufam), Gérard Cochonneau (IRD), Elisa Armijos (IGP), Franklin Mujica (SENAMHI Bolívia), Grover Apaza (SENAMHI Bolívia), Waldo Lavado (SENAMHI Peru), Jorge Carranza (SENAMHI Peru), Nilton Fuertes (SENAMHI Peru), Marjorie Gallay (OEG), Bosco, Baxinho.



2

## Mensurar a diversidade florestal

Representando cerca de 45% das florestas tropicais do mundo, a Amazônia é o ecossistema terrestre mais diversificado do planeta. A área total deste bioma de quase 7 milhões de quilômetros quadrados – 25 vezes o tamanho do Reino Unido – é compartilhada por 9 países sul-americanos.



Copa das árvores na Guiana Francesa.

### Contexto

Talvez devido à sua imensidão, a floresta tropical tenha sido percebida como um lugar vasto, inóspito, selvagem e homogêneo. No entanto, como veremos na Parte III deste livro, por si só, a Amazônia brasileira é habitada por mais de 180 povos indígenas, assim como mais de 1.000 comunidades quilombolas (comunidades formadas por descendentes de escravos que praticam a agricultura), e sua população foi estimada em 20 milhões em 2000. Embora a população de ocupação recente esteja concentrada principalmente nos centros urbanos de cada estado da Amazônia brasileira (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e partes de Mato Grosso, Tocantins e Maranhão), a diversidade do bioma Amazônia sempre foi explorada por populações indígenas e rurais tradicionais, e continua a ser assim até hoje.

Os estudos sobre o patrimônio florestal amazônico começaram no Orstom/IRD por dois caminhos diferentes: uma abordagem agronômica, em Belém, com as primeiras ligações entre o Instituto Amazônico em Belém e o Instituto de Desenvolvimento Econômico e Rural Tropical (IDERT) em Adiopodoumé, e a descoberta, durante uma primeira missão na Amazônia pelo especialista em agronomia e fitopatologia tropical Georges Mangenot, da extrema semelhança fisionômica e, portanto, ecológica entre a Amazônia e as florestas da África Ocidental, dos Camarões e da bacia congoleza. A segunda é uma abordagem botânica e depois etnológica, com a criação de uma equipe no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) em Manaus a partir de 1992 (Jean-Louis Guillaumet), para estudar as modificações ecológicas devidas à exploração agrosilvopastoral da floresta.

A floresta tropical amazônica é o principal sumidouro de carbono terrestre do planeta, capturando dióxido de carbono da atmosfera através do mecanismo da fotossíntese. Pode-se supor que uma floresta que está “em equilíbrio”, crescendo tanto quanto morre, é neutra em carbono.



Floresta, Guiana Francesa.

Estudos recentes procuram estabelecer até que ponto o desmatamento transforma a região amazônica em uma fonte de carbono, e como a função do sumidouro das partes florestais restantes evolui no contexto da mudança climática. Estas perguntas não podem ser respondidas sem o conhecimento dos padrões de variabilidade “natural” da floresta e dos impactos das mudanças climáticas e antropogênicas.

A Amazônia apresenta uma extrema heterogeneidade espacial e temporal em todas as escalas de observação. A pesquisa sobre esta ecologia espacial, iniciada no Brasil, está atualmente focada na Guiana Francesa e na rede de parcelas permanentes de inventário de árvores, mas continua no Brasil através do Rainfor (Amazon Forest Inventory Network, <http://www.rainfor.org>) e da Rede de Diversidade da Amazônia (ATDN, <https://atdn.myspecies.info/node/2456>), bem como através das contribuições do IRD ao Observatório Regional da Amazônia da Organização do tratado de Cooperação Amazônica (OTCA) e do estudo dos estoques de biomassa por sensoriamento remoto (em parceria com o Instituto de Pesquisa Científica e Técnica do Estado do Amapá, IEPA, Brasil).

### PARCEIROS

Instituto Nacional de Meteorologia e Hidrologia (INAMHI), Equador

Herbário da Guiana Francesa

Parque Amazônico da Guiana Francesa

Office National des Forêts (ONF), Guiana Francesa

Instituto de Pesquisa Científica e Instituto Técnico do Estado do Amapá (IEPA), Brasil



### Como medir a diversidade florestal em uma área tão grande?

Uma maneira de avaliar a biodiversidade vegetal é contar ou enumerar as espécies presentes em uma comunidade, geralmente em uma pequena área. Os inventários utilizam amostragem quantitativa para inicialmente fornecer informações sobre a presença ou ausência de espécies em determinadas áreas. O produto destes estudos são listas de espécies que alimentam as coleções biológicas de museus como o Museu Emílio Goeldi (Pará) e o Herbário da Guiana Francesa. Esta última foi criada e mantida desde 1960 pelo Orstom/IRD como ferramenta científica e patrimonial para o conhecimento de espécies que às vezes estão ameaçadas ou em perigo de extinção.

Os chamados “projetos ecológicos de longo prazo” (PELD), cujo objetivo principal é estudar a estrutura, composição e compreensão dos processos ecológicos, utilizam o estabelecimento e a manutenção de parcelas permanentes. Este método é muito caro e requer um longo período de tempo para implementação, coleta de dados, e manutenção das parcelas.

Os Programas de Avaliação Rápida (RAP) são às vezes usados para avaliar a composição e o número de espécies amostradas em dez transectos lineares de 2x50m, com uma área total de 0,1 ha. Estes dois últimos métodos são comuns nos estudos das comunidades vegetais.

Outra abordagem da pesquisa sobre biodiversidade trata de analisar a variabilidade genética de indivíduos ou de populações de espécies. A diversidade genética é a variedade de alelos e genótipos presentes em um grupo (populações, espécies ou grupos de espécies). A diversidade genética é necessária para que as populações evoluam e enfrentem as mudanças ambientais.

Dependendo da ocupação das espécies, existem zonas de sucessão primária (ocupação lenta por uma sucessão de espécies vegetais em um substrato geológico inicialmente não ocupado pela vegetação) e secundária (incutir-se em um substrato que anteriormente suportava vegetação, mas que sofre distúrbios ecológicos). Ao longo do processo de sucessão, a composição das espécies da comunidade muda.

O processo de sucessão secundária mantém as comunidades em um estado dinâmico: os indivíduos morrem e são então substituídos por outros. A manutenção da alta diversidade biológica presente na floresta está em parte relacionada à heterogeneidade ambiental e geográfica (por exemplo, alta pluviosidade), mas também a processos locais, como a competição por luz e água ou a dispersão de sementes por animais frugívoros. Ecologistas e silvicultores estudam as clareiras (chamadas de “chablis” em franceses ou derrubada de árvore quando são criadas pela queda natural de uma ou mais árvores) porque desempenham um papel importante na regeneração após os distúrbios. A compreensão dos mecanismos de regeneração e da dinâmica florestal permite, por exemplo, limitar a exploração florestal.

Muitos estudos também tentaram determinar classes florísticas ou classificar os tipos de florestas presentes no bioma amazônico. Na maioria das vezes, as classificações florestais são baseadas no clima, tipos de solo e na fisionomia ou

aparência geral de uma floresta, incluindo altura, espaçamento e estrutura de suas espécies dominantes e, até certo ponto, composição florística.

A biodiversidade pode ser quantificada através de diferentes métodos. As mais utilizadas são a riqueza (número de espécies presentes em uma determinada área ou habitat) e a equidade (equidade reflete a uniformidade da distribuição da abundância entre as espécies em uma comunidade) de espécies. Dentro de uma comunidade, a abundância varia entre as espécies, sendo algumas muito abundantes (dominantes) e outras pouco abundantes (raras) e extremamente vulneráveis às mudanças. Os padrões de abundância, no entanto, podem variar de uma parte da Amazônia para outra.

No entanto, outros métodos são necessários para dar uma estimativa da diversidade florestal na escala da vasta bacia amazônica. Alguns proxys - um proxy é uma variável que não é necessariamente relevante para uma questão específica, mas que mostra correlação com uma variável difícilmente ou até não mensurável - têm sido utilizados, tais como a precipitação anual total, para a qual alguns estudos têm mostrado uma correlação com a diversidade florestal. Os estudos estatísticos permitem extrapolar a diversidade a partir do grande número de análises realizadas na escala da parcela.

### O que pode ser dito sobre a diversidade da floresta tropical amazônica?

Uma equipe internacional, incluindo pesquisadores do IRD, publicou vários trabalhos importantes sobre a diversidade da floresta amazônica.

Realizou-se uma análise com base nas 16 principais famílias de árvores, a qual identificou um total de 292 famílias de plantas, das quais 140 contêm espécies de árvores. Desse grande número, apenas 16 famílias respondem por quase 80% de todas as árvores que atingem 10 cm de diâmetro à altura do peito (DHP). Esta análise permitiu classificar os tipos de florestas em quatro classes: florestas em solos lateríticos amarelos ou vermelhos, também conhecidos como florestas de terra firme; florestas de planície alagável; florestas em podzóis ou areia branca, que são solos altamente empobrecidos; e florestas pantanosas.

Para a Amazônia, a quantidade total de precipitação anual não parece ser um bom proxy da diversidade local. A variável mais importante é a área ocupada pelo tipo de floresta. Quanto maior a área, maior a diversidade, mais fragmentado o espaço e menor a diversidade, mas maior o número de espécies endêmicas. Neste sentido, as florestas de terra firme são as mais diversas, enquanto as florestas de podzol contêm um grande número de espécies endêmicas.

Através de 530.025 coleções reportadas para a Amazônia entre 1707 e 2015, a mesma equipe registrou um total de 11.676 espécies de árvores, em 1.225 gêneros e 140 famílias.

A extrapolação por um método de regressão do número de espécies coletadas em 1.170 parcelas espalhadas pela Amazônia e pelo Escudo das Guianas estimou a diversidade geral do bioma amazônico em 16.000 espécies. Dessas 16.000 espécies, 227 foram classificadas como hiperdominantes, já que representam

metade de todas as árvores da Amazônia (1,4% de todas as espécies), enquanto as 11.000 espécies mais raras representam apenas 0,12% do total das espécies. Uma proporção significativa dessas espécies hiperdominantes pertence a três famílias, incluindo as palmeiras.

#### Em conclusão

Ainda há muita incerteza e debate científico sobre o número de espécies presentes na Amazônia. O fato de que 10.000 espécies raras, pouco conhecidas e pouco documentadas de árvores estão potencialmente ameaçadas porque ocupam áreas pequenas e fragmentadas é motivo de grande preocupação. O desmatamento de uma área muito pequena e diversificada pode ser catastrófico. As evidências recentes da correlação entre a perda da biodiversidade e a propagação de doenças zoonóticas e pandemias exacerbam esta preocupação.

Neste cenário, o desmatamento, a fragmentação florestal resultante e a intensificação de eventos extremos como a seca, colocam em perigo a Amazônia que conhecemos hoje

Para responder a essas emergências, é essencial que a ciência seja capaz de estudar a diversidade das florestas com o apoio dos formuladores de políticas, da sociedade civil e dos cidadãos.

---

#### Para mais informações

MICHON G., CARRIÈRE S., MOIZO B., 2019 – *Habiter la forêt tropicale au XXI<sup>e</sup> siècle*. Marseille, IRD Éditions, 482 p.

TER STEEGE H. *et al.*, 2016 – The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports*, 6 (29549). 10.1038/srep29549.

TER STEEGE H. *et al.*, 2000 – An Analysis of the Floristic Composition and Diversity of Amazonian Forests Including Those of the Guiana Shield. *Journal of Tropical Ecology*, 16 (6) : 801-828.

---



Palmeira, floresta amazônica pantanosa (igapó), Brasil



Lianas na floresta pantanosa amazônica (igapó), Brasil.

#### Participaram das pesquisas

Raphaël Pélissier (IRD), Pierre Couteron (IRD), Piero Delprete (IRD), Julien Engel (IRD), Hubert de Foresta (IRD), Sophie Gonzales (IRD), Jean François Molino (IRD), Marie-Françoise Prevost (IRD), Christophe Proisy (IRD), Daniel Sabatier (IRD), Grégoire Vincent (IRD).



3

## Monitorar o desmatamento e a degradação florestal

As florestas tropicais, que sempre foram exploradas, estão sujeitas a desmatamento por várias décadas, estimuladas pela perspectiva de lucro através de atividades agrícolas extensivas. A consciência internacional sobre a importância da conservação da biodiversidade exige a sua preservação.

### Contexto

A Amazônia é particularmente afetada pelo desmatamento, incentivado principalmente pelo desenvolvimento da agricultura. A Amazônia legal, que cobre mais de 5 milhões de quilômetros quadrados, experimentou nos últimos 40 anos uma diminuição da área florestal de mais de 10.000 km<sup>2</sup> por ano, com exceção de uma calmaria no período 2009-2015. Este fenômeno tem consequências preocupantes, que a pesquisa científica permite caracterizar e projetar no futuro, e que começamos a observar. Localmente, o desmatamento reduz o habitat animal, promove a erosão do solo e enchentes ao longo dos rios, além de aumentar a precariedade social que impera nas frentes pioneiras. Em uma escala mais global, o desmatamento na Amazônia está reduzindo a biodiversidade global e acelerando o aquecimento do clima.

Embora parcialmente planejada, a colonização da floresta amazônica rapidamente escapou ao controle do poder público e um programa de monitoramento teve que ser considerado. Dada a vastidão da região a ser monitorada, a observação da Terra por satélite mostrou-se uma solução essencial na década de 1980, particularmente graças ao lançamento do satélite Landsat-5, que forneceu imagens com uma resolução espacial de 30m e cujo ritmo de duas observações por mês tornou possível esperar uma imagem sem nuvens pelo menos uma vez por ano. No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi incumbido de desenhar e implementar um programa de monitoramento para a Amazônia, levando em consideração tanto a realidade do fenômeno geográfico a ser observado quanto o que era tecnicamente possível com as missões espaciais e as ferramentas de processamento disponíveis.



Expandindo a fronteira agrícola: desmatamento, cultivo de arroz pluvial e pastoreio na região paraense do Brasil.

Em seguida, vimos o desenvolvimento de duas linhas principais de pesquisa, nas quais participaram pesquisadores do IRD e do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento (CIRAD).

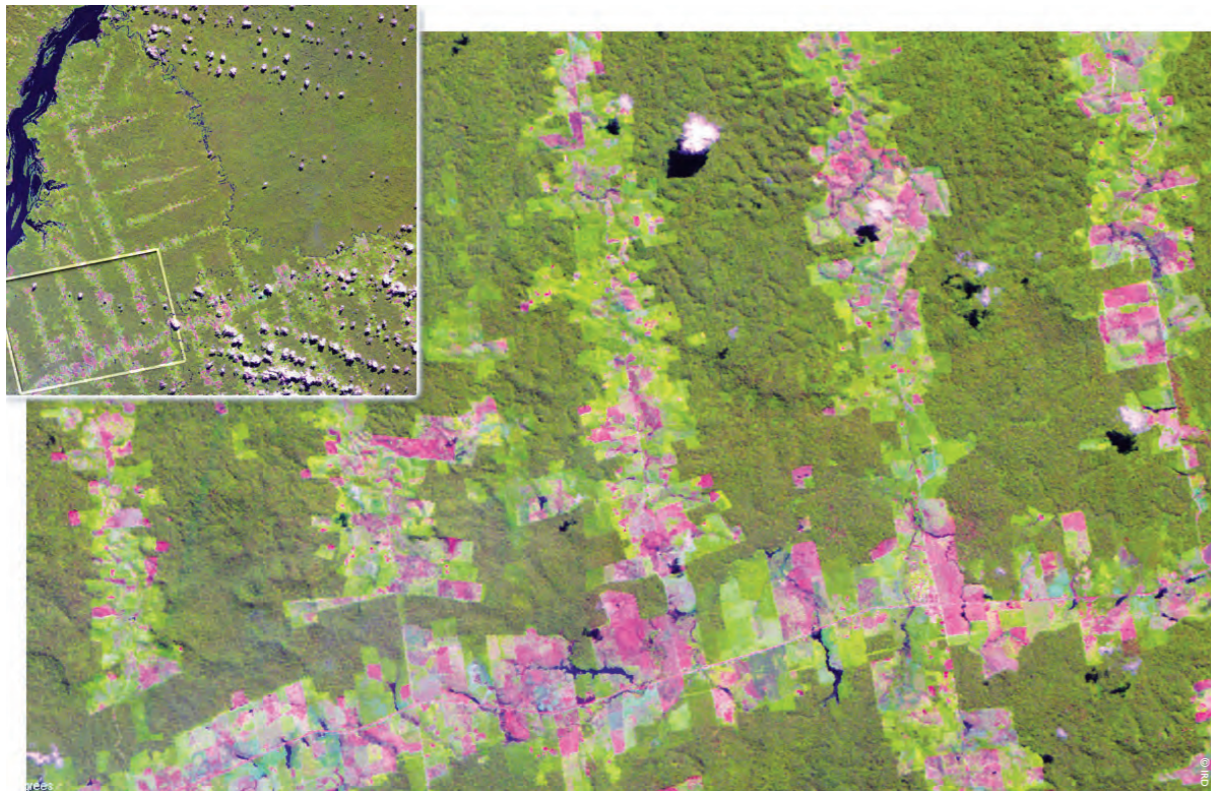
Por um lado, a pesquisa em geografia e ciências ambientais tem se concentrado no fenômeno do desmatamento, um traçador espacial das migrações demográficas e mudanças na economia agrícola, em conexão com suas consequências na sociedade, na epidemiologia das doenças tropicais, nos ecossistemas terrestres e fluviais e, cada vez mais, no clima. Esta pesquisa é particularmente estimulada pela pressão de grandes ONGs e programas internacionais de pesquisa.

Por outro lado, a pesquisa metodológica tem usado tecnologias espaciais e ciências da computação (processamento de imagens, estatísticas e outros procedimentos, evoluindo para uma abordagem de inteligência artificial) para o desenvolvimento de métodos de mapeamento e monitoramento de florestas tropicais por sensoriamento remoto. Trata-se de ir além dos limites da fotointerpretação tradicional, buscando um alto grau de automação e respeitando as escalas espaciais e temporais relevantes. Essa pesquisa permite

### PARCEIROS

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

Centro de Estudos Espaciais da Biosfera (CESBIO), França



Estrutura e organização de frentes pioneiras.

que as agências espaciais, que projetam e financiam os futuros satélites de observação da Terra, levem em conta a necessidade de monitorar o desmatamento na Amazônia.

### Como fazemos isso?

O sensoriamento remoto por satélites é essencial para o monitoramento da Amazônia. No entanto, a vastidão da região, que leva à aquisição de quantidades gigantescas de dados, exige que a análise de imagens, como por exemplo a detecção de parcelas desmatadas, seja assistida por computador ou mesmo automatizada, sem reduzir a confiabilidade da detecção.

Inicialmente, os métodos tradicionais desenvolvidos ao redor do mundo para o sensoriamento remoto de superfícies continentais apenas consideravam as propriedades físicas das paisagens observadas e utilizavam conceitos como assinaturas espectrais (imagens ópticas) e assinaturas polarimétricas (imagens de radar). O conhecimento do comportamento espacial e temporal da degradação florestal possibilitou transcender essa abordagem física com o desenvolvimento de métodos de observação e algoritmos de processamento mais adequados:

- a colaboração de diferentes sistemas espaciais, complementares pela resolução espacial e pela periodicidade de suas observações, como a colaboração do Landsat de resolução média com o sensor Modis de baixa

resolução (250 m) e revisita diária (periodicidade da passagem do satélite sobre o mesmo ponto na superfície do globo) ou o uso de sensores de altíssima resolução (1 m) para treinar os algoritmos de classificação das imagens de resolução média;

- o desenvolvimento de índices espectrais adaptados à detecção de pequenas áreas de desmatamento em pixels onde florestas e culturas são misturadas, a fim de superar o limite de resolução dos sensores disponíveis;

- a classificação do uso do solo por uma abordagem orientada objeto que, além da resposta espectral de cada pixel independentemente de seus vizinhos, considera a textura do terreno, bem como o tamanho e a forma das parcelas a serem descritas, considerando-as como objetos associados às características semânticas.

- mais recentemente, a multiplicidade de medidas que o sensoriamento remoto permite estabelecer para caracterizar o meio ambiente bem como a enorme quantidade de dados disponíveis, possibilitaram o uso de técnicas de aprendizado de máquinas, que fazem parte dos métodos de inteligência artificial aplicados em muitos campos, para melhorar a interpretação de imagens através de uma poderosa abordagem estatística.

Ao mesmo tempo, projetos de pesquisa mais aplicada, voltados para a evolução dos sistemas agrícolas em regiões periféricas da Amazônia e utilizando dados de sensoriamento remoto, levaram a uma melhor compreensão das limitações dos métodos de monitoramento e seu comportamento em casos específicos, dependendo do tamanho das parcelas desmatadas, do relevo, da umidade ou da presença de árvores mantidas em pé ou abandonadas após o corte.

Em todos esses desenvolvimentos, o sensor mais utilizado foi o Landsat TM (e seu sucessor OLI), que possui a vantagem de oferecer características instrumentais e orbitais inalteradas há 40 anos, e cuja missão foi estendida pelo recente lançamento do satélite Landsat-9. Além do Landsat, o monitoramento da Amazônia se beneficiou dos dados dos satélites sino-brasileiros CBERS, que têm características comparáveis às do Landsat, para aumentar a cobertura da Amazônia, mas também de outros sistemas de observação como sensores óticos com resolução espacial e frequência de revisita diferentes, ou como o Sentinel-1 (radar de abertura sintética, insensível à cobertura de nuvens). Cabe ressaltar que os métodos de classificação de uso e ocupação da terra nunca alcançam 100% de precisão, devido à complexidade e heterogeneidade das paisagens terrestres e às limitações de resolução e sensibilidade dos sensores. Assim tão importante apresentar o resultado final do mapeamento é importante incluir nos resultados a incerteza daquele mapeamento.

O INPE monitora constantemente a qualidade desses produtos e os resultados mais recentes indicam uma precisão geral de cerca de 94% para os dados do Programa de Monitoramento Satélite da Amazônia Brasileira (PRODES), e de cerca de 93% para os alertas do Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER). Além desse controle, a política de transparência de dados, adotada pelo INPE desde 2004, permite o pleno acesso a todos os dados gerados pelos sistemas de monitoramento, permitindo avaliações independentes pela comunidade de usuários, incluindo o governo em suas várias instâncias, a academia e a sociedade como um todo.



### Quais são os principais resultados?

Em termos científicos, estas pesquisas produziram inúmeras publicações, tanto sobre a metodologia de mapeamento e monitoramento (potencial e limitações dos sensores ou algoritmos, desenvolvimento e validação de novos métodos) quanto sobre o fenômeno do desmatamento e seus impactos. Em termos operacionais, foi possível desenvolver sistemas de monitoramento. No Brasil, o INPE produz e disponibiliza três níveis de informação com os sistemas PRODES, DETER e TerraClass, segundo abordagens de cartografia, vigilância e análise, respectivamente, que fornecem informações com periodicidade diária até bial.

O sistema PRODES realiza um inventário anual de perda de vegetação primária utilizando imagens ópticas de resolução média (10-30 m) como CBERS, Landsat, Sentinel-2. Para a Amazônia, uma série histórica ininterrupta contendo dados desde 1988 é usada para mapear as áreas de supressão da floresta maiores que 6,25 hectares. Essa área mínima é respeitada para que a série histórica, que da suporte às decisões e negociações no campo das políticas ambientais e climáticas para a Amazônia, seja coerente e comparável ao longo do tempo, o que requer a manutenção da área mínima mapeável para garantir a consistência temporal dos dados. Os polígonos mapeados com área entre 1 e 6,24 hectares são identificados, porém não são contabilizados nas taxas anuais de desflorestamento. Para os demais biomas brasileiros, os polígonos com uma área superior a 1 ha são mapeados e registrados. Cabe ressaltar que tais valores são plenamente suficientes para mapear a supressão da vegetação nativa primária senão vejamos, o polígono médio de desflorestamento na Amazônia no período entre 2002 e 2015 foi de 15,9 ha; para o Cerrado, no intervalo entre 2013 e 2018, esse valor médio foi de 9,55 ha, o que demonstra que os insumos e metodologias utilizadas superam as necessidades.

O sistema DETER, lançado em 2004, é uma ferramenta de apoio a fiscalização e controle do desmatamento e degradação na Amazônia e no Cerrado. O DETER produz diariamente alertas de alterações na cobertura florestal para áreas maiores que 3 ha. Os alertas indicam para a Amazônia áreas totalmente desmatadas (corte raso), bem como áreas em processo de degradação florestal (exploração de madeira, mineração, queimadas e outras) e áreas com supressão de vegetação primária no Cerrado. Esses alertas são enviados automaticamente ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) e a mais 20 instituições públicas relacionadas ao controle do desmatamento, sendo insumo para o planejamento das ações de fiscalização. As informações também estão disponíveis na Internet para toda a sociedade com atualizações semanais de dados. Para o mapeamento dos polígonos DETER, são utilizadas imagens WFI, a bordo dos satélites CBERS4, CBERS4A e Amazônia-1. Estas imagens têm uma resolução espacial de 60 m, e o uso de imagens da constelação permite que o mesmo ponto seja revisitado entre um e dois dias. A capacidade do Deter de gerar alertas aos órgãos de fiscalização supera em muito a capacidade de conduzir ações de campo, pois desde agosto de 2015, mais de 190.000 alertas de desmatamento e mais de 86.000 alertas de degradação florestal foram emitidos para a

Amazônia e, desde maio de 2018, mais de 56.000 alertas de remoção de vegetação foram emitidos para o Cerrado.

Em complemento ao DETER, para as áreas com maior concentração de ocorrências de desmatamento na Amazônia, foram definidas um conjunto de áreas de cerca de 700.000 km<sup>2</sup>, onde é realizado um monitoramento com maior frequência de visita e com imagens de maior resolução espacial, chamado DETER Intenso. Este sistema de monitoramento mais localizado faz um uso mais oportunista das imagens disponíveis, mesmo heterogêneas, permitindo uma visita quase diária, afim de produzir alertas precoces.

Além de monitorar a remoção e degradação da vegetação primária, o INPE, em parceria com a empresa brasileira de pesquisa agropecuária EMBRAPA, também vem monitorando o uso e a cobertura da terra nas partes da Amazônia e do Cerrado onde a vegetação primária foi removida. Esse monitoramento é realizado pelo projeto TerraClass (sistema de mapeamento da cobertura e uso da terra após o desmatamento) a cada dois anos para áreas maiores que 6,25 ha. Os resultados da TerraClass são utilizados para avaliar a dinâmica do uso e ocupação dessas áreas, nas classes mapeadas pelo projeto (agricultura, pastagem, regeneração e outras).

### Qual é a contribuição do IRD?

Há muito tempo as equipes de pesquisa do IRD estão interessadas pelo tema do desmatamento na Amazônia, particularmente no Brasil, e em questões relacionadas às causas e consequências deste fenômeno. O laboratório Espace Dev em Montpellier, por exemplo, segue uma abordagem interdisciplinar da paisagem amazônica, desde a hidrologia até a epidemiologia das doenças zoonóticas, o que contribui para a compreensão da dinâmica do fenômeno do desmatamento e valoriza os dados de sensoriamento remoto. Os laboratórios do Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) em Toulouse têm uma abordagem ligada ao conceito de observatórios ambientais, baseada em séries de dados que são produzidos e analisados de acordo com um questionamento científico. No caso do desmatamento, citamos o trabalho do CESBIO, que desenvolve algoritmos de processamento de séries temporais de imagens para detecção de desmatamento, e indiretamente, o de Geosciences Environnement Toulouse (GET), que estuda o transporte de sedimentos nos rios, traçadores de desmatamento visíveis do espaço.

### Que desafios para o futuro?

Os desafios que envolvem o estudo e monitoramento do desmatamento na Amazônia, alimentados por dificuldades tão variadas como a cobertura de nuvens e as controvérsias na mídia, são de natureza científica, tecnológica e política.

Do ponto de vista da informação, os sistemas existentes de observação da Terra, cada vez mais numerosos em órbita, permitem um aumento significativo da resolução espacial e da frequência de visita, propiciando um alerta precoce em pequenas parcelas desmatadas. Os maiores desafios estão então relacionados ao volume de dados, que requer métodos mais adequados de armazenamento, transmissão e processamento.



O avanço da soja e o desmatamento, Brasil.

Os processamentos devem explorar mais a sinergia entre os diferentes sistemas (as limitações de um sendo compensadas pela sensibilidade do outro) e considerar o conhecimento disponível sobre o fenômeno do desmatamento, em particular suas causas e seu comportamento espaço-temporal, a fim de focar a vigilância nas áreas onde é mais provável que haja mais desmatamento. Obviamente, a validação rigorosa dos resultados, a rastreabilidade das cadeias de produção e a transparência das informações são essenciais para um assunto sujeito a controvérsias.

No entanto, a observação do desmatamento não é suficiente para desacelerar o processo, assim como um termômetro não baixa a febre de um doente. Os esforços de pesquisa e engenharia para compreender e monitorar a degradação da floresta amazônica devem ser apoiados por toda a sociedade, incluindo os tomadores de decisão públicos e privados, a fim de encontrar o caminho de desenvolvimento da região, juntamente com o controle do desmatamento.

---

### Para mais informações

MICHON S., CARRIÈRE M., Moizo B., 2019 – *Habiter la forêt tropicale au XXI<sup>e</sup> siècle*. Marseille, IRD Éditions, 482 p.

DOBLAS J. *et al.*, 2020 – Optimizing Near Real-Time Detection of Deforestation on Tropical Rainforests Using Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 12, 3922. doi :10.3390/rs12233922.

LE TOAN T. *et al.*, 2017 – Monitoring of tropical forests using SAR data. Application to the Amazon region. *18<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, Anales INPE : 8076-8083.

SOLER L. *et al.*, 2021 – Promising advances of Amazonian monitoring systems throughout vanguard technology and scientific knowledge. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII (B3), 843-849. 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-843-2021.

---

### Participaram das pesquisas

Laurent Polidori (UFPA/Cesbio), Claudio Almeida (INPE), Luis Eduardo Pinheiro Maurano (INPE), Luciana Soler (INPE), Marcus Adami (INPE), Juan Doblaz (INPE), Stéphane Mermoz (Cesbio), Alexandre Bouvet (Cesbio).



4

## Os solos: da dinâmica das lateritas à degradação da terra e da biodiversidade

Após as pesquisas iniciais sobre a compreensão da gênese dos solos tropicais, foram desenvolvidos diferentes programas sobre a evolução dos solos após o desmatamento, sobre os efeitos do corte e da queima, sobre os efeitos do cultivo, sobre o ciclo do carbono, sobre a biodiversidade e sobre a atividade da fauna e microbioma do solo. Seus propósitos eram ajudar a definir práticas de gestão adaptadas aos ambientes tropicais.

Esta evolução da pesquisa na Amazônia tem acompanhado uma conscientização global sobre a importância dos solos para a segurança alimentar e como apoio à biodiversidade, e os riscos que sua degradação representa para vários serviços ecossistêmicos

### Contexto

A cooperação entre o Orstom/IRD e o Brasil na ciência do solo começou em 1971 no Estado da Bahia, com o objetivo de desenvolver estudos conjuntos sobre a gênese dos solos tropicais e o destino da matéria orgânica.

O investimento feito pelo IRD na disseminação do conhecimento sobre a análise estrutural da cobertura do solo no Brasil levou ao XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, realizado em Campinas, São Paulo, em 1987, sobre o tema da responsabilidade social da ciência do solo.

Reconheceu-se, desde cedo, que os solos lateríticos eram característicos das regiões tropicais. Sua ampla distribuição nestas regiões foi atribuída, já nos anos 1960, à grande quantidade de chuvas que caíam num período quente, à alta temperatura do solo durante todo o ano e ao baixo escoamento sob a floresta, o que favorece a infiltração de uma proporção importante de



Os serviços hídricos do solo são altamente afetados pelo pastoreio. Frente pioneira da Amazônia, Estado do Pará, Brasil

precipitação, e há uma certa estabilidade tectônica (antigos escudos) e climática ao longo dos tempos geológicos. Estas características climáticas favorecem a rápida degradação da grande quantidade de matéria orgânica depositada na superfície do solo, enquanto a infiltração maciça permite uma alteração profunda e a relativa estabilidade tectônica favorece o desenvolvimento de solos antigos. Esta alteração, que se desenvolve sobre grandes profundidades, caracteriza-se por uma lixiviação de sílica e por um acúmulo de óxidos de ferro liberados, o que lhes confere sua cor vermelha ou amarela característica, dependendo dos óxidos de ferro dominantes. Esta lixiviação de sílica combinada com o acúmulo de óxidos de ferro significa que estes solos são compostos de argilas características de seu modo de formação, que dão aos solos lateríticos uma estrutura que favorece a drenagem ao mesmo tempo em que é muito resistente, desde que o solo não seja perturbado em profundidade. Os solos lateríticos são, portanto, solos muito velhos e espessos, caracterizados por uma estrutura de "pó de café" muito particular, em sua maioria vermelho ou amarelo. A forma como a água circula no solo tem grande impacto na diferenciação destes solos, dependendo se ela se infiltra verticalmente ou se parte da água infiltrada é capaz de migrar lateralmente dentro do solo, ou que se acumula no solo por um período mais ou menos longo, permitindo

### PARCEIROS

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Brasil

Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil

Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil

Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Brasil

Universidade de São Paulo (USP), Brasil

Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Brasil

Universidade Estadual de Londrina (UEL), Brasil





Corte de estrada em lateritas na BR 174 entre Boa Vista e Caracará, Brasil.

ou a lixiviação completa da matéria orgânica e dos óxidos de ferro e dando origem a outro tipo característico de solo, o podzol (em condições ácidas e redutoras favorecendo a dissolução dos óxidos de ferro), ou a uma redução do oxigênio presente no solo dando as características dos solos hidromórficos. Estas características gerais implicam, por um lado, que estes solos se tornam compactos assim que sua estrutura particular é perturbada e, por outro lado, que qualquer desmatamento da floresta ou cultivo os transforma de forma irreparável em solos profundamente degradados devido à sua baixa fertilidade associada ao baixo conteúdo de matéria orgânica. Os solos da região intertropical são, portanto, geralmente muito estáveis em seu ambiente natural, e extremamente frágeis à perturbação.

O Orstom/IRD tem desempenhado um papel importante na compreensão dos mecanismos de gênese e transformação dos solos tropicais, primeiro na África Central e Ocidental, depois na Guiana Francesa e no Brasil. Um ramo da pedologia francesa se desenvolveu significativamente na Guiana Francesa e no Brasil: a pedologia estrutural. Trata-se da transformação dos solos, que, como vimos acima, ocorre de acordo com os diferentes padrões de circulação da água no solo, sendo estes diferentes tipos de circulação uma função da topografia. A perda de material devido à degradação das lateritas, por sua vez, influencia a forma do relevo. Estas mudanças nos solos lateríticos sob a influência de fatores ambientais fazem da cobertura do solo um organismo em evolução, transformando e modificando o relevo, possibilitando assim a leitura do estágio de evolução destas coberturas na paisagem. Este método de análise das transformações do solo e da paisagem foi objeto do grande programa Dynamiques des latérites (Dylat), que foi implantado primeiramente na África Central, depois na Guiana Francesa nos anos 90 e finalmente no Brasil a partir de 1995.

A partir destes programas iniciais sobre o conhecimento da gênese do solo, foram desenvolvidos vários programas sobre a evolução dos solos após o desmatamento, sobre os efeitos da queimada e do cultivo no ciclo do carbono e na biodiversidade, e sobre a atividade faunística e microbiana do solo. O objetivo era compreender melhor as relações entre a biodiversidade epigea (vegetação), a biodiversidade endógena (fauna e microflora) e os componentes físicos, químicos e biológicos do funcionamento do solo. O objetivo da pesquisa foi ajudar a definir práticas de gerenciamento para ambientes tropicais que sejam adaptadas às suas limitações e potenciais.

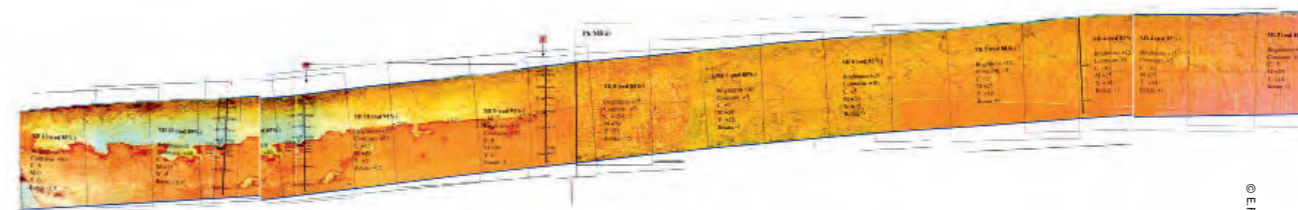
Esta evolução da pesquisa do solo na Amazônia tem acompanhado uma consciência global da importância dos solos para a segurança alimentar e como suporte da biodiversidade, e dos riscos que a degradação do solo representa para vários serviços ecossistêmicos (os benefícios que as sociedades humanas derivam dos ecossistemas que são naturais ou afetados, em graus variados, pelas atividades humanas). Estreitamente relacionados à biodiversidade, os serviços ecossistêmicos referem-se a processos ecológicos que se estendem desde o microscópio até a escala global. Os serviços ambientais abordados nestes projetos foram a regulação climática, através do sequestro de carbono no solo e na vegetação, a regulação do ciclo da água e o controle da erosão do solo, e o fornecimento de produtos florestais e agrícolas.

Na agenda internacional, esta consciência se refletiu na inclusão do conceito de neutralidade da degradação da terra nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), seguida de discussões em torno da segurança alimentar/ação climática/degradação da terra (ODS 2, 13 e 15).

### Como são estudados os solos na Amazônia?

Para a análise estrutural dos solos, é preferível o estudo de toposequências contínuas (ou perfis do solo alinhados de acordo com o gradiente topográfico), ao longo de uma vala aberta que pode ter várias dezenas de metros de comprimento e vários metros de profundidade. Caso contrário, vários perfis são estudados de acordo com o gradiente topográfico. Nessas trincheiras ou perfis, é feita uma descrição muito detalhada das características morfológicas, acompanhada de amostras das morfologias representativas que são utilizadas para analisar e descrever a cor, textura, estrutura, composição química e cristalografia (natureza das argilas e hidróxidos de ferro).

O trabalho tem utilizado abordagens petrográficas, mineralógicas e geoquímicas para compreender a natureza e a distribuição relativa dos componentes das coberturas, desde a escala das unidades paisagísticas



Toposequência nas lateritas da região de Humaita.

representativas das superfícies continentais de uma bacia até a escala de seus constituintes elementares. A originalidade do trabalho empreendido reside no caráter complementar das abordagens utilizadas, que são elas próprias adaptadas a um encaixe natural das estruturas.

Para estudar as relações entre características do solo e fatores ambientais (por exemplo, para determinar o papel do desmatamento na diminuição da biomassa radicular), um grande número de situações são estudadas, distribuídas nos diferentes tipos de cobertura de terra (desde florestas preservadas até pastagens e cultivos, passando por florestas exploradas). As amostras de solo são retiradas dos locais de estudo para analisar todas as suas características. Foram produzidas matrizes de dados, incluindo conteúdo de carbono do solo e biomassa vegetal, agregação e outras propriedades físicas, hídricas e químicas do solo, com dois objetivos: avaliar indicadores relevantes de serviços ecossistêmicos; e descrever relações estatísticas entre composição e estrutura da paisagem, biodiversidade, produção e serviços ecossistêmicos, no âmbito da exploração agrícola ou da parcela. Cerca de quarenta variáveis foram medidas em todos os pontos do sistema a fim de caracterizar um ou mais serviços do ecossistema: por exemplo, o conhecimento da densidade aparente do solo é necessário para calcular o estoque de carbono do solo; é também uma das variáveis usadas para avaliar o subindicador de qualidade física do solo; e é usado para calcular os reservatórios de água do solo. Quando todos os resultados são coletados, são realizadas análises estatísticas para determinar se existem correlações entre as variáveis de interesse e se estas são significativas.

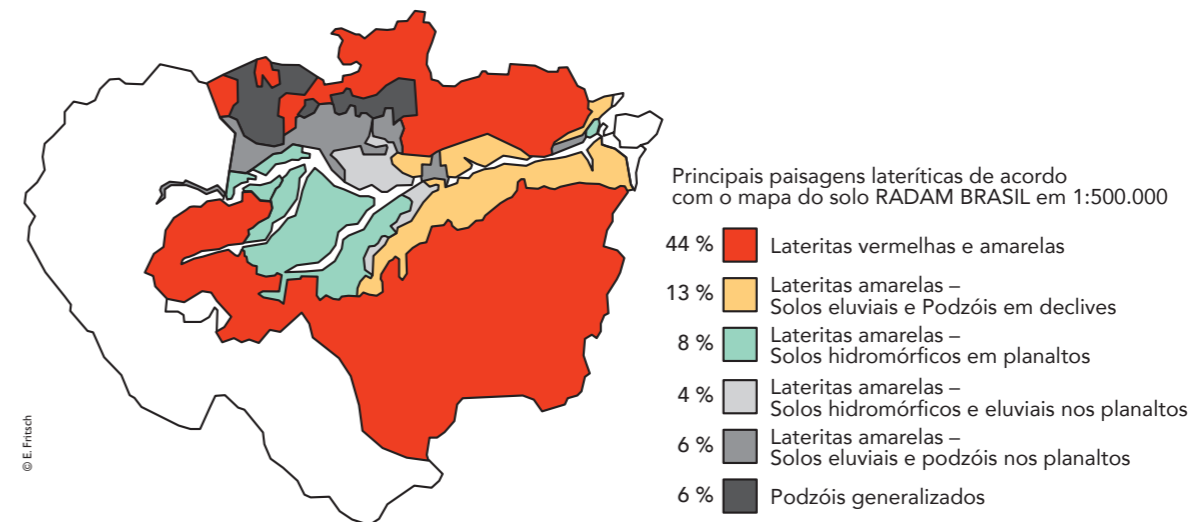
No estudo da matéria orgânica do solo e sua dinâmica, deu-se um lugar importante à distribuição dos constituintes orgânicos dentro de frações separadas por métodos padronizados. A análise isotópica em abundância natural ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) ou após enriquecimento ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) foi favorecida, em associação com abordagens experimentais e de campo (decomposição de resíduos vegetais, coleta periódica de dióxido de carbono liberado pelo solo, etc.).

Estes diferentes estudos requerem abordagens de longo prazo, com uma presença de vários meses no mesmo campo.

### Quais são os principais resultados sobre os solos amazônicos e quais são as perspectivas?

O trabalho na dinâmica e nos processos de alteração da laterita levou à proposta de um modelo geoquímico global, que traça as sucessivas etapas de formação e depois transformação das formações lateríticas em um ambiente tropical onde os insumos pluviais e o excesso de água nos solos e sedimentos são localmente muito importantes. O modelo contrasta um ambiente bem drenado (formações lateríticas stricto sensu), que predomina na periferia da bacia, com um ambiente mal drenado, periodicamente ou constantemente alagadas (formações hidromórficas), que se torna a maioria na parte central, e especialmente na parte a montante e mais chuvosa desta bacia.

Enquanto a maioria dos estudos sobre a pedogênese dos solos ferralíticos ocorreu principalmente no estado do Amazonas, em áreas de floresta

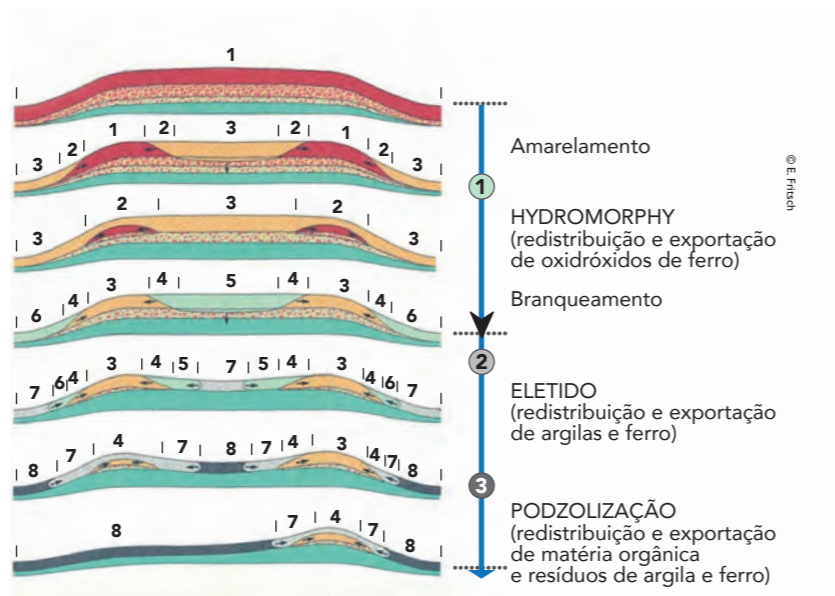


A distribuição das principais associações de solos na bacia amazônica brasileira.

preservada, estudos ligando funções e constituintes do solo a estoques de carbono e biodiversidade têm sido realizados nos estados de Rondônia, Maranhão e especialmente no Pará, sobre o arco de desmatamento.

A intervenção humana provoca mudanças no solo que afetam principalmente o sistema de poros, o que determina toda a transferência de água, elementos em solução e gases e, conseqüentemente, a atividade biológica e o funcionamento. O cultivo leva a desequilíbrios nas populações animais e na biomassa microbiana do solo, o que resulta no desaparecimento de certos grupos. Observam-se distúrbios muito fortes no funcionamento do sistema pedológico do solo, que depois evolui para novos estados, sendo os mais satisfatórios os que estão próximos ao sistema florestal inicial. As pastagens que seguem o desmatamento não podem manter sua sustentabilidade, sob as condições de manejo específico das fazendas (fazendas), além de 6 a 8 anos na Amazônia Central. O sistema pode ser considerado como funcionando bem novamente quando é capaz de reciclar permanentemente, como faz a floresta primitiva, quase todos os insumos (lixo e fertilizantes) que são então absorvidos pela produção primária. Enquanto, até agora, a ênfase tem sido dada à pobreza química dos solos amazônicos, tem sido demonstrado que as técnicas de recuperação de solos degradados devem visar prioritariamente a manutenção das boas propriedades físicas do solo. Meios biológicos como o uso de plantas leguminosas enraizadas e a proliferação de minhocas parecem ser ajudas eficazes para reconstituir o meio ambiente após o desmatamento.

Dos serviços ecossistêmicos discutidos, o armazenamento de carbono no solo é o menos afetado pela mudança no uso do solo. Porém, mesmo no caso de sequestração de carbono no solo, isso nunca compensa significativamente a grande perda no estoque de carbono na biomassa lenhosa. Os serviços hídricos do solo, especialmente o processo de infiltração de água, mas também o armazenamento de água biodisponível, são muito afetados nos pastos. Tal evolução pode tornar-se uma restrição para a produção,



A evolução da forma em relação à evolução das lateritas

ao passo que aumenta fortemente o risco de erosão. As medições sob vegetação secundária, entretanto, mostram uma reversibilidade das mudanças nas propriedades físicas e hidrodinâmicas que ocorrem nas pastagens. Um modelo para explicar as ligações entre o funcionamento do solo e a biodiversidade ainda precisa ser desenvolvido, a fim de imaginar soluções agroecológicas que tornem possível salvar esta função essencial.

Outro desenvolvimento na pesquisa amazônica é a evolução da pesquisa das ciências do solo. Embora tenha começado como estudos acadêmicos com pouco espaço para o conhecimento local, a pesquisa evoluiu no sentido de compreender os mecanismos que permitem respeitar as funções ecológicas do solo, levando em conta a centralidade das práticas agroecológicas tradicionais.

### Em conclusão

A aplicação do conceito de cobertura contínua do solo na paisagem, em vez de coletas de solo separadas, bem como o uso prático deste conceito em toposequências representativas, contribuiu para a realização de diagnósticos que servem de ponte para o diálogo entre pesquisadores, agentes de vulgarização e grupos de agricultores assentados em pequenas parcelas em localidades, comunidades, assentamentos rurais e reservas agroextrativistas, entre outros. Um exemplo desta aplicação já existe há algum tempo no estado do Pará, e está atualmente integrado ao currículo do curso de Bacharelado em Desenvolvimento Rural da Universidade Federal do Pará.

### Para mais informações

BARROS E. *et al.*, 2004 – The relationship between soil physical degradation and changes in macrofaunal communities of an Amazonian pasture. *Applied Soil Ecology*, 26 : 157-168. DOI : 10.1016/j.apsoil.2003.10.012

CHAUVEL A. *et al.*, 1999 – Pasture damage by an Amazonian earthworm. *Nature*, 398 : 32-33.

FRITSCH E. *et al.*, 2002 – Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. *European Journal of Soil Science*, 53 : 203-217.

GRIMALDI M. *et al.*, 2014 – Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. *Landscape Ecology*, 29 : 311-328. DOI : 10.1007/s10980-013-9981-y

MARTINS P. F. S. *et al.*, 1991 – Consequences of clearing and tillage on the soil of a natural Amazonian ecosystem. *Forest, Ecology and Management*, 38 : 273-282.

### Participaram das pesquisas

Thierry Desjardins (IRD), Paulo Martins (UFPA), Frédérique Seyler (IRD), Boris Volkoff (IRD), Armand Chauvel (IRD), Jean Delvigne (IRD), François Soubiès (IRD), Max Sarrazin (IRD), René Boulet (IRD), Yves Lucas (IRD), Michel Grimaldi (IRD), Martial Bernoux (IRD), Christian Feller (IRD), Francis Andreux (CNRS, secundada), Thérèse Choné (CNRS, secundada), Emmanuel Fritsch (IRD), Étienne Balan (IRD), Philippe Magat (IRD), Corinne Rouland (IRD), Patrick Lavelle (Universidade de Sorbonne), Michel Brossard (IRD), Éric Blanchart (IRD), Sophie Cornu (Inra), Carlos C. Cerri (Cena-USP), Carlos E. Cerri (Cena-USP), Brigitte Feigl (Cena-USP), Reynaldo Victoria (Cena-USP), Jenner de Moraes (Cena-USP), Adolpho Melfi (USP), Nadia do Nascimento (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho), Eichi Matsui (USP), Flavio Luizão (INPA), Regina Luizão (INPA), Eleusa Barros (INPA), Arnaldo Carneiro (INPA), Fatima Guimarães (Universidade Estadual de Londrina), João Ferraz (INPA), Mario da Silva Jr. (Ufra), Vania Melo (Universidade Federal de Césara, UFC).



5

## O papel essencial das várzeas no funcionamento do hidrossistema amazônico

A bacia amazônica é um mosaico de mais de 6500 lagos, florestas inundadas, canais interligados permanentemente ou sazonalmente, que desempenham um papel importante no equilíbrio hídrico e sedimentar do rio, armazenando água e matéria durante as águas altas e liberando-as no rio durante as águas baixas. Seu estudo também é essencial para entender seu papel no equilíbrio regional de gases de efeito estufa. Estas áreas altamente produtivas são um lugar para se viver e pescar para muitos ribeirinhos.

### Contexto

Em 25 de junho de 1999, um pequeno avião propulsor sobrevoa a planície de inundação da Amazônia na região de Óbidos. A bordo, dois pesquisadores do IRD estão procurando um local de estudo para descobrir por que faltavam milhões de toneladas de sedimentos no balanço de exportação de sedimentos da Amazônia. Há vários anos, a quantidade de sedimentos transportados pela Amazônia e todos os seus principais afluentes tem sido medida regularmente pelo observatório HyBAm. Foi constatado que a quantidade de sedimentos medida em Óbidos, a última estação de medição da Amazônia antes de fluir para o Oceano Atlântico, é menor do que a soma desses fluxos de sedimentos. Além disso, alguns elementos químicos (como ferro, manganês, arsênico) não têm a mesma forma bioquímica a montante e a jusante dessas áreas inundadas.

Mais de 6.500 lagos de várias formas e tamanhos foram identificados ao longo da Amazônia. Eles cobrem uma área estimada entre 300.000 e 800.000 km<sup>2</sup>, ou seja, até 20% da superfície da bacia. A bacia é um mosaico de lagos, florestas inundadas, canais interligados permanentemente



Barco de pesca submerso, Lago Grande de Curuai, Brasil

ou sazonalmente. No Brasil, estes lagos são conhecidos como várzeas. São planícies alagáveis enriquecidas com sedimentos e adequadas para a agricultura e a pecuária quando secam em águas baixas. Na língua tupi-guarani, o termo significa "onde há água". A área de estudo foi finalmente escolhida para ser a planície chamada "várzea do Lago Grande de Curuai", uma das maiores áreas a jusante da bacia amazônica e localizada no Estado do Pará, entre a cidade de Óbidos e a cidade de Santarém, na margem direita do Amazonas. Vários canais o conectam com o Amazonas, mas apenas o mais a jusante é permanente e pode funcionar como uma entrada ou saída de água, dependendo da diferença de nível de água entre o Amazonas e a várzea. Esta última é composta por corpos de água diferentes, temporariamente interligados, com diferentes cores e qualidades de água, especialmente em termos de turbidez e produção biológica (pigmentos de clorofila). A superfície da área inundada varia linearmente com o nível da água no Amazonas, entre 500 e 2.500 km<sup>2</sup> para um nível de água que varia entre 3 e 11,5 m na escala hidrométrica de Óbidos. Em sua margem sul, ela recebe influxos de vários pequenos rios (igarapés), que drenam uma área

### PARCEIROS

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Universidade Estadual do Amazonas (UEA), Brasil



A várzea do Lago Grande de Curuai visto do ar.

total de aproximadamente 1.400 km<sup>2</sup>. A cobertura vegetal é distribuída na parte inundável entre floresta aluvial e pastagens temporárias, e na terra seca, que nunca é inundada, entre floresta primária e secundária, pastagens e áreas cultivadas. Esta várzea tem sido estudada nos últimos vinte anos para compreender e quantificar seu impacto na evolução da composição da água, dos sedimentos e dos elementos químicos que entram neste mosaico de lagos de água pretos ou brancos (ou melhor, marrom claro), alguns dos quais são depositados ali e outros que se juntam ao rio Amazonas após serem transformados por complexos processos químicos e biológicos. A várzea é um ambiente muito dinâmico, com vegetação emergindo a cada período de águas baixas e morrendo a cada época de enchentes. Portanto, também procuramos entender e medir seu impacto no balanço de carbono da Amazônia até o Oceano Atlântico e, por extensão, no balanço de gases de efeito estufa para a atmosfera.

### Como fazemos isso?

Para isso, criamos uma rede permanente de meia dúzia de estações de medição (o número tem variado com o tempo), monitoradas por observadores recrutados entre os ribeirinhos. Em cada ponto desta rede, o observador mede a altura da água todos os dias, recolhe uma amostra de água a cada dez dias que é então analisada no laboratório em Brasília para medir a quantidade de matéria em suspensão, e a cada mês outra amostra de água é coletada para análise química dos principais cátions. Um cátion é um átomo ou molécula que perdeu uma ou mais cargas elétricas ou elétrons, tornando-se assim positivamente carregado. Diz-se que é maior se este elemento for encontrado em quantidades relativamente grandes (concentração de mais de 1 mg.l<sup>-1</sup>), em comparação com elementos traços que são encontrados em quantidades mínimas no ambiente (concentração de alguns µg.l<sup>-1</sup>). Para completar esta rede, organizamos campanhas com nossos colegas de numerosas universidades (ver quadro de parceiros) duas vezes por ano, em águas baixas e altas, para medir os fluxos nos diversos canais e recolher outras amostras, desta vez para a análise de dados biogeoquímicos mais completos e complexos (elementos principais e oligoelementos, carbono orgânico dissolvido e particulados, clorofila-a, traçadores isotópicos). As condições físico-químicas também são medidas por meio de sondas (pH, condutividade). A rede de medição e as numerosas campanhas de campo (uma dúzia entre 1997 e 2004) permitiram estabelecer um banco de dados excepcional sobre uma zona de inundação em uma região tropical e desenvolver um modelo que permite compreender as variações sazonais e interanuais do balanço hidrológico: fluxos trocados e fontes de água, balanço sedimentar, balanço de carbono dissolvido e particulados e um certo número de elementos químicos maiores e traços.

O modelo hidrológico e sedimentar, baseado em vários anos de medições, nos permitiu representar a evolução temporal da várzea em termos de fonte, estoque e mistura de água e elementos químicos, e determinar o impacto das várzeas sobre os fluxos trocados com a Amazônia.

Durante um ciclo hidrológico, observamos uma fase de enchimento da planície de novembro até o final de maio e uma fase de esvaziamento

do início de junho a novembro, com um tempo de residência variando de 3 a 5 meses. Durante o período estudado (1997-2003), a superfície da várzea varia em média por um fator de 3 entre o período de águas baixas em novembro e o período de águas altas em junho. O período de armazenamento, durante o qual os volumes de água importados na planície são maiores que os exportados, começa entre dezembro e fevereiro, dependendo do ano, e dura até junho. A partir deste mês, e até o final de cada ciclo, a planície exporta mais água para o rio principal do que recebe, sendo que a exportação máxima, geralmente ocorre em agosto e setembro.

Como os fluxos nas planícies de inundação são mais lentos do que no rio, estas áreas são locais privilegiados para a captação de sedimentos. O fluxo de partículas que entra na várzea varia relativamente pouco (na ordem de 1,5 106 t ± 9% do sedimento de entrada). A retenção de sedimentos em suspensão é estimada em média entre 41% e 53% da entrada (cerca de 800.000 t por ano), variando de ano para ano dependendo da velocidade e intensidade da inundação. Quanto mais lenta ou fraca for a inundação, mais a armadilha é reduzida sob a influência de processos de ressuspensão que favorecem a exportação de material.

Além de sua influência sobre a hidrologia e o transporte de sedimentos, as planícies aluviais têm um impacto importante sobre a biogeoquímica e a ecologia da bacia amazônica. Comparando as concentrações de cálcio e potássio medidas in situ e as previstas pelo modelo hidrológico, pode-se observar uma diferença que mostra um armazenamento desses elementos durante o período de subida da água e um desarmazenamento durante o esvaziamento. Este ciclo de armazenamento/estocagem de certos elementos químicos está em grande parte ligado à influência de plantas semiaquáticas (por exemplo, jacintos de água) capazes de retirar nutrientes diretamente da água. Durante o período de descarga, a degradação destas plantas leva à remoção destes elementos. Em uma escala anual, a saída de cálcio (Ca) e potássio (K) representa entre 10% e 30% do fluxo de entrada. Manganês (Mn) e ferro (Fe) estão claramente presos nos sedimentos da várzea, com o armazenamento representando 47% e 97% da entrada, respectivamente.

As várzeas são muito ricas em biodiversidade e são sistemas muito produtivos. A produção primária (produção de biomassa de algas, bactérias, plânctons) nas várzeas é estimada em 110 t de peso seco por hectare por ano (em comparação com 10 a 20 t/ha/ano em uma floresta de clima temperado). Esta produtividade se deve à fertilidade dos sedimentos do lago, que são enriquecidos com elementos importantes trazidos pelo rio, essenciais para o desenvolvimento do fitoplâncton e das espécies vegetais. Como resultado, as várzeas interferem significativamente na transferência de carbono na bacia amazônica e, em última instância, no Oceano Atlântico, tanto em termos do tipo de matéria orgânica como em termos de fluxos. Mostramos, graças às medições de carbono-14, que a matéria orgânica que entra na várzea durante a elevação do nível da água é aquela transportada pela Amazônia desde a Cordilheira dos Andes até a planície de inundação. Trata-se de uma matéria orgânica envelhecida (várias dezenas a centenas de anos) e não muito degradável. Ela tem origem na erosão das rochas andinas e na

lixiviação dos solos da região da bacia a montante. Em contraste, a matéria orgânica produzida nas várzeas tem origem na produção primária (macrófitas e fitoplâncton) de produção recente (alguns meses a alguns anos), rica em nitrogênio e facilmente degradável. É esta matéria orgânica que se degradará de forma progressiva nas várzeas e produzirá naturalmente dióxido de carbono e, em menor escala, metano, que são gases de efeito estufa.

### Em conclusão

A criação de um observatório do ambiente amazônico incluindo a planície de inundação, levou a numerosos avanços científicos na maior bacia hidrológica do mundo. Na escala da bacia amazônica, as várzeas têm uma influência importante sobre a dinâmica hidrológica, sedimentar e bioquímica do rio. Entre 20% e 30% da água da Amazônia é armazenada nas várzeas ou flui através delas. Isto explica porque as inundações amazônicas não são tão poderosas quanto deveriam ser, pois grande parte da água da inundação é temporariamente armazenada nas várzeas e depois devolvida ao rio (e ao aquífero aluvial) durante o período de recessão. Estima-se que 80% dos sedimentos removidos dos Andes e transportados pelo rio transitam através das várzeas. A cada ano, 2 bilhões de toneladas entram no sistema de várzeas e 1,5 bilhões de toneladas o deixam, sendo o restante temporariamente (ou permanentemente em escala humana) preso nas várzeas. Enquanto a água é retida apenas por alguns meses, o sedimento pode permanecer armazenado por centenas ou mesmo milhares de anos. Finalmente, estas áreas são caracterizadas por uma produtividade primária muito alta, cuja degradação bacteriana está na origem das emissões de gases de efeito estufa. Em escala global, os fluxos de dióxido de carbono e metano das planícies de inundação dos rios tropicais estão longe de ser insignificantes.

Nosso estudo concentrou-se em um sistema que ainda é muito pouco influenciado pelas atividades humanas. Somente as atividades artesanais de pesca e criação estavam presentes na várzea do Curuai. Hoje, as transformações ligadas às atividades humanas (pesca semi-industrial e pecuária, fábricas de tijolos, etc.), levando gradualmente à degradação desses ambientes, estão aumentando a vulnerabilidade das populações e o êxodo rural. Uma das vias de pesquisa atuais é o estudo das interações entre as populações locais e as mudanças ambientais, bem como os processos de adaptação das sociedades em resposta às variações climáticas e às mudanças socioambientais. Como em todas as áreas inundadas do mundo, as várzeas amazônicas são ecologicamente sensíveis a pressões antropogênicas e climáticas. Atualmente são consideradas como estando entre os ambientes mais ameaçados por alterações na bacia, particularmente por mudanças no uso do solo, desmatamento, gestão dos rios (para produção de energia hidrelétrica) e por variações climáticas que influenciam diretamente o regime hidrológico dos rios aos quais estão associados.



Paisagem da planície de inundação, Brasil.

### Para ir mais longe

BONNET M. P. et al., 2008 – *Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuai)*. *Journal of Hydrology*, 1-2, 0022-1694.

MARTINEZ J.-M. et al., 2015 – The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 1, n. 860 : 1-11.

MAURICE BOURGOIN L. et al., 2007 – Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuai floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 1-2, 0022-1694.

MOREIRA-TURCQ P. et al., 2013 – Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles*, 27 (1) : 119-130.

### Participaram das pesquisas

Patrick Seyler (IRD), Geraldo Boaventura (université de Brasília), Naziano Filizola (université fédérale de l'Amazone), Laurence Maurice-Bourgoin (IRD), Patricia Moreira-Turcq (IRD), Jean-Michel Martinez (IRD), Naziano Filizola, Geraldo Boaventura.



6

## Ictiologia amazônica

Com mais de 2.500 espécies atualmente listadas, a fauna de peixes do rio Amazonas representa mais de 15% de todas as espécies de peixes de água doce descritas no mundo. Novas espécies são descritas a cada ano. A fauna de peixes não é só rica em espécies, mas também mostra uma diversidade excepcional de formas e estratégias ecológicas em comparação com outros rios do mundo. As razões desta megabiodiversidade têm intrigado naturalistas desde o século XIX e continuam a gerar perplexidade nos taxonomistas, ecologistas e paleontólogos contemporâneos.

### PARCEIROS

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Universidade Nacional de Brasília (UnB), Brasil

Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Brasil

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Brasil

Universidade Federal de Goiás (UFG), Brasil

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Brasil

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Brasil

Universidade Estadual de Maringá (UEM), Brasil

### Contexto

Os ecossistemas aquáticos da Bacia Amazônica cobrem uma área de mais de 1 milhão de quilômetros quadrados e drenam quase 7 milhões de quilômetros quadrados de floresta tropical ou savana. Estes números impressionantes fazem da bacia amazônica o maior reservatório de água doce do mundo, descarregando 20% do fluxo fluvial mundial anualmente no Oceano Atlântico e suportando uma diversidade espetacular de vida. Isto é particularmente verdadeiro para os peixes, que, com cerca de 2.500 espécies atualmente registradas, representam mais de 15% de todas as espécies de peixes de água doce descritas em todo o mundo. Além disso, com base nas novas espécies descritas anualmente, é mais do que provável que a atual riqueza conhecida seja muito subestimada. A fauna de peixes não só é rica em espécies, mas também mostra uma diversidade excepcional de formas e estratégias ecológicas em comparação com o resto dos cursos d'água do mundo. As razões para esta megabiodiversidade confundiram os naturalistas desde o século XIX e continuam a confundir taxonomistas, ecologistas e paleontólogos contemporâneos.

A ictiologia no IRD (de 1943 a 1998: ORSC, depois Orstom) desenvolveu-se pela primeira vez na África nos anos 50 através de estudos no Lago Chade, em estreita colaboração com o laboratório de ictiologia e coleções do MNHN em Paris. Os estudos se concentraram no conhecimento da história natural, sistematização e taxonomia dos peixes, e depois no uso dos recursos ictiológicos pela pesca do interior. Na década de 1980, armados com seu know-how e experiência na África, alguns dos pesquisadores de hidrobiologia e ictiologia do Orstom, em colaboração com seus colegas do Muséum National d'Histoire



Áreas inundadas na bacia amazônica

naturelle (MNHN) em Paris, se voltam para o continente sul-americano. Eles são atraídos pela extrema biodiversidade da Amazônia, mas também pelas ameaças representadas pelas pressões de desenvolvimento sobre esses sistemas aquáticos continentais, que são únicos em termos de sua diversidade, funcionamento e tamanho. Já em 1979, foi estabelecida uma colaboração com o Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) em Manaus para um "estudo sobre a gestão dos recursos de água doce na Amazônia". Os pesquisadores do IRD se estabeleceram com seus colegas brasileiros no INPA e participaram da formação de muitos especialistas brasileiros em pesca até meados da década de 90. Posteriormente, apesar da ausência de pesquisadores franceses no local, as colaborações permaneceram ativas. Ainda permanecem hoje e diversificaram-se para outras instituições de pesquisa brasileiras. As equipes do IRD puderam assim participar do enorme esforço de inventário da fauna amazônica e de criação de coleções e catálogos de espécies que ainda hoje são referências para a pesquisa.

Além da sistemática e taxonomia, estes primeiros estudos também se concentraram na ecologia e distribuição das espécies, a fim de decifrar suas estratégias ecológicas, e na avaliação de impactos das atividades antropogênicas sobre as comunidades de peixes. Estes estudos procuraram compreender as causas e mecanismos que levam à alta produtividade biológica dos

### PARCEIROS

ONG Ecoporé

Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), Brasil

Universidade Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolívia

Universidade de Buenos Aires (UBA), Argentina

sistemas amazônicos. Numerosas atividades foram desenvolvidas, por exemplo em um lago de várzea ligado ao rio Amazonas, o Lago dos Reis, perto de Manaus, graças a um projeto interdisciplinar (parcialmente financiado pela Comunidade Europeia e envolvendo o INPA, Orstom e o Instituto Max-Planck). Estes estudos forneceram assim os conhecimentos biológicos e estatísticos necessários para interpretar o impacto da pesca e dos fatores ambientais sobre os estoques pesqueiros, a fim de produzir elementos para o manejo.

Em outro campo, foram realizados estudos para entender as mudanças nas comunidades de peixes produzidas pelo comissionamento de grandes barragens hidroelétricas em afluentes da Amazônia, como a barragem de Tucuruí no Tocantins ou a barragem de Balbina no Rio Uatumã. Estes estudos, realizados em cooperação com a Centrais elétricas do Norte do Brasil S.A. (Eletronorte), visavam melhorar os ambientes aquáticos destas regiões e prevenir as consequências destas estruturas sobre a biodiversidade e a pesca.

Estes estudos seminais foram repetidos em outras regiões da América do Sul: na Amazônia boliviana para o estudo da biodiversidade, do funcionamento dos ecossistemas das planícies de inundação e da pesca; depois na Guiana Francesa para o estudo dos impactos da barragem de Petit Saut. Outros estudos também foram realizados com os mesmos objetivos nos contrafortes andino-amazônicos, particularmente na Bolívia.

Estas experiências e os conhecimentos adquiridos têm sido utilizados para alimentar pesquisas mais avançadas sobre o funcionamento ecológico dos sistemas, a evolução filogenética da fauna, a distribuição das espécies em relação aos fatores ambientais e a aquicultura. Por exemplo, entre 1995 e 1999, estudos sobre lagos no noroeste do Brasil demonstraram os processos de cascata trófica em ação em certos casos de eutrofização (ou desequilíbrio de um ecossistema aquático ligado a um suprimento excessivo de nutrientes, levando em particular à proliferação de plantas e ao esgotamento do oxigênio) na presença ou ausência de certas espécies de peixes. Os resultados permitiram assim propor medidas de manejo para estes lagos a fim de controlar a produção de peixe e a eutrofização. Entre 2004 e 2007, no seguimento dos estudos iniciais sobre a contaminação por mercúrio realizados por hidrogeoquímicos, foram realizados estudos interdisciplinares no rio Iténez, na fronteira entre a Bolívia e o Brasil.

As equipes do IRD estão envolvidas na capacitação e no avanço do conhecimento, contribuindo com sua experiência em novas ferramentas para análise e ecologia de peixes. Genética, datação, ecologia isotópica e análise estatística macroecológica são as disciplinas em que o IRD e o Brasil têm sido mais ativos na última década.

O projeto AmazonFish, coordenado pelo IRD em colaboração com seus parceiros na América do Sul, e em particular no Brasil, começou em 2016 com objetivos principais de sintetizar inventários da biodiversidade dos peixes amazônicos, avaliar sua distribuição e compreender a história e evolução desta biodiversidade, a fim de definir sua vulnerabilidade e antecipar mudanças. Além de seu grande interesse científico, a importância deste projeto para o IRD é a de interligar diferentes parceiros sul-americanos sobre um tema científico



Pesca nas corredeiras do Rio Madeira, agora cobertas por água da barragem de Santo-Antônio.

e geográfico comum. Além disso, como uma extensão do AmazonFish, um novo projeto coordenado pelo IRD e financiado pela BiodivERsA (uma parceria europeia que financia pesquisas sobre a biodiversidade e seus impactos nas sociedades e políticas públicas) ha iniciado em 2022. Reúne um consórcio de pesquisadores europeus e brasileiros e se concentra nas espécies de peixes frugívoros da Amazônia. Estas espécies desempenham um papel fundamental na interação animal- planta e na manutenção da diversidade biológica e funcional dos ecossistemas amazônicos, pois ajudam a manter a vegetação ribeirinha, espalhando sementes ao longo dos cursos d'água e também desempenham um papel socioeconômico fundamental para as comunidades humanas tradicionais da Amazônia como suas principais fontes de alimento e renda. O objetivo do projeto é identificar áreas prioritárias para a conservação e restauração das interações entre os peixes da floresta amazônica e os serviços ecossistêmicos associados.

### Como fazemos isso?

Além do censo da biodiversidade, os estudos atuais visam compreender e definir melhor as estratégias ecológicas dos peixes. Em sistemas complexos como o da Amazônia, as migrações de peixes de água doce são essenciais para manter a biodiversidade, administrar os estoques pesqueiros e avaliar o impacto das barragens hidrelétricas. Esses movimentos migratórios permanecem em grande parte desconhecidos porque os métodos convencionais de observação são ineficazes. Eles estão sendo reforçados atualmente por técnicas de monitoramento indireto utilizando marcadores biogeoquímicos. Os otólitos de peixe são pequenas pedras calcárias localizadas perto de seu cérebro. Crescem junto com os peixes e têm estrias de crescimento que se formam regularmente durante toda a vida do indivíduo. Graças a estas estrias, é possível determinar a idade dos organismos (este é o chamado método esclerocronológico, por analogia com a determinação da idade das árvores pela dendrocronologia). Sua composição química é uma memória das condições ambientais e fisiológicas do organismo. Na América do Sul, o IRD e seus parceiros franceses e sul-americanos estão realizando análises dos elementos isotópicos de estrôncio presentes na água e nos



Peixes da família Loricariidae (*Pseudacanthicus* sp.).



otólitos para discriminar os estoques pesqueiros, identificar os principais habitats e migrações. As rotas migratórias de grandes peixes-gato entre o estuário amazônico e os contrafortes andinos onde eles se reproduzem foram assim determinadas com precisão.

### Quais são os resultados importantes?

Estudos de genética populacional, realizados no âmbito do LMI Edia (Laboratoire mixte international Évolution et Domestication de l'ichtyofaune amazonienne, 2011-2021), têm sido usados para entender a evolução dos peixes. Estes estudos revelaram mosaicos de espécies nos ciclídeos, sugerindo a intervenção da especiação simpátrica - a especiação simpátrica é quando novas espécies, intimamente relacionadas, emergem de um ancestral comum enquanto habitam a mesma região geográfica - semelhante àquela encontrada no Rift Africano. O LMI Edia também está na origem de novas abordagens da biodiversidade na Amazônia, como a realizada sobre as grandes aves migratórias usando isótopos de estrôncio, como descrito no parágrafo anterior; mas também no estudo do recrutamento de larvas utilizando técnicas de metabarcodificação (identificação molecular de várias espécies na mesma amostra a partir de uma curta sequência de DNA característica da espécie), e, mais recentemente, os primeiros estudos de avaliação da biodiversidade utilizando a abordagem de DNA ambiental (eDNA). O eDNA é um método indireto de avaliar a presença de organismos vivos, bem adaptado aos ambientes aquáticos onde é cada vez mais utilizado. A amostragem consiste na filtragem da água para coletar fragmentos de DNA liberados no ambiente sob diversas formas (fezes, urina, gametas, muco, pele, etc.) e que persistem em ambientes aquáticos por vários dias. Estes fragmentos são extraídos e depois amplificados. Sequências da mesma região de DNA com uma codificação única para cada espécie são isoladas e comparadas com um banco de dados de referência para determinar as espécies. Na ictiologia, a captura de peixes para fins científicos e experimentais continua sendo um desafio. A contribuição do eDNA poderia, portanto, constituir um importante salto tecnológico para completar inventários e melhor monitoramento da biodiversidade em ambientes complexos e de difícil acesso, como os rios andinos e amazônicos.



Microscopia de uma larva de peixe amazônico.

### Em conclusão

O futuro das colaborações continuará a ser baseado nos mesmos objetivos de inventariar espécies e na melhoria do conhecimento da história natural, ecologia e distribuição dos peixes, a fim de encontrar soluções para a proteção da biodiversidade e o manejo sustentável dos recursos. Novas técnicas estão sendo continuamente desenvolvidas para melhor atender a estes objetivos e constituem novos temas de colaboração. Este é o caso, por exemplo, do DNA, que deve se desenvolver rapidamente nos próximos anos. Várias iniciativas envolvendo laboratórios franceses e sul-americanos associados ao IRD estão sendo desenvolvidas nos países amazônicos (Bolívia, Brasil, Peru, Colômbia) e na Guiana Francesa.

Desde 1980, os pesquisadores do IRD e seus parceiros franceses ganharam uma grande experiência e excelência científica nas ferramentas e conceitos da ecologia aquática em geral, e da ictiologia em particular. Eles estão inclusive prontos, e esta é uma das principais missões do IRD, a participar da

formação de pesquisadores amazônicos, do fortalecimento das instituições e da transferência destas tecnologias, ao passo que, infelizmente, a perícia em história natural e sistematização tende a desaparecer. Mantém-se a ligação com museus e coleções (em particular o MNHN em Paris), o que não compensa esta perda de especialização, pois os pesquisadores especializados nestes campos não são substituídos nem no IRD nem no MNHN. Esta é uma tendência preocupante, pois esta expertise e conhecimento formam a base para compreender as mudanças que estão ocorrendo e são fontes de inspiração para a inovação em direção a novas soluções para a proteção da biodiversidade e a gestão sustentável dos recursos e serviços ecossistêmicos fornecidos pelos ambientes aquáticos continentais, e pelos peixes em particular. Esta tendência é menos acentuada entre nossos parceiros brasileiros e sul-americanos, oferecendo um novo caminho de complementaridade em nossas colaborações.

---

### Para mais informações

<https://www.amazon-fish.com/>

Portal de dados freshwaterfishdata

---

### Participaram das pesquisas

Marc Pouilly (IRD), Carlos Freitas (UFAM), Flavia Siquiera (UFAM), Pablo Tedesco (IRD), Thierry Oberdorff (IRD), Jean-Francois Renno (IRD), Bernard de Merona (IRD), Michel Jegu (IRD), Geraldo Mendes dos Santos (INPA), Maria-Mercedes Bittencourt (INPA).



7

## Recursos hídricos e dados espaciais

Desde os anos 2000, a vigilância e a modelagem dos componentes do ciclo hidrológico mediante a observação terrestre por satélite se tornaram uma realidade. Ainda há algum caminho a percorrer para garantir que esses avanços científicos resultem em aplicações efetivas na gestão de recursos hídricos e na tomada de decisões subsequente..



Calibração das medições via satélite com medições in situ por GPS: campanha Rio Negro, maio de 2005.

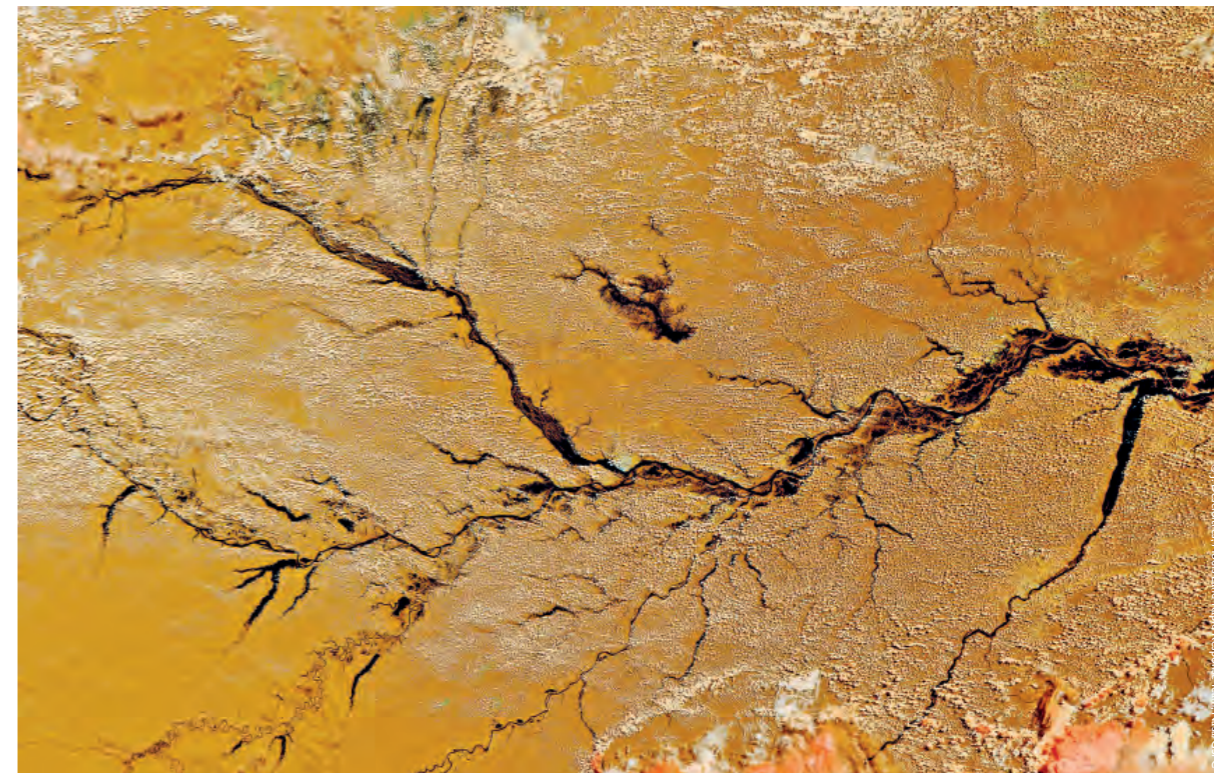
### Contexto

O sensoriamento remoto revolucionou nossa compreensão do ciclo da água nos continentes em poucas décadas. Do espaço, agora é possível obter uma grande quantidade de informações sobre o funcionamento de rios, lagos e pântanos que antes não conhecíamos.

A hidrologia espacial e os modelos digitais que ela alimenta estão agora trabalhando para desenvolver aplicações valiosas para a gestão e conservação dos recursos hídricos.

No início dos anos 1990, o sucesso dos satélites dedicados ao estudo do oceano e da atmosfera deu ideias aos hidrólogos. Os especialistas da água continental utilizaram as missões e instrumentos desenvolvidos para explorar os oceanos. Isto abrirá um novo campo para estudar os rios e suas bacias, para melhor caracterizar o ciclo da água como um todo. O objetivo de desenvolver ferramentas eficazes baseadas em medições do espaço para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos torna-se viável.

Com seu gigantesco escoamento, sua imensa extensão, seus grandes rios e fenômenos naturais de magnitude inigualável, o rio Amazonas e suas vastas bacias proporcionaram um laboratório ideal para o desenvolvimento dessas novas técnicas de observação do ciclo da água por satélite. O IRD e seus parceiros científicos no Brasil e em outros países sul-americanos vêm colaborando há mais de vinte anos neste assunto, dando uma grande contribuição para o novo boom da hidrologia espacial.



Modis imagens em coloridas falsas do rio Amazonas.

A imagem está centrada no encontro das águas entre o Rio Negro, ao norte, e o Solimões-Amazônia, de oeste a leste (<https://visibleearth.nasa.gov/images/59954/amazon-brazil>)

### Que métodos foram utilizados?

Devido a sua importância e ao forte investimento histórico dos países da bacia, a Amazônia se beneficia de uma rede relativamente densa de observações in situ que proporcionam registros em longo prazo. Essas redes são essenciais para que os cientistas entendam os processos hidrológicos, porém em uma bacia tão vasta elas são limitadas e não cobrem toda a variabilidade espacial e temporal dos processos que ali ocorrem. Alguns fenômenos, como a extensão da enchente anual, são quase impossíveis de serem avaliados por medidas convencionais.

O sensoriamento remoto é, portanto, uma ferramenta chave para superar estas limitações, pois oferece uma perspectiva de observação mais abrangente e permite que as observações sejam ampliadas, tanto no tempo quanto no espaço, para obter uma visão muito mais completa dos fenômenos em ação. Assim, a cobertura das áreas de interesse torna-se generalizada e regular: Os satélites de observação da Terra varrem toda a superfície continental, passando frequentemente sobre as bacias estudadas. Muito mais dados são assim adquiridos e muito mais frequentemente, melhorando consideravelmente nossa compreensão do ciclo da água nos continentes.

### PARCEIROS

Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Universidade Estadual do Amazonas (UEA), Brasil

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil

Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), Brasil

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil



Graças a metodologias específicas de análise, os hidrólogos exploram dados adquiridos por inúmeros satélites.

São utilizados todos os tipos de técnicas e sensores: satélites orbitais que navegam a uma altitude de algumas centenas ou milhares de quilômetros, satélites geoestacionários que seguem a rotação da Terra a 36.500 km de sua superfície, técnicas de observação que cobrem o espectro eletromagnético, da ótica às micro-ondas, mas também sensores passivos que registram os sinais emitidos pela Terra e instrumentos ativos que emitem um sinal em direção ao nosso planeta e registram sua reflexão.

Informações que são impossíveis de determinar em grande escala a partir do solo tornam-se acessíveis, tais como a medição da precipitação, a extensão da inundação, estoques de água ou variáveis muito importantes como evapotranspiração ou qualidade da água. Graças aos instrumentos capazes de detectar mudanças locais na gravidade da Terra (transportados pelos satélites gêmeos das missões Grace e Grace-FO), é possível medir variações temporais e espaciais na quantidade total de água presente em um dado momento e em uma bacia tão grande quanto a Amazônia. A extensão da água é estimada pela combinação de emissões de micro-ondas passivas e ativas (radiômetros) com recepção de ondas infravermelhas e visíveis (satélites LandSat, Sentinel-2).

Além de monitorar as mudanças no nível do mar, os altímetros também podem medir as mudanças no nível da água continental. O processamento de dados de Topex-Poseidon, ERS1/2, Envisat, Jason 1/2/3/CS e Sentinel 3-A/B permite agora determinar o aumento do nível da água em rios, reservatórios, lagos e áreas úmidas de dimensões cada vez menores e suas variações em longo prazo. Especialistas estão agora trabalhando no desenvolvimento de satélites especificamente dedicados à hidrologia de superfície, como a missão Franco-Americana de Água Superficial e Topografia Oceânica (SWOT), com lançamento programado para Dezembro de 2022. Desenvolvida em cooperação entre a NASA e o CNES, SWOT, no qual o IRD e seus parceiros são uns dos principais atores, é uma missão de altimetria de ampla área que, devido à sua cobertura espaço-temporal, fornecerá pela primeira vez informações espaciais precisas sobre a dinâmica das cotas e extensão das águas de superfície continental com muito boa resolução espacial (100 m). Assim, será possível ter acesso, pela primeira vez e em escala global, a informações detalhadas sobre a dinâmica dos estoques de água de superfície, fluxos e hidrodinâmica das bacias com uma resolução espacial e temporal sem precedentes.

Entretanto, o uso de satélites não desqualifica de forma alguma a observação in situ e deve, portanto, ser considerado como complementar: as variáveis registradas no campo permanecem indispensáveis para validar e calibrar os dados espaciais.

Entretanto, há limitações ao uso de dados de satélite para hidrologia, muitas vezes relacionadas à resolução espacial e temporal, duração e precisão das medições. Por exemplo, no rio Amazonas, o uso de observações visíveis/ópticas, que são ferramentas muito poderosas, é limitado pela cobertura de nuvens e pela vegetação densa. Também há frequentemente um trade-off entre revisita (quantas vezes o satélite passa sobre o mesmo ponto) e cobertura espacial

(tamanho da área). Algumas técnicas como o radar de abertura sintética (RAS) mostram capacidades muito altas para medir a extensão das águas superficiais em alta resolução (10 a 100 m), mas sofrem de um baixo tempo de revisão temporal, o que as torna inadequadas para o monitoramento de processos hidrológicos rápidos. Além disso, apesar da quantidade crescente de dados de satélite, ainda há a necessidade de garantir séries temporais suficientemente longas para compreender e estudar as mudanças ambientais, especialmente em grandes bacias como a Amazônia.

Graças aos modelos de computador que se alimentam dos milhares de terabytes adquiridos e processados diariamente pelos satélites, e que visam reproduzir processos hidrológicos naturais, podemos agora prever eventos futuros no espaço e no tempo. Ao alimentá-los com as variáveis registradas na bacia - precipitação, evapotranspiração, níveis e estoque total de água na região, etc. - podemos agora alertar sobre eventos extremos, como inundações e secas com boa precisão espacial e temporal. Além de seu interesse científico, as previsões feitas pelos hidrólogos têm aplicações valiosas para a sociedade e o meio ambiente: otimização da captação de água, descarga de barragens, pesca e navegação fluvial para usuários e gestores de recursos, planejamento de desenvolvimento para tomadores de decisão e, de modo mais geral, preservação dos ambientes naturais e do clima.

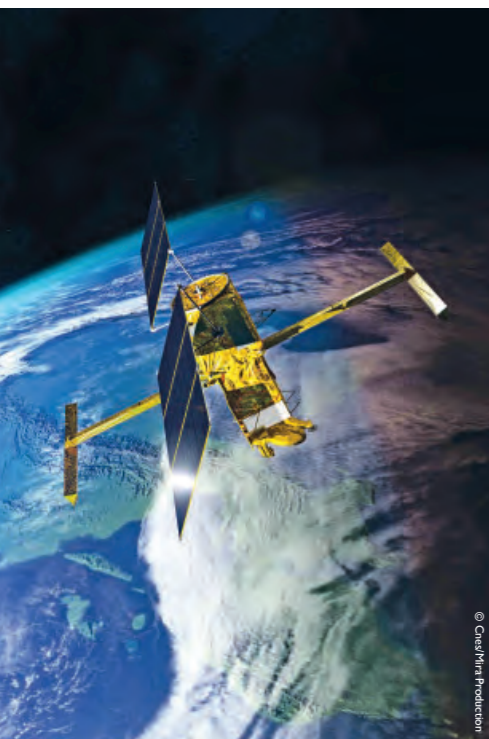
### O que podemos dizer sobre os principais resultados?

As observações por satélite têm sido uma mudança de jogo para a ciência na Amazônia, proporcionando uma visão da maior bacia do mundo. A hidrologia da Amazônia tem um impacto considerável sobre o clima regional e global. Por exemplo, a bacia amazônica fornece umidade para as partes do sul da América do Sul. Como uma importante fonte de calor nos trópicos e fortes processos convectivos, também tem um impacto significativo na circulação atmosférica global. Além disso, as águas de superfície do rio Amazonas são uma importante fonte e sumidouro de dióxido de carbono e a maior fonte geográfica natural de metano nos trópicos. Com seus altos índices de precipitação, evaporação e fluxo fluvial, a bacia amazônica é, portanto, o local de fortes sinais hidrológicos, com fortes variações sazonais e interanuais resultantes de grandes eventos climáticos.

Resultados importantes incluem a caracterização da precipitação dependente do relevo na região andina, a caracterização da extensão da inundação na bacia, a estimativa da quantidade de água armazenada anualmente nas várzeas amazônicas e nas águas subterrâneas.

Um dos principais resultados do uso de observações por satélite na Amazônia é a estimativa dos níveis de água a partir da altimetria de radar, que foi realizada pela primeira vez nos grandes rios da bacia amazônica. Isto tornou possível caracterizar a evolução sazonal dos níveis da água durante a onda de cheia dentro da bacia, ou investigar o impacto de secas, como a de 2005, sobre os recursos hídricos.

Combinada com as imagens, a altimetria também forneceu as primeiras estimativas de variações no armazenamento de águas superficiais na bacia. Em sinergia com as estimativas do estoque total de água nos continentes



Vista do artista do satélite SWOT (Galeria AVISO, imagens e filmes de Observação da Terra)

feitas pelo satélite Grace, isto forneceu aos cientistas informações sobre as variações das águas subterrâneas na Amazônia. As observações espaciais também destacam a variabilidade espacial da precipitação devido ao efeito de brisa em grandes massas de água na bacia; revelaram a variação espaço-temporal da concentração de sedimentos em rios e lagos, a caracterização da complexa topografia das planícies de inundação e as massas de água trocadas entre o rio e a planície de inundação.

As observações espaciais de longo prazo também fornecem informações valiosas sobre as tendências das variáveis hidrológicas que refletem as recentes mudanças na bacia. Por exemplo, os satélites têm mostrado uma tendência de aumento da precipitação na parte norte da bacia, aumento das descargas e aumento das áreas de inundação, o que contribui para aumentar o risco de inundação, com fortes implicações para as pessoas, tornando-as mais vulneráveis. Em contraste, a parte sul da bacia está experimentando uma redução na precipitação, levando a um período seco mais longo nos últimos anos, causando estresse hídrico nas florestas tropicais com fortes consequências para a biodiversidade. Além disso, influências antropogênicas como o desmatamento e a mineração causaram um aumento nas concentrações de sedimentos e nutrientes nos rios.

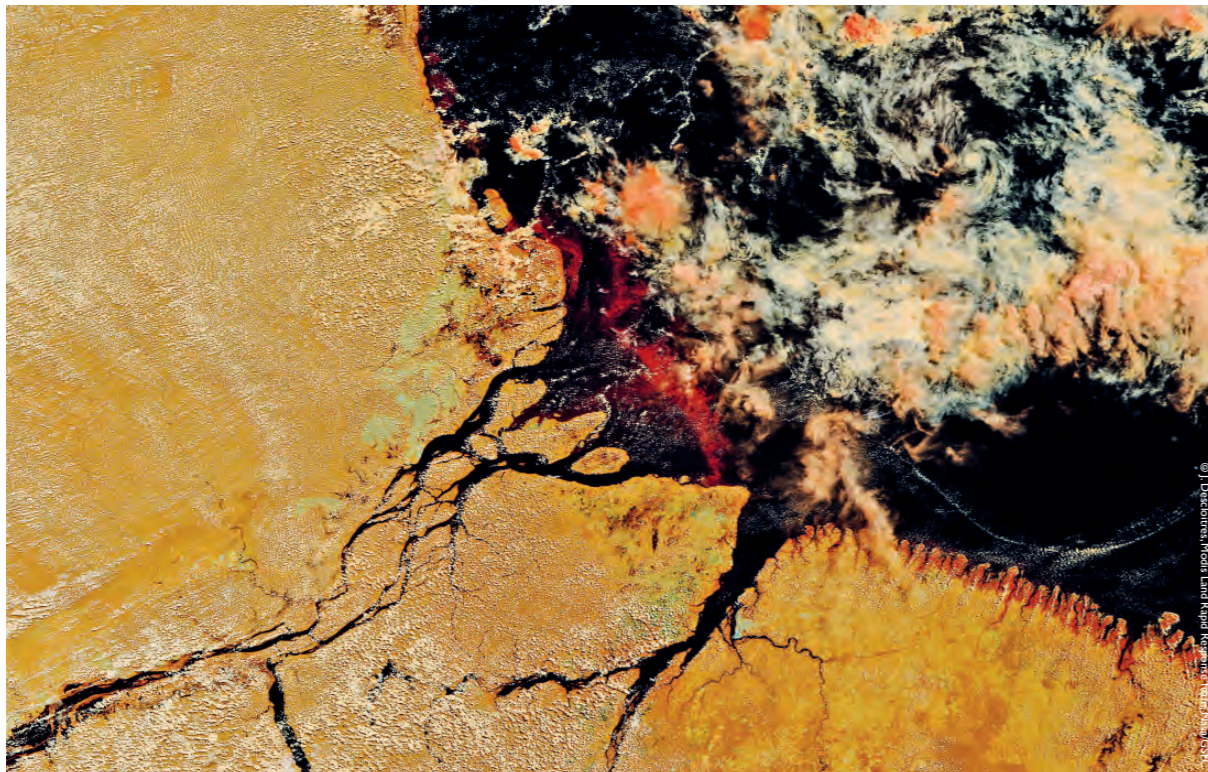


Imagem Modis da boca da Amazônia.  
A imagem mostra o encontro do rio com o oceano.  
(<https://visibleearth.nasa.gov/images/59942/mouth-of-the-amazon-brazil>)

### Quais são os desafios desta pesquisa?

A água, um elemento chave da vida, representa um grande desafio global. Portanto, ela está no centro da política de pesquisa do IRD e de seus parceiros. De fato, como vimos, o armazenamento e o fluxo de água doce nos continentes e sua variabilidade permanecem em grande parte desconhecidos em muitas regiões do mundo. Este contexto deixa em aberto grandes questões relativas à disponibilidade de água na terra e sua evolução futura em relação ao sistema climático (“grande ciclo da água”) e aos usos antrópicos do recurso (“pequeno ciclo da água” e irrigação).

Os cientistas estão procurando quantificar as interações entre os ciclos da água, a mudança climática e as sociedades, a fim de fornecer conhecimentos sólidos para projetar soluções de desenvolvimento sustentável e adaptação. A hidrologia espacial é agora um pilar desta abordagem.

Neste esforço global, a Amazônia sempre foi um local pioneiro para o desenvolvimento da pesquisa em abordagens interdisciplinares, fornecendo uma base científica sólida para a implementação de soluções de adaptação sustentáveis no Sul.

Por natureza, os satélites geralmente não conhecem fronteiras territoriais, por isso, muitas das técnicas de sensoriamento remoto desenvolvidas e testadas na Amazônia foram posteriormente utilizadas em todo o mundo.

Um novo boom na hidrologia espacial é esperado com os próximos lançamentos de plataformas de satélite dedicadas à hidrologia. Como aconteceu há algumas décadas no campo da pesquisa oceânica com o lançamento dos primeiros altímetros, a exploração destas novas técnicas de sensoriamento remoto representará uma verdadeira “revolução” no campo da hidrologia continental e o estudo do ciclo da água.

Este novo contexto permitirá uma nova etapa no monitoramento das águas amazônicas a partir do espaço. Novas pesquisas poderão emergir, visando discriminar entre os componentes climáticos e antropogênicos na origem da variabilidade dos recursos hídricos, um fator essencial para fornecer elementos objetivos para a tomada de decisões no campo da gestão de recursos.

Num esforço global para compreender melhor a lógica social do uso da água e a forma como as informações climáticas e hidrológicas são integradas na gestão deste recurso em diferentes atividades (agricultura, energia), a hidrologia espacial tem seu papel a desempenhar em colaboração com as ciências sociais e humanas em projetos interdisciplinares e intersetoriais. Estes novos conjuntos de dados e a análise das práticas sociais também oferecem um meio único de analisar o impacto das mudanças climáticas e da pressão antrópica no ciclo da água e nos ecossistemas, que por sua vez afetam o ciclo e os recursos hídricos mais amplos. Estes resultados complementam as percepções das pessoas e fornecem informações essenciais para analisar e apoiar os processos de adaptação.



### Em conclusão

De um ponto de vista técnico, novas tecnologias e metodologias de observação da Terra estão sendo continuamente desenvolvidas para monitorar o meio ambiente. Os programas de nanossatélites ainda são subexplorados para a hidrologia, embora ofereçam um grande potencial de monitoramento de eventos como inundações, a custos mais baixos do que seus similares maiores. Além do conceito de missões via satélite, o advento de novas medições espaciais, tais como vídeo de alta definição em tempo real para o monitoramento ambiental, ou medições a partir de veículos aéreos não tripulados ou pequenos drones, oferecem grandes oportunidades. Num futuro próximo, isto provavelmente fará recuar as atuais restrições de espaço-tempo. No entanto, a disponibilidade maciça de informações, com a possível produção de petabytes de dados, irá desafiar as capacidades atuais de armazenamento e análise. Isto exigirá novas abordagens e capacidades analíticas para interpretar volumes tão grandes de dados.

Assim, um melhor acoplamento dos conjuntos de dados de observação da Terra com modelos hidrológicos/hidráulicos e de superfície terrestre (como a assimilação de dados) é um passo necessário na modelagem do sistema Terra, considerando o aspecto dinâmico da hidrologia amazônica.

Serão necessárias novas ferramentas ou técnicas de fusão baseadas em inteligência artificial e maior poder de computação. Essas novas possibilidades exigem um esforço conjunto das agências espaciais, do setor comercial e das startups.

Além disso, do ponto de vista científico, ainda há muitas questões não resolvidas para a bacia amazônica, onde são necessárias mais pesquisas, desenvolvimento de dados ou modelagem. Sob múltiplas pressões naturais e antropogênicas, incluindo barragens, mineração, queimadas, secas/chuvas e desmatamento, há uma necessidade urgente de entender como o ciclo hidrológico da Amazônia é afetado. Apesar dos progressos recentes, poucos estudos abordam estas questões de forma integrada.

O sensoriamento remoto tem assim o potencial de democratizar ferramentas essenciais para os tomadores de decisão e de fornecer novos meios de monitoramento do meio ambiente. Mas este progresso ainda não se traduziu em um verdadeiro apoio à governança da água e do meio ambiente. A comunidade de sensoriamento remoto, portanto, enfrenta desafios reais para promover este novo conhecimento e inovação de uma forma que seja mais útil para as sociedades. Isto inclui a promoção de abordagens interdisciplinares através de sistemas de gerenciamento de água mais inclusivos e o treinamento de tomadores de decisão nos avanços atuais na observação da Terra

Além de proporcionar estas grandes oportunidades de monitoramento operacional dos sistemas hidrológicos, estas observações também poderiam informar os gestores sobre o potencial dos recursos hídricos para usinas hidrelétricas, sistemas de irrigação, transporte fluvial e frete.

Embora a observação da Terra por satélite tenha levado a avanços científicos decisivos na compreensão do ciclo da água na Amazônia nas últimas décadas, ainda será preciso enfrentar muitos desafios para garantir um futuro mais sustentável para a maior bacia do mundo.

---

### Para mais informações

FASSONI-ANDRADE A. *et al.*, 2021 – Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 59. e2020RG000728. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

PAIVA R. C. D. *et al.*, 2013 – Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.*, 49 : 1226-1243, <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>

PFEFFER J. *et al.*, 2014 – Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 41 : 1981-1987. doi :10.1002/2013GL059134

---

### Participaram das pesquisas

Rodrigo Paiva (UFRGS), Fabrice Papa (IRD), Frédérique Seyler (IRD), Stéphane Calmant (IRD), Frédéric Frappart (Inrae), Daniel Moreira (SGB-CPRM), Joecila Santos Da Silva (UEA), Marie-Paule Bonnet (IRD), Alice Fassoni (pós-doc), Ayan Santos Fleischmann (Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá), Juan Gabriel Leon (Universidade Nacional da Colômbia - Sede Palmira), Adrien Paris (Hydro Matters), JeanMichel Martinez (IRD), Claudio Barbosa (INPE), Luc Bourrel (IRD), Naziano Filizola (Ufam), Pascal Fraisy (IRD), Gérard Cochonneau (IRD), Ilce de Oliveira (Faculdade de Engenharia do Campus Várzea Grande da Universidade Federal de Mato Grosso), Sébastien Pinel (Universidade de Perpignan Via Domitia, UPVD), Thibault Catry (IRD), Frédéric Satgé (IRD), Julia Pfeffer (pós-doutora), Emmanuel Roux (IRD), Justine Ringard (pós-doutora), Franck Mercier (Collecte Localisation Satellite), Augusto Getirana (Nasa/Goddard Space Flight Center, GFC), Achilles Monteiro (SGB-CPRM).



PARTE 2

AS INTERAÇÕES  
GLOBAL-LOCAL

Copa das árvores  
com palmeiras na  
Guiana francesa.





## PARTE 2



Assim como um evento local pode desencadear uma cadeia de reações que têm repercussões globais, as mudanças globais (pressões climáticas, demográficas ou econômicas) têm impactos locais significativos, como inundações e secas. Esta segunda parte trata das interconexões entre o ecossistema amazônico e o ambiente global, o oceano e a atmosfera.

O estuário amazônico, um sistema gigantesco devido à importância dos fluxos de água doce e materiais transportados para o oceano, tem uma influência local sobre as populações que vivem ao longo de suas margens, que estão sujeitas ao risco episódico de enchentes. No contexto global, se este fluxo de água doce diminuísse, o sul da Europa e o norte da África experimentariam um aquecimento significativo do clima, e a América do Norte um resfriamento.

Nas costas influenciadas pela Amazônia, a presença humana leva à regressão dos manguezais de proteção e ao aumento do nível do mar, à modificação da temperatura da superfície do oceano e ao agravamento das tempestades oceânicas, que aumentam a erosão da linha costeira.

Conduzida no final de 2021 no âmbito do laboratório internacional misto Tapioca, a campanha amazomix permitiu coletar uma enorme quantidade de dados geofísicos e biológicos com o objetivo de obter uma melhor compreensão dos processos físicos em andamento e seus impactos.

O conhecimento dos climas passados nos permite compreender os respectivos impactos das modificações antropogênicas e das variações climáticas no ambiente atual. O estudo do clima atual fornece informações sobre as ligações entre as variações de temperatura nos oceanos Atlântico e Pacífico para explicar a variabilidade das chuvas, bem como sobre o papel importante desempenhado pela floresta tropical nas chuvas geradas pela evapotranspiração das árvores. Finalmente, a modelagem climática mostra claramente como o desmatamento afeta a mudança climática global, criando um processo de feedback que pode eventualmente significar o desaparecimento da floresta tropical.



## O sistema estuarino amazônico

O sistema estuarino amazônico é um objeto geográfico complexo, com extrema variabilidade tanto no tempo quanto no espaço.

É estudado pelo IRD e seus parceiros desde o final dos anos 1980, mas somente as mais recentes ferramentas digitais e dados de satélite permitirão a implementação de um sistema de previsão operacional do risco de inundação em todo o estuário.

### Contexto

A Amazônia inferior é o sistema estuarino de todos os superlativos. A maré flui para o interior por mais de 800 km, tornando-o o estuário mais longo do mundo. Além disso, esta região em rápido crescimento, com uma população atual de quatro milhões e que dobra a cada 20 anos, está sujeita às inundações e secas do rio. A história da pesquisa ambiental conduzida pelo IRD neste continente/oceano contínuo, único e fascinante começou no final dos anos 1980. Esta história é antes de tudo multidisciplinaridade, combinando hidrologia, oceanografia, sedimentologia e geoquímica, que o projeto Hybam apresentado no Capítulo I, reuniu.

O programa tomou forma no início dos anos 1990, como parte de um programa conjunto Orstom-INSU (Intertropical Geosphere Environment Programme, PEGI). Naquela época, a Amazônia já era um motor de crescimento econômico no Brasil como um reservatório de biodiversidade e era importante determinar seu potencial hidrelétrico. Também foi importante compreender e antecipar os efeitos do desmatamento na erosão do solo e na contaminação das águas superficiais, e mitigar os impactos das grandes inundações sobre as atividades humanas nas grandes várzeas. Suspeitava-se que o comportamento hidráulico, sedimentar e biogeoquímico das planícies a jusante de Óbidos fosse fortemente influenciado pela maré oceânica, que as atingia duas vezes ao dia. Desde 2004, a fim de melhorar nosso conhecimento da interação entre a maré do oceano e os fluxos de água e matéria que chegam à montante da bacia hidrográfica, e assim quantificar as vazões efetivamente exportadas para o Oceano Atlântico, foi necessário simular esses efeitos da hidrodinâmica do estuário por meio de modelagem digital. Do ponto de vista social, esta modelagem deveria contribuir para melhorar a segurança



Medição do nível da água na Amazônia (programa HyBam), Peru.

da navegação no estuário e compreender melhor as grandes inundações que afetam episodicamente os centros urbanos ribeirinhos.

Já em 1997, os pesquisadores começaram a medir diretamente o fluxo total do rio Amazonas em sua boca oceânica (contribuição do rio Amazonas e de todos os seus afluentes à jusante de Óbidos) usando a tecnologia Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), que era completamente inovadora na época. As primeiras campanhas de medição direta da vazão na foz do rio mostraram vazões altamente variáveis durante o ciclo da maré, com picos de mais de 600.000m<sup>3</sup>/s durante a maré baixa (60% do total da entrada do rio no oceano!), que contrastaram com vazões zero ou mesmo negativas (isto é, subindo à montante do estuário) algumas horas depois durante a maré cheia.

Em 2005, o projeto Amandes (Amazon-Andeans-IRD-CNRS) propôs estudar a conexão hidrológica e geoquímica entre a cadeia andina, o rio Amazonas e o Oceano Atlântico, visando explicitamente o fluxo estuarino como objeto de estudo. Este projeto reuniu várias disciplinas, incluindo geoquímica, hidrografia observacional in situ e modelagem digital de hidrodinâmica (física descrevendo o movimento de líquidos). A dupla especificidade do projeto Amandes consistiu, por um lado, em confiar fortemente nas ferramentas da geoquímica isotópica (a análise do comportamento de um certo número

### PARCEIROS

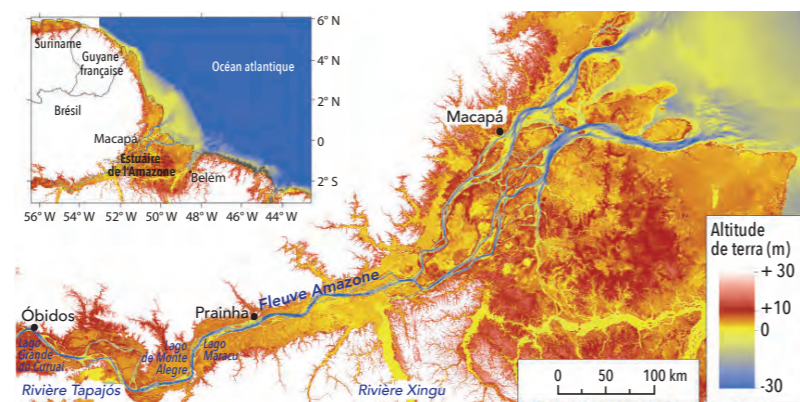
Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM)

de elementos presentes em quantidades vestigiais, como as terras raras - neodímio e rádio, por exemplo - permite compreender o funcionamento hidro-sedimentar do estuário) e, por outro lado, utilizar uma abordagem acoplada entre a hidrodinâmica estuarina e a geoquímica marinha baseada na modelagem hidrodinâmica original do estuário.

Assim, com base em uma rede de estações maregráficas que se estendem ao longo de toda a extensão do estuário e são implantadas durante um ciclo anual entre 1998 e 1999, a equipe de cientistas elaborou uma tipologia inicial da maré na foz do rio Amazonas e sua propagação até o limite a montante do estuário, cerca de 800 km no continente. A primeira observação é que a maré na boca do rio Amazonas é larga - com uma diferença entre os pontos mais altos e mais baixos do mar durante uma maré - atingindo 5 m durante as marés do equinócio. Tais amplitudes, embora comuns ao longo das costas da Europa Ocidental, são bastante únicas na escala dos oceanos tropicais. Com esta energia acumulada no oceano, as ondas da maré correm sem dificuldade para o estuário amazônico, propagando-se ao longo de várias centenas de quilômetros contra a corrente da poderosa descarga do rio. Ao comparar os dados adquiridos durante as diferentes estações, os pesquisadores envolvidos no projeto Hybam chegaram à conclusão de que a capacidade da maré de subir a montante no estuário é altamente dependente da estação do ano. Em períodos de águas baixas, o efeito da maré é perceptível até Óbidos, 900 km rio acima, enquanto em períodos de águas altas, o efeito é menos perceptível, ele pode ser visto até a Prainha, que fica a 600 km de distância apenas. Estas diferenças sazonais no efeito da maré e, portanto, na extensão do estuário resultam da competição entre a energia da água do rio e a maré.

Nos anos 2000, várias iniciativas de modelagem numérica hidrodinâmica do estuário amazônico foram realizadas pelos parceiros do IRD no projeto Hybam, em particular pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e pelo



Mapa topo-batimétrico do estuário do Amazonas.

As áreas em amarelo e azul estão abaixo do nível médio do mar, as áreas em laranja e vermelho estão acima. O curso principal do rio e o delta do terminal é visível em azul. Este trabalho, que combinava dados espaciais, trabalho de campo e digitalização de cartas náuticas é o primeiro passo para a modelagem hidrodinâmica do estuário.

Fonte: Fassoni-Andrade A. C. et al (2021).

CNRS. Estes modelos, embora relativamente grosseiros na resolução de suas grades de cálculo, permitiram estabelecer um mapa inicial da propagação da maré do Oceano Atlântico ao longo do estuário amazônico, e sua interação com a descarga de água doce do rio.

No decorrer do projeto Amandes e da década que se seguiu, a geoquímica surgiu como uma disciplina muito complementar à hidrodinâmica clássica para uma compreensão integrada do funcionamento hidro-sedimentar do estuário amazônico. As trocas entre os estados dissolvidos e particulados de certos elementos traços, como o rádio e o neodímio, ocorrem em velocidades diferentes, e estas podem ser usadas como cronômetros para caracterizar o tempo de residência das águas do rio Amazonas no estuário antes de alcançarem o oceano. Sabemos agora que as águas do estuário são exportadas para o mar aberto em apenas duas a três semanas, independentemente da magnitude da descarga do rio.

### Pesquisa atual e questões locais

Devido a sua complexidade, o sistema do estuário amazônico ainda é pouco conhecido. É uma área sujeita a riscos frequentes, enquanto um terço da população que vive ao longo de suas margens vive sob a ameaça direta de inundações recorrentes nas margens do estuário. Em 2021, as inundações históricas mostraram que este risco é significativo para os três principais centros urbanos do estuário, Belém, Macapá e Porto de Santana, durante a época das cheias ou da seca. A urgência de compreender este risco de inundações para o período atual, e de prever sua evolução a curto/médio prazo, é parte essencial da agenda de pesquisa do IRD, em um contexto onde as transformações a montante da bacia hidrográfica estão aumentando, e onde o nível médio do Oceano Atlântico está crescendo inexoravelmente sob o efeito da mudança climática. Esta necessidade de produzir conhecimento sobre o funcionamento do sistema estuarino durante eventos extremos e sobre seu impacto na dinâmica socioespacial está logicamente de acordo com as Metas de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. As pesquisas atuais sobre a hidrodinâmica do sistema estuarino do rio Amazonas fazem parte desta dinâmica. No início dos anos 2020, os pesquisadores envolvidos neste projeto de pesquisa estão se beneficiando do legado das últimas três décadas, em particular das bases de observações históricas. No entanto, o desafio atual vai além do uso apenas dessas bases de dados, pois elas ainda são fragmentadas, dado o tamanho do estuário e sua grande variabilidade. Devemos, portanto, aceitar o desafio de fazer observações nas melhores escalas espaciais e temporais, que são a única forma de caracterizar a exposição das populações ribeirinhas ao risco de inundação. Isto requer o estabelecimento do estado da arte em modelagem hidrodinâmica numérica no continuum estuarino no baixo Amazonas, e a exploração da nova constelação de imagens espaciais fornecidas pela família de satélites Sentinel da Agência Espacial Europeia. Estes novos dados, colocados à disposição da comunidade científica internacional através da Nuvem Europeia de Ciência Aberta, destinam-se a alimentar um futuro sistema operacional de previsão de inundações para todo o estuário amazônico, conforme solicitado pela sociedade civil da região. A comunidade científica - no coração da qual está o IRD e sua rede de parceiros no Brasil e na Europa - deve criá-la durante a década atual.



Em um contexto onde as populações ribeirinhas dependem do rio como meio de transporte e subsistência, tal sistema operacional é essencial para orientar efetivamente as políticas públicas no âmbito local, com a questão necessária da adaptação em um contexto onde a mudança climática, que em grande parte modificou o sistema estuarino, é passível de acelerar.

### Questões globais

Os fluxos de água doce e sedimentos através do sistema estuarino até sua saída para o Oceano Atlântico equatorial influenciam a circulação oceânica e o sistema climático. Em primeiro lugar, no âmbito regional, a pluma - as águas doces e turvas provenientes do rio Amazonas, que se distinguem da água do oceano em uma distância muito longa – do rio Amazonas, pela quantidade colossal de água doce que traz à superfície do oceano, é capaz de alterar significativamente as trocas de calor entre o Oceano Atlântico e a atmosfera tropical, e assim modificar o clima de toda a bacia do Atlântico Ocidental e dos continentes adjacentes. Ela contribui para a variabilidade do nível do mar ao longo das costas das Guianas e até as Índias Ocidentais, territórios massivamente expostos ao perigo ciclônico e para os quais cada centímetro adicional de nível do mar conta. A própria pluma, em sua extensão de vários milhares de quilômetros da foz até o centro da bacia atlântica, parece contribuir para a intensificação dos ciclones tropicais que se formam ao largo, quando cruzam seu curso. Finalmente, na escala de tempo decadal a centenário, a água doce transportada através do estuário amazônico e redistribuída em toda a bacia do Atlântico Norte pela circulação oceânica geral tem um papel comprovado no clima das regiões temperadas da Europa Ocidental e América do Norte.

Sem a pluma de água doce do rio Amazonas, o Atlântico Norte veria depressões significativamente menos baixas - levando a um aquecimento significativo de todo o sul da Europa e do norte da África - e um resfriamento do clima dos EUA. Da mesma forma, o impacto a longo prazo da entrada de nutrientes amazônicos nos ciclos biogeoquímicos do Oceano Atlântico, e em particular na bomba biológica de carbono, permanece muito mal compreendido.

Os recentes surtos e eventos extremos no fluxo do rio Amazonas, portanto, exigem monitoramento e compreensão desta variabilidade a longo prazo até as regiões temperadas nos confins da bacia do Atlântico, a fim de incluí-la em modelos de previsão climática.



Lama andina transportada pela Amazônia (nasa.gov).

A imagem em cor natural destaca o delta e o estuário da Amazônia, conforme observado pelo Satélite Modis Terra (imagem de espectrorradiômetro de Resolução Média) da Nasa, em 29 de julho de 2020.

### Para mais informações

FASSONI-ANDRADE A. C. *et al.*, 2021 – Comprehensive bathymetry and intertidal topography of the Amazon estuary. *Earth Syst. Sci. Data*, 13 : 2275-2291. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2275-2021>

GALLO M. N., VINZON S. B., 2005 – Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dyn.*, 55 : 441-448. <http://doi.org/10.1007/s10236-005->

KOSUTH P. *et al.*, 2009 – Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrol. Process.*, 23 : 3141-3150. <https://doi.org/10.1002/hyp.7387>

LÉON M. *et al.*, 2022 – Use of <sup>223</sup>Ra and <sup>224</sup>Ra as chronometers to estimate the residence time of Amazon waters on the Brazilian continental shelf. *Limnol. Oceanogr.*, <https://doi.org/10.1002/lno.12010>

### Participaram das pesquisas

Fabien Durand (IRD), Alice César Fassoni Andrade (UnB), Patrick Seyler (IRD), Daniel Moreira (CPRM), Pieter van Beek (université de Toulouse), Pascal Kosuth (détachement IRD), Jacques Callède (IRD), Alain Laraque (IRD), Florent Lyard (CNRS), Yoann Le Bars (estudante de doutorado).



## O sistema costeiro da Amazônia

O comportamento geomorfológico das costas amazônicas, a vulnerabilidade e a capacidade de adaptação às mudanças costeiras das zonas úmidas em geral e dos mangues em particular, são um grande desafio para os gestores e atores do desenvolvimento, e vão ser ainda mais nas décadas futuras.

### PARCEIROS

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), Brasil

Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil

Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA), Brasil

Universidade Federal de Amapá (UNIFAP), Brasil

Agência de Desenvolvimento do Estado de Amapá (ADAP), Brasil

Agência de Biodiversidade do Amapá (ICMBio), Brasil

Parque Nacional do Cabo Orange, Brasil

Agência de Pesca do Amapá (PESCAP), Brasil

Representação do Ministério da Pesca no Amapá, Brasil

Museu Emílio Goeldi (MPEG), Brasil

Secretaria de Estado de Recursos Naturais (SECTAM), Brasil

### O sistema costeiro da Amazônia: uma linha costeira sob a influência do grande rio

A Amazônia é reconhecida internacionalmente pela complexidade, riqueza e diversidade de seu sistema hidrológico e de suas florestas, que são objeto de numerosos programas internacionais de pesquisa e monitoramento ambiental. Por outro lado, o litoral e o sistema costeiro amazônico são menos estudados, mesmo hospedando um mosaico de ecossistemas de grande valor ecológico e patrimonial, com vastas florestas de mangue, numerosas zonas úmidas, pântanos e savanas inundáveis, e os estuários dos rios que drenam ao norte o maciço do Planalto das Guianas e ao sul a baixa planície amazônica do Pará.

Dois sistemas costeiros notáveis se desdobram em ambos os lados da foz do rio Amazonas: ao norte, uma linha costeira sujeita às marés de pequena amplitude, dominada pelo peso da água e dos sedimentos argilo-limosos do grande rio, empurrados contra a costa por a corrente muito poderosa do Atlântico Sul que corre até o Caribe; ao sul, uma linha costeira recortada por numerosos estuários, sujeita a macro marés atlânticas e alimentada por areias finas formando praias enquadradas por dunas e lagoas.

Para entender como esses ambientes costeiros funcionam e evoluem, uma grande quantidade de pesquisa tem sido realizada pelo IRD e seus parceiros desde os anos 1990. As questões científicas dizem respeito à natureza, intensidade e tendências das forças motrizes que moldam estes sistemas em escala regional; as dinâmicas que atuam localmente e sua possível evolução ou transformação; e a modelagem de seu funcionamento, a fim de estabelecer diagnósticos, cenários ou recomendações diante das mudanças climáticas e ambientais.



Erosão ondulatória dos manguezais, Guiana Francesa.

Ao mesmo tempo, muitas pesquisas estão sendo realizadas sobre a grande riqueza e diversidade biológica desses ecossistemas costeiros, bem como sobre sua vulnerabilidade ou resiliência aos impactos das atividades humanas. Na Amazônia, como em outros lugares, esses ecossistemas estão sujeitos a perturbações causadas pelo homem, ou seja, a alteração ou destruição do meio ambiente (crescimento urbano, agricultura, turismo, e atividades portuárias), a pesca artesanal e industrial, a remoção de recursos naturais, a poluição e as consequências potenciais do desenvolvimento da indústria petrolífera após a descoberta de depósitos na foz do rio Amazonas e no Escudo das Guianas. Enquanto a população costeira é predominantemente urbana em termos de número (centros urbanos, cidades e metrópoles), um grande número de comunidades locais ao longo da costa depende de seus recursos naturais para seu sustento e desenvolvimento.

Os desafios científicos associados às áreas costeiras amazônicas são, portanto, grandes, tanto do ponto de vista da modelagem da dinâmica da interface continente/oceano quanto do conhecimento dos ecossistemas e dos determinantes da co-viabilidade entre a dinâmica natural e as atividades humanas.

### PARCEIROS

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

Agência de Agronomia da Amazônia Oriental (EMBRAPA), Brasil

Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil

Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

Instituto Francês de Pesquisa para Exploração do Mar (IFREMER), França

Centro Nacional da Pesquisa Científica (CNRS), França

Universidade da Guiana Francesa, França

## Espaço, um lugar privilegiado para observar a linha costeira

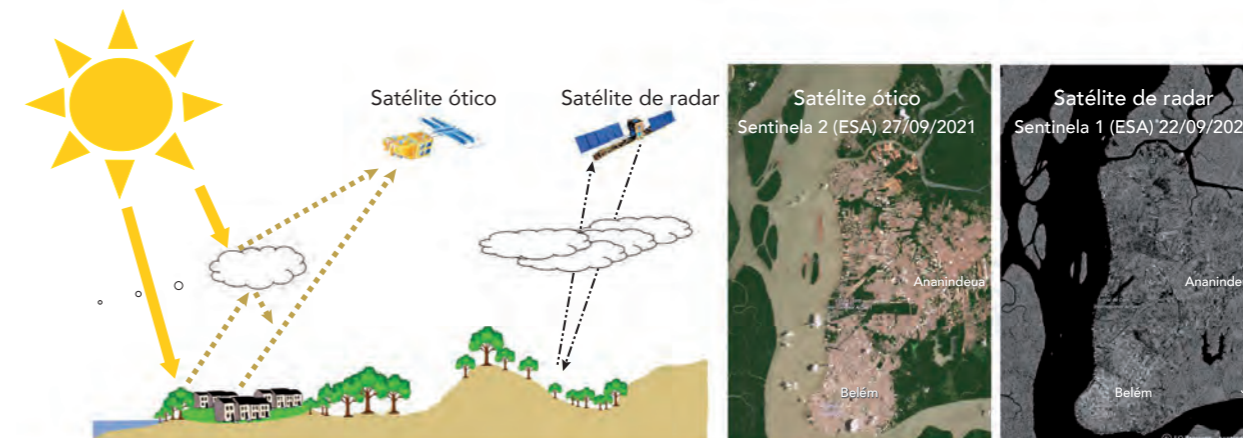
Nas últimas décadas, o IRD conduziu programas internacionais de pesquisa para compreender melhor o sistema costeiro amazônico, combinando a exploração científica de dados ou medições de/por satélite com observações ou inquéritos no campo.

O uso de dados de satélite de observação da Terra é muito bem adaptado ao estudo da Amazônia devido ao seu tamanho, à extensão geográfica do sistema costeiro, à dificuldade geral de acesso e ao baixo relevo que facilita a análise das pegadas deixadas na paisagem. Após complexo processamento matemático, as imagens de satélite reproduzem certas propriedades físicas das superfícies terrestres registradas nos diferentes comprimentos de onda da luz solar que elas refletem (satélites ópticos). Alguns satélites (radar) enviam suas próprias ondas à Terra para medir outras propriedades quando estas ondas refletidas nas superfícies são registradas pelo sensor.

Em primeiro lugar, estas propriedades permitem formular hipóteses e abrir caminhos de trabalho. Em seguida, eles levam à produção de novos conhecimentos através da extração de informações úteis (classificação, distribuição espacial e evolução no tempo dos ecossistemas; modelagem 3D; indicadores do estado da superfície). Em áreas onde a imagem espacial não permite que os objetos ou processos procurados sejam discernidos diretamente, o trabalho metodológico produz indicadores indiretos ao ligar o objeto procurado a um objeto identificável na imagem.

Que seja em complemento, em combinação ou independentemente do uso de dados de satélite, a coleta de dados de campo alimenta a maior parte do trabalho de pesquisa.

Quanto à preparação e organização das campanhas de campo, os pesquisadores contam novamente com imagens de satélite para a visualização e pré-mapeamento das áreas de estudo, para a estratificação da amostragem no espaço e para as rotas e caminhos dos levantamentos. Alguns deles são selecionados para serem utilizados por sua vez para conduzir cálculos complexos aplicados a dados de satélites, ou, em muitas situações, para calibrar modelos, validar ou invalidar hipóteses iniciais, documentar tendências ou fazer recomendações. Na maioria dos programas científicos, as missões de campo permitem acoplar as informações obtidas por satélite com amostras ou inventários (fauna, flora, sedimentos, águas de mangue ou na costa) ou com medições de dispositivos de monitoramento (parâmetros meteorológicos, componentes ou movimentos de bancos de lama). Para alguns estudos, como os relacionados às atividades de pesca, são realizadas registros de captura nos pontos de desembarque, assim como inquéritos com os próprios pescadores (rotas de pesca, rotas de migração dos pescadores, ou práticas de pesca).



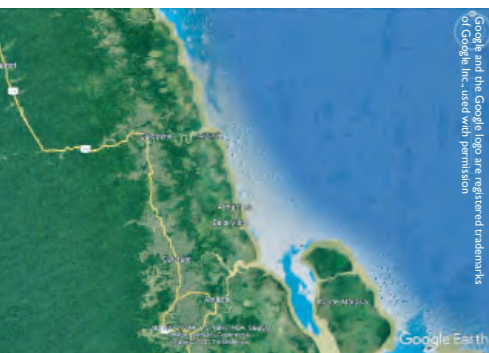
Diferenças entre sensores ópticos e de radar.

## Visão geral de 30 anos de programas de cooperação científica

A posição do litoral amazônico na interface continente/oceano é essencial para compreender o funcionamento dos biomas amazônicos, tanto na escala global e regional, quanto local.

Em escala global, a foz do rio combinado com as forças regionais impostas a ele provoca uma dispersão em larga escala das águas e sedimentos do rio Amazonas ao longo de toda a costa atlântica, desde a ponta leste do Brasil até o Golfo do Caribe. Entre Macapá e Belém, a boca do rio de 300 km de largura traz para o oceano uma carga de sedimentos estimada em 40 t.s-1, que, dependendo da estação do ano e das estimativas, representa de 2 a 6 bilhões de toneladas por ano (ver Capítulo 8). Parte deste fino sedimento é depositado na plataforma continental até 200 km ao largo, e outra parte dele migra ao longo da costa norte brasileira, do Escudo das Guianas para a Venezuela, sob o efeito combinado de correntes oceânicas e meteorológicas (Corrente do Atlântico Sul e Frente Intertropical de Convergência). O estuário é formado por um conjunto de inúmeras ilhas (arquipélago de Marajó) e quase todos os sedimentos que se elevam ao norte alimentam vastas planícies fluviais e de marés, que favorecem as zonas úmidas e pantanosas. Esta massa de sedimentos ofusca em grande parte as entradas de outros rios no sistema costeiro e condiciona um mosaico de ecossistemas como o manguezal, que se desenvolve sobre áreas muito grandes da zona intertidal. A alta precipitação e a riqueza de nutrientes levam a uma abundância de biodiversidade e uma grande riqueza de flora e fauna, tanto em ambientes terrestres como aquáticos ou oceânicos.

A influência do rio Amazonas cria assim três blocos distintos: a parte sul do estuário (Pará/Maranhão); ao norte, a margem equatorial representada pelo estado do Amapá; e, em sua sucessão, o Planalto das Guianas. Cada um desses blocos funciona de maneira diferente e tem suas próprias características. O bloco Pará/Maranhão é formado por inúmeros rios cujos estuários cortam a plataforma continental, formando reentrâncias, com a formação de sistemas dunares notáveis (por exemplo, Salinas) na frente do oceano. Estas morfologias são perpetuamente modificadas por macro-marés, que moldam imensas praias intercaladas com florestas mistas de manguezais que ocupam



Estuário da Amazônia Norte.



Estuário da Amazônia Sul



os flancos estuários na borda do planalto baixo. O litoral do Amapá forma uma vasta planície de lama com marés de grande amplitude, poucos rios, mas com lagos e pântanos e ao longo da linha costeira uma orla contínua de floresta de manguezais, que também pode ocupar promontórios lamacentos, bordas de lagos, canais de maré ou barras de maré. Ela delimita a plataforma continental, que é particularmente extensa (162.000 km<sup>2</sup>), larga e plana, com águas turvas, ricas em argila e areias muito finas. Além do Cabo Orange, o terceiro bloco, o Escudo das Guianas, tem uma morfologia costeira mais estreita, consistindo de uma recente franja Holocênica de mangues, zona úmidas e pântanos, seguida por uma planície Pleistocênica mais antiga que é o domínio das savanas ou pri-pri. A área costeira está sob a influência de dinâmicas hidrossedimentares muito intensas, que remodelam permanentemente os bancos de depósitos lamacentos (até 60 km de comprimento, 15 km de transecto e 7 m de espessura) que se movimentam ao longo da costa e nos quais se desenvolvem os manguezais. Durante os períodos entre a formação dos bancos, a linha costeira desobstruída dos manguezais está sujeita a forte erosão, que leva à destruição dos habitats naturais e dos assentamentos humanos. Aqui, a variação na extensão dos manguezais estaria ligada a macro modificações de baixa frequência no oceano, impulsionada pela oscilação do Atlântico Norte (fenômeno de variação no regime de oceano-atmosfera em função das pressões atmosféricas, ONA). Outras hipóteses de pesquisa apontam a influência na ondulação do ciclo lunar de Saros (período de 18 anos e 11 dias correspondente ao tempo decorrido entre duas aparições idênticas da lua no céu), o que poderia explicar um ciclo na dinâmica espaço-temporal dos bancos de lama e dos manguezais que os colonizam.

Neste contexto, o comportamento geomorfológico das costas amazonenses, a vulnerabilidade e a capacidade de adaptação às mudanças costeiras das zonas úmidas em sentido amplo e dos manguezais em particular, estão se tornando uma questão importante para os gestores e os atores do desenvolvimento nas próximas décadas. Estes ecossistemas costeiros estão fortemente ameaçados pelo homem, como mostra a extensão dos manguezais, que foi reduzida em 25% em escala global, quando elas atenuam os efeitos costeiros. Como resultado, estes últimos repercutam com maior intensidade, amplitude e regularidade na costa. Além disso, estes ecossistemas estão expostos aos efeitos das mudanças globais com a elevação do nível do mar, a modificação da temperatura da superfície oceânica, o aumento da erosão da linha costeira, o agravamento das tempestades oceânicas. Se a hipótese atualmente adotada é que o litoral do rio Amazonas apresentaria um grau de vulnerabilidade a estes efeitos menor do que outras regiões do mundo, o fato é que a tomada de medidas de preservação e conservação surge como questão de primordial importância.

### **Interdisciplinaridade, palavra-chave dos estudos costeiros amazônicos**

A interdependência entre sistemas continentais, costeiros e oceânicos requer abordagens interdisciplinares para estudos de ecossistemas costeiros, incluindo hidrologia, sedimentologia, geologia e geografia. A heterogeneidade das populações e sua ocupação destes espaços - densidades e tecidos urbanos, culturas e relações com o meio ambiente, tendências e práticas

de desenvolvimento - leva as comunidades científicas a incluir as dimensões sociológicas, antropológicas ou econômicas nos estudos costeiros.

Os programas realizados por ou com o IRD nos últimos trinta anos, alguns dos quais com resultados chave que relatamos no parágrafo anterior, abordaram geralmente todos esses aspectos. A pesquisa costeira amazônica mobilizou amplas parcerias, reunindo vários atores do IRD, mas também inúmeras instituições de pesquisa ou de ensino superior no Brasil.

Os programas Ecolab, Proclam e Guyamapa, ligados aos projetos científicos dirigidos por estas organizações, reuniram uma densa rede de pesquisadores cobrindo todos os temas de interesse para estudos costeiros, desde o Venezuela até o Nordeste brasileiro. Numerosas teses de doutorado e cursos universitários voltados para questões costeiras consolidaram e enriqueceram a rede em todos os compartimentos científicos de interesse: dinâmica hidro-sedimentar e geomorfologia costeira, paleoclimas e mudanças climáticas, ecologia, ecobotânica e biodiversidade, recursos costeiros, práticas e usos. Em conexão com estes programas federadores, as numerosas equipes envolvidas lideraram uma pesquisa transversal aberta à sociedade, associando pesquisadores, atores das políticas públicas e organizações de gestão ambiental.

Atualmente, esta rede continua no âmbito de programas de cooperação científica dedicados a outros campos de pesquisa, como o projeto internacional Progysat atualmente em andamento, que, embora não contenha um componente especificamente dedicado ao sistema costeiro, se mobiliza em torno do tema dos manguezais na costa da Guiana Francesa. Um dos objetivos do Progysat, liderado pelo IRD da Guiana Francesa até o final de 2023, é remobilizar a rede histórica de pesquisadores envolvidos em estudos costeiros amazônicos em torno de uma nova proposta para o período 2023- 2026. Esta proposta será articulada com os programas de pesquisa de interesse relacionado realizados pelo IRD no Brasil, e envolverá uma comunidade científica ampliada para assumir o trabalho em uma abordagem interdisciplinar fortalecida, respondendo aos objetivos estabelecidos pelo Instituto de uma ciência da sustentabilidade, envolvida e aberta.

### **Perspectivas e orientações para um maior desenvolvimento**

Os estudos dedicados ao sistema costeiro e aos rios levam seus autores a identificar e recomendar medidas concretas destinadas a preservar, proteger ou desenvolver o litoral com o objetivo de construir uma co-viabilidade sustentável entre os sistemas naturais e antropizados.

Este objetivo de pesquisa é fortemente esperado pela sociedade, e responde a uma necessidade urgente no contexto da mudança climática em curso. As ameaças aos recursos naturais, sejam de origem natural ou antropogênica, estão se diversificando e se intensificando, e as noções de vulnerabilidade e resiliência dos ecossistemas costeiros assumem agora uma dimensão particular. Para as sociedades que dependem destes ecossistemas para sua subsistência e desenvolvimento, ou para os habitantes dos centros urbanos ao longo da costa oceânica, estas ameaças comprometem seu modo de vida e, em alguns casos, a possibilidade de ocupação humana de áreas costeiras



Mangues ao longo da costa da Guiana Francesa.



Vendedor de caranguejos de mangue, mercado de Bragança ao sul da foz do Amazonas (Pará, Brasil).



sensíveis em longo prazo.

O sistema costeiro da Amazônia não é imune às situações vividas por outras áreas costeiras. Embora sua localização geográfica em ambos os lados do Equador (Macapá, Estado do Amapá) o proteja de furacões, ele ainda está exposto aos distúrbios que afetam um grande número de costas ao redor do mundo. Essas perturbações são materializadas pela erosão da linha costeira e pela retirada de áreas habitáveis, ou por inundações durante eventos meteorológicos violentos. Levam a um esgotamento dos recursos pesqueiros e um aumento da pressão antrópica sobre os ambientes costeiros devido ao crescimento populacional, consumo de terra, aquicultura e agricultura. Para lidar com isso, a pesquisa fundamental deve ser apoiada a fim de melhorar os modelos de previsão e as atividades de pesquisa devem permitir que os decisores e a sociedade experimentem soluções para reduzir o impacto dos distúrbios.

O objetivo é repensar a pegada humana sobre os recursos e apoiar as populações com soluções que coloquem a co-viabilidade no centro das interações entre sistemas naturais e sociedades, em termos de conservação, proteção e desenvolvimento de serviços ecossistêmicos. Estudos futuros serão baseados na rede de áreas protegidas que existem atualmente na Guiana Francesa (parques nacionais costeiros, parques nacionais ou zonas de proteção marinha, reservas da biosfera, zonas de proteção ambiental, reservas extrativistas, sítios europeus de proteção de áreas úmidas) para experimentar ou identificar formas de adaptação a estes desafios.

Os questionamentos científicos subjacentes a estes estudos estarão alinhados a trabalhos anteriores, ligando o progresso feito no campo da modelagem da pressão hidrológica, oceanográfica e climática em escalas regionais com o progresso feito em escalas locais, ligando a dinâmica dos ecossistemas e a dinâmica das relações recurso/uso. Para atingir esses objetivos, novas abordagens metodológicas terão de reforçar as ferramentas e práticas atuais das comunidades científicas.

O progresso no campo da observação da Terra é constante, com muitas novas missões de satélite oferecendo conjuntos de dados cada vez mais diversos e massivos, em particular a melhoria das resoluções espaciais e frequências de revisita, novas bandas espectrais fornecendo informações sobre o estado das superfícies naturais, missões dedicadas à radiação térmica e novos radares permitindo uma aproximação mais fina da biomassa ou umidade do solo. Estes avanços na observação espacial são agora complementados pela democratização do uso de métodos de observação aerotransportada, como os drones.

Ao mesmo tempo, os avanços da engenharia informática e da ciência dos dados permitem agora mobilizar ou experimentar métodos de inteligência artificial e mineração de enormes conjuntos de dados heterogêneos particularmente promissores e atualmente em pleno andamento. Aplicadas às questões costeiras, estas novas capacidades devem permitir o aprimoramento da qualidade dos modelos e imaginar novas análises e combinações de dados coletados do espaço e no campo.

Finalmente, o forte crescimento das ferramentas colaborativas e participativas observado nos últimos anos com o amplo uso da internet e das redes sociais abre caminhos para reflexão e trabalho para imaginar novas formas de interação entre a pesquisa e as populações preocupadas com os sistemas costeiros.

---

### Para ir mais longe

PROST M. T. R. C. *et al.*, 2017 – *L'embouchure de l'Amazone, macro-frontière géomorphologique : enseignements de 30 années de recherches franco-brésiliennes sur les systèmes côtiers amazoniens* (1<sup>re</sup> partie). *Confins* [En ligne], 33. <http://journals.openedition.org/confins/12568> ; DOI : 10.4000/confins.12568

PROST M. T. R. C. *et al.*, 2018 – *L'embouchure de l'Amazone, macro-frontière géomorphologique : enseignements de 30 années de recherches franco-brésiliennes sur les systèmes côtiers amazoniens* (2<sup>e</sup> partie). *Confins*, 34. <http://journals.openedition.org/confins/12830> ; DOI : 10.4000/confins.12830

---

### Participaram das pesquisas

Jean-François Faure (IRD), Maria Teresa Prost (MPEG), Christophe Charron (IRD), Valdenira Ferreira Santos (IEPA), Antoine Gardel (CNRS), Amilcar Carvalho Mendes (MPEG), Heloisa Vargas Borges (MPEG), Erwan Gensac (université Bretagne Sud), Jean Michel Martinez (IRD), Vincent Vantrepotte (CNRS), Edward Anthony (université Aix-Marseille).

10

## Processos físicos na foz do Amazonas

A campanha Amazomix é a primeira campanha multidisciplinar a ser realizada no planalto amazônico. Ela foi projetada para responder às muitas questões que surgem sobre os processos físicos e biogeoquímicos e seus impactos em todo o ecossistema marinho da plataforma continental diante à foz do Amazonas.

### PARCEIROS

Centro Nacional de Pesquisa Científica (CNRS), França

Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES), França

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Brasil

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil

Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil

Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

Universidade do Porto, Portugal

Rockland Scientific, Canadá

O rio Amazonas contribui com uma carga considerável de água, sedimentos e organismos para o Oceano Atlântico, mas sua foz é pouco estudada (ver Capítulo 8) e muitos aspectos de seu funcionamento ainda são desconhecidos. A plataforma continental amazônica vivencia uma variedade de processos físicos como insumos fluviais, correntes costeiras, variabilidade de mesoescala, vórtices ou filamentos, afloramento ou upwelling (uma forte corrente do fundo à superfície conhecida por gerar águas ricas em nutrientes, portanto favoráveis à pesca), ou a maré e suas ondas internas - propagadas na frequência da maré e criadas pela interação da corrente da maré com uma topografia íngreme em um oceano com várias camadas de diferentes densidades - ou mesmo todos os tipos de ondas internas devido ao vento ou correntes. Todos estes processos desempenham um papel fundamental na máquina climática, influenciando as concentrações de nutrientes, clorofila e matéria em suspensão e alterando os balanços energético, salino e térmico. Estes parâmetros, por sua vez, condicionam as interações entre o ambiente físico e o meio vivo, das bactérias ao plâncton e aos estoques de peixes.

A pluma ou pluma amazônica dessalinizada é um grande volume de água fresca, turva e rica em nutrientes de origem continental que é trazida para a faixa costeira. É um local de alta produção de fitoplâncton que tem efeitos benéficos em toda a cadeia alimentar. Ela entra em um grande corredor de circulação oceânica e na 'esteira transportadora oceânica', movida por ventos, temperatura e salinidade. A água morna e salgada se move para o norte, onde esfria. Esta água mais fria e mais densa afunda no fundo dos oceanos e retorna ao sul. Essa Circulação de Inversão Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) é crucial para a regulação do



Aterragem de amostras biológicas, campanha Amazomix, Brasil.

Em conformidade com os acordos internacionais e a legislação brasileira, as amostras biológicas coletadas durante a campanha Amazomix foram desembarcadas no Brasil, onde foram coletadas. Aqui a tripulação está empenhada em transferir as amostras do Antea para o barco de pesca em mar aberto. De lá, elas foram transportadas para a Universidade Federal do Pará, parceiro do IRD.

clima global e é uma das razões pelas quais as temperaturas são mais altas ao longo da costa europeia do que na América do Norte.

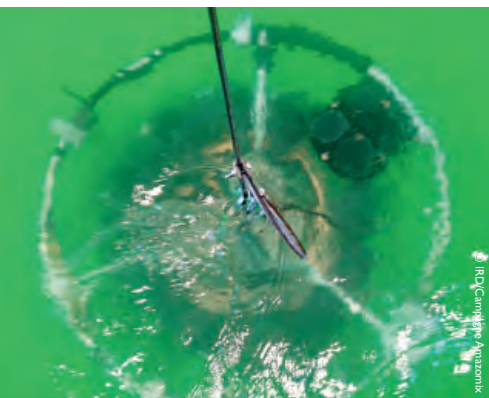
As marés internas são particularmente enérgicas nesta região. Através de seus fortes movimentos verticais ou da mistura turbulenta que elas podem criar, elas têm um impacto nos ciclos biogeoquímicos, permitindo uma entrada significativa de nutrientes na camada eufótica - que é a camada superior do ecossistema oceânico - favorecendo a produção primária, conforme observação da superfície a partir de dados de satélite. Assim, as marés internas poderiam influenciar a bomba biológica e o ciclo do carbono.

A biodiversidade marinha global da região, de bactérias a peixes, não está bem descrita. A presença de recifes de coral, apesar das águas turvas, não é explicada. A conectividade das espécies no Atlântico tropical também permanece uma questão em aberto. A região do Caribe é muito mais rica em biodiversidade do que o oceano ao largo do Brasil. Uma hipótese é que

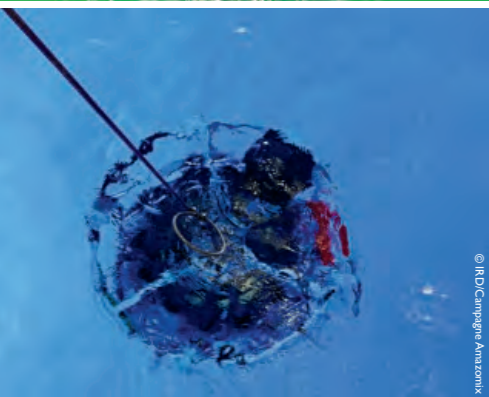




© IRD/Campagne Amazomix



© IRD/Campagne Amazomix



© IRD/Campagne Amazomix

#### Lançamento de uma roseta, campanha oceanográfica Amazomix.

Uma roseta é um instrumento oceanográfico de garrafas de amostra que coletam água em profundidades selecionadas, utilizando um sistema que opera sua abertura a partir do navio. Aqui o instrumento é visto lançado três vezes no mesmo oceano, embora sua cor varie muito.

a pluma amazônica, que pode se estender até 3.000 km fora da foz, poderia atuar como uma barreira para alguns organismos.

A plataforma amazônica é, portanto, um laboratório experimental ideal para estudar o impacto dos processos físicos na estrutura e função dos ecossistemas marinhos, costeiros e oceânicos.

#### A campanha Amazomix

Todas estas questões levaram os pesquisadores do IRD e seus parceiros a conduzir uma campanha marítima em grande escala no final de 2021, a campanha Amazomix. Uma equipe multidisciplinar de 17 pesquisadores franceses e brasileiros embarcou no Antea, um navio semissubmersível da frota oceanográfica francesa. O navio partiu de Cayenne (Guiana Francesa) e navegou por águas brasileiras, explorando a foz do Amazonas ao longo de mais de 6.000 km. Esta campanha cobriu a plataforma amazônica e a encosta continental para estudar o impacto das correntes de fina escala, desde a pluma amazônica e processos turbulentos (resultantes das ondas internas que se formam no oceano, estes movimentos de alguns milímetros por quilômetro causam uma mistura irreversível de águas e suas propriedades ao longo de vários milhares de quilômetros) no funcionamento do ecossistema marinho de um ponto de vista físico, biogeoquímico e biológico. A expedição também teve como objetivo rastrear a origem e distribuição de poluentes, metais pesados e microplásticos, e determinar seu papel na cadeia alimentar.

Além dos cientistas a bordo, o Amazomix contou com uma equipe de 70 pesquisadores do Brasil, da França e de outros países.

As medições e análises de amostras in situ serão estudadas em interação com ferramentas e dados digitais (modelagem e dados de satélite). A análise dos dados coletados será realizada em conjunto pelos diferentes parceiros e os resultados serão compartilhados. A campanha também terá uma função de formação de pesquisa para cerca de 50 estudantes internacionais.

#### Em conclusão

Os resultados preliminares revelam um forte impacto das ondas internas na estrutura e funcionamento do ecossistema marinho, desde os processos físicos até os ecológicos. A amostragem biológica extensiva dos diferentes compartimentos, desde a superfície até mais de 1.300 m de profundidade, revelou uma biodiversidade muito maior do que a registrada anteriormente na região.



© IRD/A. Bertrand

Seleção de amostras biológicas antes da embalagem.

#### Para mais informações

<https://www.ird.fr/campagne-amazomix-etude-des-processus-physiques-et-leurs-impacts-sur-lecosysteme-marin-lembouchure>

#### Participaram das pesquisas

Ariane Koch Larouy (IRD), Flavia Lucena Fredou (UFRPE), Moacyr Araujo (UFPE), Arnaud Bertrand (IRD) e mais de setenta pesquisadores.



# 11 Climas do passado

O estudo de climas passados oferece uma perspectiva única para entender a sensibilidade e estabilidade do clima da Terra. Os registros paleoclimáticos nos dizem que nosso planeta registrou uma ampla gama de climas em muitas escalas de tempo.

## PARCEIROS

Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (IG-USP), Brasil

Observatório Nacional, Rio de Janeiro (COGE), Brasil

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Centro de Energia Nuclear para a Agricultura, Universidade de São Paulo (CENA-USP), Brasil

Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ-LARAMG), Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

Instituto de Proteção Radiológica e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Brasil

Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), França

Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), Brasil

Instituto de Astronomia, de Geofísica e Ciências Atmosféricas (USP), Brasil

## Por que estudar climas passados?

Os compartimentos biosféricos, atmosfera, oceanos, criosfera e sistemas terrestres se modificam ao longo do tempo geológico determinando modificações na composição e evolução dos organismos vivos no planeta incluindo a espécie humana. A partir da revolução industrial a sociedade humana disponibilizou grandes estoques de carbono que estavam armazenados no compartimento geológico e que hoje em conjunto com alterações no ciclo biogeoquímico do carbono e do nitrogênio promovem o que se chama de mudanças climáticas antropogênicas. Desta forma o entendimento do clima passado se faz relevante nos dias atuais, na busca de parâmetros comparativos entre as tendências das mudanças climáticas causadas pelas emissões humanas de gases do efeito estufa com as mudanças climáticas relacionadas as forçantes climáticas naturais. Considerando que os compartimentos biosféricos tem importâncias específicas para as mudanças climáticas destaca-se a importância planetária dos sistemas terrestres neotropicais em especial a Amazônia. A Amazônia desempenha um papel importante no funcionamento do clima da Terra. A água reciclada através da transpiração das florestas influencia a distribuição espacial da precipitação na Amazônia. Desta forma as florestas tropicais têm uma influência reguladora importante no clima local e regional, através da modulação da troca de umidade e energia entre a terra e a atmosfera. O desmatamento assim como as mudanças de vegetação relacionadas a mudanças climáticas perturbam essa troca diminuindo consideravelmente a recarga de vapor d'água para a atmosfera, resultando em uma diminuição das precipitações.

Além disso, a constante insolação, temperatura e principalmente pluviosidade faz com que a floresta tropical amazônica seja um dos mais produtivos ecossistemas do mundo concentrando grande biomassa com grande representatividade em relação ao ciclo do carbono global. Entretanto, são ecossistemas extremamente frágeis suscetíveis a vários tipos de fenômenos de



Principais locais de trabalho relacionados ao entendimento de mudanças paleoclimáticas e sobre os processos de acumulação de carbono em área de inundação na Amazônia.

distúrbios que podem alterar sua produtividade, biomassa e consequentemente os ciclos biogeoquímicos associados

Portanto, é crucial examinar a variabilidade climática para além da era dos dados climáticos instrumentais através de estudos paleoclimáticos (observacionais e de modelagem), se quisermos entender a amplitude das mudanças climáticas naturais, a rapidez com que as mudanças ocorrem, quais são os mecanismos em escalas regional e global, e quais fatores de força externos ou internos controlá-los. De fato, os registros instrumentais são geralmente considerados não longos o suficiente para dar um quadro completo de la variabilidade climática e provavelmente também foram influenciados por ações humanas.

Estes estudos oferecem uma perspectiva única para entender a sensibilidade e estabilidade do clima da Terra. Os arquivos paleoclimáticos nos dizem que nosso planeta registrou uma ampla variedade de climas em várias escalas de tempo. Sabemos que muitas dessas mudanças do passado foram influenciadas por fatores como parâmetros orbitais, variabilidade da atividade solar, vulcões, e emissão e absorção de gases do efeito estufa.

## PARCEIROS

Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM)

Universidade Federal do Ceará (UFC), Brasil

Embrapa Solos, Brasil

Universidade de Göttingen, Departamento de Palinologia e Dinâmica Climática, Alemanha

Centro Nacional de Monitoramento de Catástrofes Naturais (CEMADEN), Brasil

Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Brasil



Na medida em que modelos climáticos podem razoavelmente simular as alternâncias quentes e frias do passado, ganhamos confiança de que os modelos podem ser usados para estudar o clima futuro da Terra.

### Como são estudados os climas do passado?

Os estudos multidisciplinares do clima recente e passado e seus impactos sobre ecossistemas continentais na Amazônia que apresentam relevante papel na biogeoquímica dos principais gases do efeito estufa foram uma prioridade nas relações de colaboração científica franco-brasileira. A importância dos resultados obtidos incentivou um grupo de pesquisadores do IRD e os parceiros brasileiros a estabelecer um grande projeto sobre a história amazônica no passado. Esses estudos evoluíram para um melhor conhecimento do clima regional e das mudanças para uma abordagem de comparação de modelos de dados, em escala regional. Nessa evolução, os estudos incluíram progressivamente, a participação de outras instituições que trabalham com modelos acoplados clima-oceano no passado. Ao todo, esses projetos proporcionaram a oportunidade de formar mais de trinta alunos brasileiros de mestrado e doutorado e resultaram em uma densa produção científica. O sucesso desses projetos e o desejo expresso por nossos parceiros brasileiros de continuar e desenvolver ainda mais esta cooperação frutífera com o interesse de integrar outros parceiros sul-americanos (no Peru e Bolívia), reforçando nossa colaboração dentro de várias cooperativas (projetos nacionais e internacionais (IRD-CNPq, LMI, INCTs, ANR)), com o objetivo de reconstruir a história da Amazônia.

Diferentes áreas geográficas que compreendem o bioma amazônica foram estudadas, considerando áreas de extremos climáticos de grande precipitação, áreas de transição climática/ecológica e áreas de inundação sob influência de rios de água branca, preta e clara incorporando as nuances da grande variabilidade ecossistêmica do bioma amazônico. A escolha dos sítios de estudos sempre foi baseada em características ecológica, climatológica e geomorfológicas usando sistemas de informação geográfica. Os registros paleoclimatológicos (testemunhos) foram coletados em lagos, várzeas e turfeiras usando a metodologia de sondagem de sedimentos lacustres. As amostras armazenadas em câmaras frias são amostradas transversalmente segundo as diferenças nas características do sedimento e considerado a melhor resolução possível. As idades das diferentes variações consideradas são calculadas pelo método do radiocarbono. Outras medidas de parâmetros físicos, químicos e biológicos são obtidas nas amostras coletadas dos testemunhos.

Paralelamente, foram iniciados a partir dos anos 2000 estudos sobre espeleotemas para reconstruir a hidroclimatologia. Os espeleotemas são concreções encontradas em cavernas (por exemplo, estalagmites e estalagmites), que por meio de medidas isotópicas podem ser usadas para caracterizar a precipitação que percolou e deu origem à concreção.

Aliados a estes estudos locais e para uma melhor interpretação regional do clima e do ambiente foram desenvolvidas ferramentas matemáticas e modelagem baseado numa abordagem dados/modelos. Buscando entender o significado ambiental destes proxies paleoclimáticos foram usadas metodologias de observação de sensoriamento remoto e de sistema de informação geográfica (SIG).



Sondagem na várzea de Curuai.

### Os principais resultados dos estudos e modelagem do lago

#### Estudos dos lagos da Serra do Carajás na Amazônia Oriental

Os eventos erosivos e de mudanças do nível do lago determinados por dados geoquímicos indicaram períodos de degradação da vegetação, principalmente entre 25.000 a 15.000 anos cal AP (Antes do Presente). O Último Máximo Glacial (com temperaturas 5-7 graus mais baixas nos trópicos) entre cerca de 20.000 e 18.000 anos cal AP. (Maximo Glacial), é representado por uma ausência de sedimentação indicativo de climas mais secos durante a era glacial do Pleistoceno. Entre 8000-4000 anos cal AP, indicadores de queimada confirmaram um grande evento de seca e intensos distúrbios ecossistêmicos associados que podem ter interconexão com distúrbios do ciclo do carbono a partir de 7000 anos AP, determinado pelo aumento do CO<sup>2</sup> registrados em perfis de gelo na Antártica.

#### O registro sedimentar do Lago Saci, Amazonas do Sul

A interação dos registros palinológicos com os registros geoquímicos indicou mudanças desde 35.000 anos cal AP, nesta área ao qual hoje se apresenta como uma área de transição Floresta/Cerrado. Assim como observado na Amazônia Oriental a floresta tropical apresentou períodos de expansão e regressão relacionados a um clima mais seco e frio entre 35.000 e 18.200 anos cal AP e uma mudança para condições mais quentes e úmidas entre 9.200 e 7.500 anos cal AP. Entre 7.500 a 5.000 anos cal AP, foi analogamente observado, como na Amazônia Oriental ocorrência de fase seca que afetou a distribuição da floresta tropical. Um retorno de condições mais úmidas favoreceu um aumento do nível lacustre e simultaneamente da floresta tropical após 5.000 anos cal AP.

#### Na Amazônia Ocidental, no Morro dos Seis Lagos, agora a parte mais úmida da Amazônia brasileira

Neste ambiente a fisionomia florestal não há se alterado durante os últimos 60.000 anos. Entretanto dados geoquímicos a partir da integração de registros sedimentares coletados em diferentes expedições científicas ao Morro dos Seis Lagos, em especial à Lagoa da Pata (São Gabriel da Cachoeira, AM) indicaram diminuição de precipitações durante o glacial e fase seca do holoceno médio sem que tivesse havido mudanças profundas da vegetação.

#### O que dizem os resultados dos modelos climático-oceânicos acoplados desenvolvidos com a Universidade de São Paulo?

Estes modelos permitiram compilar 120 conjuntos de dados paleoclimatológicos, que foram publicados em 84 artigos diferentes. Os paleodados aqui analisados sugerem um cenário de déficit hídrico na maior parte do leste da América do Sul durante o Holoceno médio se comparado ao Holoceno tardio, com exceção do Nordeste do Brasil.

#### Os resultados obtidos no âmbito da LMI Paleotracas, a partir de 2008

O grupo focou nos estudos dos últimos 2000 anos usando vários registros lacustres no Brasil e Peru para a reconstrução em alta resolução das mudanças ambientais na Amazônia. As reconstruções da história climática da Amazônia durante este período indicam um enfraquecimento da circulação do sistema



Vista da região superior do Morro dos Seis Lagos onde observa-se um dos Seis Lagos situados em depressões cársticas desta formação.

de monções da América do Sul durante a anomalia climática medieval, que foi um período de clima excepcionalmente quente nas regiões do Atlântico Norte, ao qual pode ter correspondência com eventos de queimada de larga escala, em contraponto a pequena idade do gelo 12 globalmente mais fria.

### O que dizem os registros de carvões em solos e sedimentos?

As primeiras observações sobre a ocorrência de grandes eventos de incêndios relacionados a mudanças paleoclimáticas foi realizada ao observar grande quantidade de carvões em perfis de solo na região da transamazônica entre 6.000-3.000 anos A.P. Os carvões recolhidos e datados em solos bem como em registros sedimentares indicam incêndios florestais que foram responsáveis por um forte impacto em grandes áreas florestais e evidentemente sobre o ciclo do carbono global.

Acoplamento dos dados paleoclimáticos com a perspectiva sobre o ciclo do carbono foram trazidos a luz da comunidade científica, através de dados sedimentológicos e palinológicos respectivamente ao qual estimaram profundas mudanças de biomassa nos sistemas florestais amazônicos desde o Último Máximo Glacial. As mudanças nas taxas de acúmulo de partículas carbonizadas revelaram que os eventos de perturbação relacionados às mudanças no uso do solo superam em ordens de grandeza, as mudanças ambientais causadas por eventos climáticos naturais, especialmente e acentuadamente no final do Holoceno, quando a vegetação florestal atingiu um pico de biomassa e a presença humana se mostrou importante.

### Variabilidade climática, o bioma Amazônia e o ciclo do carbono

Os estudos do grupo Hibam (ver capítulo 1) buscam utilizar as informações do presente (hidrológica, climatológica, geoquímica e geomorfológica) para investigar fatos do passado dentro de uma janela de tempo que compreende sobretudo o Holoceno. Essas informações estão sendo associadas a dados paleoclimáticos gerados a partir de testemunhos sedimentares. Durante a fase seca do Holoceno Médio, os lagos de várzeas encontravam-se isolados do canal principal do rio provocando aumento da acumulação de carbono. Contrariamente durante a fase úmido do Holoceno Superior a acumulação de carbono nestes sistemas deposicionais foi reduzida devido ao intenso aporte de material transportado pelo rio diluindo a acumulo do carbono.

### Quais são as perspectivas?

Nos trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos conseguiu-se compreender as variabilidades climáticas e seus impactos sobre os sistemas florestais amazônicos. A dimensão humana foi acoplada em estudos sobre registros recentes em áreas de intensa mudança do uso da terra demonstrando o profundo impacto da ação humana em relação aos eventos naturais.

Hoje em dia, estas perspectivas levantadas trazem perguntas-chaves para futuro em relação ao papel da floresta sobre o clima tais como: o que temos a aprender com as secas do Holoceno em relação ao aquecimento global atual? Quais são as forças naturais e antrópicas para o futuro que podem

determinar profundas mudanças ecossistêmicas e como manejar os sistemas florestais para que mantenha serviços ecossistêmicos de valor inestimáveis para o globo tais como: captura de carbono, manutenção da umidade atmosférica e transferência de calor?

### Para mais informações

ANHUF D. *et al.*, 2006 – Paleo-Environmental Change in Amazonian and Africa Rainforest during the LGM, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 239 : 510-527. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.01.017>

CAMPELLO R.-C *et al.*, 2014 – Palaeofires in Amazon: Interplay between land use change and palaeoclimatic events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 415 : 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.07.020>

FONTES D. *et al.*, 2017 – Paleoenvironmental dynamics in South Amazonia, Brazil, during the last 35,000 years inferred from pollen and geochemical records of Lago do Saci. *Quaternary Sciences Review*, 173 : 161-180. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.08.021>

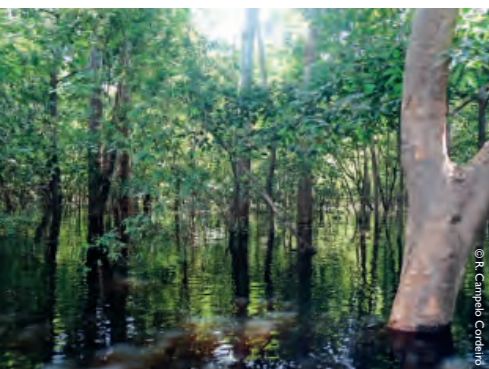
MARTINS G. S. *et al.*, 2022 – Late quaternary hydrological changes in the southeastern amazon basin from n-Alkane molecular and isotopic records in sediments of Saci lake, Para State (Brazil). *Global and Planetary Change*, 213 (103833). <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103833>

SIFEDDINE A. *et al.*, 2001 – Variations of Amazonian Rain Forest environments: a sedimentological records covering 30, 000 years BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168 : 221-235. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00256-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00256-X)

TURCQ B. *et al.*, 2002 – Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology*, 148, 319-342. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00224-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00224-X)

### Participaram das pesquisas

Renato Campelo Cordeiro (UFF), Abdel Sifeddine (IRD), Bruno Jean Turcq (IRD), Michel Servant (IRD), Louis Martin (IRD), François Soubies (IRD), Jean-Marie Flexor (COGE), Kenitiro Suguio (IG-USP), Jorge João Abrão (UFF), Patrícia Florio Moreira Turcq (IRD), Luciane Silva Moreira (UFF), Naziano Filizola (Ufam), Pascal Fraizy† (IRD), André Martinelli (IRD), Keila Cristina Pereira Aniceto (estudante de doutorado), Isabel Quintana Cobo (estudante de doutorado), Renata Lima da Costa (UFF), Heitor Evangelista (UERJ-Laramg), Ricardo Erthal Santelli (UFF/UFRJ), Francisco Fernando Lamego Simões Filho (UFC), Sambasiva Rao Pachinelam (UFF), Bastiaan Adriaan Knoppers (UFF), Luiz Drude de Lacerda (UFF), Marcelo Correa Bernardes (UFF), Arlei Oliveira da Silva (UFF), Renato de Aragão Rodrigues (UFF), Alice Bosco (UFF), Santos Gabriel Souza Martins (UFF), Juliana Nogueira (UFF), Libério Junio da Silva (UFF), Marcela Cardoso Guilles da Conceição (UFF), Yvaga Poty Penido (UFF), Daiana Fontes (UFF), Caroline dos Santos Rocha Maia (UFF), Josias Azeredo Barbosa (Inpi), Luiz Carlos Ruiz Pessenda (CENA-USP), Marie-Pierre Ledru (IRD), Hermann Behling (Universidade de Göttingen), Francisco William da Cruz Jr. (IG-USP), José Antônio Marengo (Cemaden), Nicolás Misaidilis Strikis (UFF), Pedro Leite da Silva Dias (IAG).



Ambiente da floresta inundada do arquipélago de Anavilhanas (Estado do Amazonas). Os processos de deposição em diferentes ambientes de planície de inundação são avaliados e quantificados.



12

## Climas atuais

Para o futuro, modelos preditivos mostram que a mudança climática global relacionada às emissões de gases de efeito estufa resultará em temperaturas mais altas em toda a bacia amazônica e uma nova diminuição da pluviosidade em áreas já afetadas por este fenômeno. A floresta amazônica se tornará então uma fonte de carbono - de acordo com alguns autores já o é - e isto intensificará a mudança climática..

### Contexto

Desde os anos 1980, os hidrólogos nos países amazônicos e no IRD têm se interessado pelo clima da Amazônia. No início, o objetivo era realizar balanços hidrológicos para cada bacia hidrográfica e compreender a variabilidade das chuvas no espaço e no tempo e, conseqüentemente, a variabilidade do fluxo dos rios e do transporte de sedimentos dos Andes para a Amazônia e para o Oceano Atlântico. Uma das questões iniciais foi o papel do fenômeno El Niño nas precipitações na região. De fato, poderosos eventos El Niño haviam ocorrido sucessivamente em 1972- 1973, 1982-1983, 1997-1998, com efeitos devastadores, particularmente nas sociedades rurais dos países tropicais da América do Sul. O objetivo também era definir o poder preditivo do El Niño sobre as chuvas regionais e os extremos hidrológicos. Desde então, essas questões têm evoluído. Além da variabilidade pluviométrica ano a ano, surgiram tendências que precisam ser explicadas, e o tema das interações terra-clima se tornou cada vez mais importante à medida que o desmatamento na Amazônia cresceu.

O projeto HyBam reuniu os Serviços Hidrológicos e Climatológicos Nacionais, assim como pesquisadores e estudantes dos sete países amazônicos (ver Capítulo 1) em torno dos hidrologistas e climatologistas do IRD. Isto facilitou o acesso a dados muito ricos e muitas vezes inexplorados. Graças a esta parceria com instituições e universidades, pesquisas inovadoras foram realizadas em uma escala de análise regional relativamente fina, particularmente nas bacias hidrográficas localizadas a montante da bacia amazônica, nos países andinos. Estes novos dados estes novos dados forneceram esclarecimentos aos trabalhos realizados até então majoritariamente por



Inundações na Amazônia peruana

pesquisadores da América do Norte e do Sul da América Latina. Esta pesquisa continua hoje graças ao dinamismo dos doutorandos sul-americanos do IRD, que se tornaram, por sua vez, profissionais e orientadores de pesquisadores..

### Como é feita a pesquisa?

Primeiro, bancos de dados foram criados a partir de medições coletadas de centenas de estações meteorológicas na bacia amazônica, e depois complementados por bancos de dados climatológicos globais a partir de informações de satélite, às vezes mescladas com dados terrestres. Isto levou a uma melhoria na definição espacial e temporal dos dados. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), em sua versão 3B42, fornece informações a cada três horas para pixels de 0,25 \* 0,25° de latitude- longitude. A base de dados Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (Chirps), derivada de dados de satélites e dados mensurados no solo, tem fornecido estimativas de precipitação com uma resolução de 0,05° há mais de 35 anos entre 50° N e 50° S. Essas bases de dados foram então utilizadas para realizar análise estatística a fim de identificar as tendências regionais.

Para compreender as variações espaciais e temporais da precipitação, as reanálises a partir de modelos meteorológicos fornecem informações

### PARCEIROS

Agência Nacional da Água (ANA), Brasil

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

Serviço Meteorológico e Hidrológico Nacional do Peru (SENAMHI)

Instituto Meteorológico Nacional e Hidrologia do Equador (INAMHI)

Universidade Mayor de San Andrés (UMSA), Bolívia

Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais (IDEAM), Colômbia

Instituto de Geofísica do Peru (IGP)

Universidade de Sorbonne, França

Universidade de Antioquia, Colômbia

detalhadas sobre o estado da atmosfera (pressão, vento e outros) em diferentes níveis altitudinais. Em segundo lugar, também utilizam-se outros registros, que fornecem informações mais específicas sobre a temperatura da superfície oceânica. Finalmente, os modelos climáticos regionais são utilizados para testar hipóteses relativas, por exemplo, às ligações entre a chuva e o desmatamento.

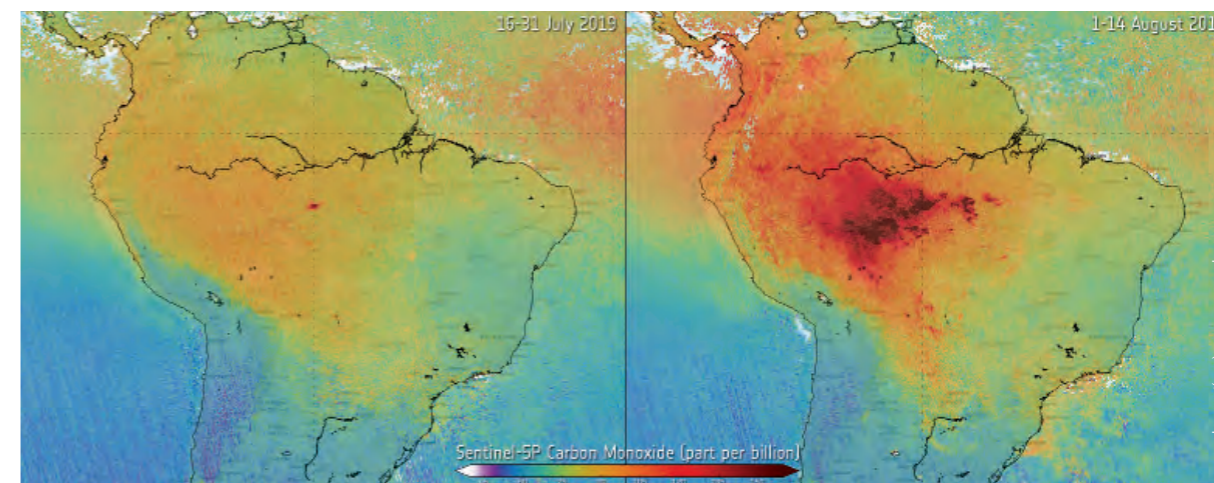
### Quais são os principais resultados?

Os principais avanços estão no campo da distribuição espacial das chuvas, sua distribuição sazonal, sua variabilidade interanual e de longo prazo, assim como as causas dessas variabilidades, sejam elas devidas a mudanças nos oceanos, na atmosfera ou ligadas à atividade humana (por exemplo, o desmatamento).

A precipitação na bacia amazônica é muito abundante, com uma média de 2.200 mm/ano, mas também é altamente variável no espaço. O acesso aos dados pluviométricos de todos os diferentes países amazônicos possibilitou um aprimoramento do nosso conhecimento desta variabilidade, particularmente nas regiões andinas a montante. Perto do Equador, a precipitação é muito intensa, com mais de 3.000 mm por ano, especialmente na parte noroeste da bacia, em direção à fronteira tríplice entre Colômbia, Peru e Brasil, e na parte nordeste da bacia, em direção à foz do rio. Elas também estão ao longo da Cordilheira dos Andes, onde fluxos úmidos vindos do Atlântico, recarregados com vapor de água ao passarem sobre a floresta que evapora e transpira, são levantados nas encostas íngremes dos Andes orientais expostos a ventos úmidos, e são registradas chuvas em excesso de 6.000 mm/ano. Este fenômeno é chamado de “reciclagem”. Quando chove na floresta amazônica, cerca de 75% da água retorna à atmosfera como vapor através da evaporação e transpiração das árvores e do solo. Cerca de um terço da precipitação vem da reciclagem do vapor de água. Por outro lado, a precipitação diminui para 1.500 mm/ano em direção à periferia tropical (Roraima no norte, Mato Grosso, Rondônia no Brasil, planície boliviana no sul) e se torna ainda mais baixa nos Andes em uma posição “a sotavento” ou em altitude elevada.

Na bacia amazônica, a precipitação varia de ano para ano. Esta variabilidade interanual está ligada tanto a mudanças na quantidade de vapor de água disponível para as chuvas quanto a mudanças na dinâmica da atmosfera, que por sua vez dependem frequentemente do comportamento térmico dos oceanos que circundam a América tropical. Foi demonstrado que as chuvas nas partes leste e norte da bacia são particularmente dependentes das temperaturas de superfície dos oceanos equatoriais do Pacífico e do Atlântico tropical. Quando o Pacífico equatorial é quente (evento El Niño) e/ou quando o gradiente de temperatura sobre o Atlântico tropical é positivo (norte quente/sul frio), a precipitação é baixa e a estação chuvosa é curta. De fato, nesta configuração, a pressão da atmosfera aumenta e o fornecimento de vapor de água pelos ventos alísios é reduzido, formando condições desfavoráveis para a pluviosidade na Amazônia. Estes eventos oceânicos podem causar secas severas, como em 1995, 1997-1998, 2005, 2010, 2015.

Quando as condições oceânicas se invertem, como durante o evento frio La Niña sobre o Oceano Pacífico, fortes chuvas causam inundações significativas, como em 1986, 1993, 1999, 2012, 2014, 2017 e 2021.



Usando dados do Sentinel-5P do programa Copernicus, a imagem mostra o impacto dos incêndios na Amazônia, com base no aumento do monóxido de carbono no ar entre julho e agosto de 2019.

Entretanto, a variabilidade da precipitação não depende apenas dos eventos térmicos nos oceanos vizinhos, o que significa que o poder preditivo da temperatura da superfície do oceano sobre a precipitação não é perfeito. Isto é ainda mais verdadeiro para o oeste e sul da Amazônia, onde as chuvas dependem mais das condições térmicas e de umidade das superfícies continentais ou dos distúrbios atmosféricos originários das altas latitudes do Hemisfério Sul.

Em longo prazo, o padrão de chuvas na bacia amazônica está mudando. Na parte sul da bacia, uma região tropical caracterizada por estações secas e úmidas muito marcadas, o início da estação chuvosa, que costumava ocorrer em setembro-outubro, voltou a se deslocar no ano. Na Amazônia boliviana, a precipitação diminuiu 18% desde o início dos anos 80. Os incêndios se tornaram mais frequentes e a estação seca de inverno também se tornou mais longa.

Au contraire, dans le nord de l'Amazonie, la fréquence des jours très pluvieux (> 10 mm) s'est accrue, surtout entre mars et mai, et l'on observe une augmentation de 17 % des précipitations, notamment à partir de 1998.

Ao contrário, no norte da Amazônia, a frequência de dias muito chuvosos (>10 mm) aumentou, especialmente entre março e maio, e houve um aumento de 17% na precipitação, especialmente desde 1998.

Este contraste nas variações entre o norte e o sul da bacia está ligado ao aquecimento do Atlântico tropical norte desde os anos 1990. Este calor adicional aumenta a elevação do ar (e a precipitação) na parte norte da bacia, perto das águas quentes, e por sua vez aumenta a pressão atmosférica (e a precipitação) na parte sul da bacia.

Essas mudanças de longo prazo nas chuvas têm consequências para as florestas, que são altamente dependentes do clima. Na parte sul da bacia, metade da precipitação anual cai durante a estação chuvosa, permitindo a recarga das águas subterrâneas e a transpiração de árvores durante a estação



seca. Mas quando a estação seca se torna mais frequente, mais intensa e afeta a metade da Amazônia, como em 2010, a falta de água pode limitar a vida das árvores ou até mesmo causar sua morte. Essas faltas de água ou energia são mais pronunciadas em regiões de floresta seca (cerrado) do que em regiões de floresta densa.

A floresta também está ameaçada pelo desmatamento de origem humana, que atinge quase 17%, particularmente no sul e leste da bacia, e por incêndios frequentemente iniciados por humanos, que são pouco controlados e favorecidos pelas condições climáticas secas. A floresta amazônica está sendo “savanizada” nas regiões mais afetadas pela baixa de chuvas e pelo prolongamento da estação seca, pelos incêndios e pelo desmatamento, com talvez um ponto irreversível durante o século XXI.

Ora, a floresta é uma fonte de vapor de água através da evapotranspiração das árvores. A reciclagem é responsável por cerca de um terço da precipitação nas regiões remotas do Atlântico a oeste e ao sul da bacia, sendo também fundamental para as regiões adjacentes densamente povoadas, o Altiplano andino, o sudeste do Brasil, com suas grandes cidades, como São Paulo,



Desmatamento no Pará.

onde grande parte das chuvas originam-se do vapor de água da Amazônia. O trabalho atual utiliza a modelagem para compreender melhor o papel do desmatamento no ciclo da água, no equilíbrio energético na superfície e na atmosfera e, portanto, na circulação atmosférica regional e local e nos mecanismos que desencadeiam as chuvas. Em particular, os modelos climáticos mostram que o desmatamento é desfavorável às chuvas na parte sul da bacia e que este fenômeno amplifica os efeitos do aquecimento no Atlântico tropical norte (ver acima). Em resumo, o desmatamento aumenta a seca, o que, por sua vez, é propício à perda de florestas. Este é um ciclo de retroalimentação positivo, onde os efeitos (perda da floresta por secas ou desmatamento) de uma causa (emissões de carbono das atividades humanas) ampliam a causa (falta de armazenamento de carbono pela floresta).

### Quais são os desafios e as perspectivas desta pesquisa?

Jovens cientistas sul-americanos, ex-alunos de doutorado no IRD, formados na França nos anos 2000 no âmbito do HyBam, estão contribuindo muito ativamente para o desenvolvimento do conhecimento climatológico na América do Sul. Recrutados em seu campo de especialização em seus países de origem, eles estão agora treinando a próxima geração de climatologistas. O trabalho deles é realizado em colaboração com pesquisadores de outros países amazônicos e internacionais. Com o passar do tempo, estas colaborações, institucionais ou não, tornaram-se indispensáveis para responder às muitas perguntas que exigem ferramentas cada vez mais sofisticadas e compensar o número relativamente pequeno de pesquisadores que trabalham nesta região.

A Amazônia é suficientemente grande para ter uma influência considerável sobre seu próprio clima, mas também sobre o clima regional sul-americano e sobre o clima global.

De fato, vimos que parte da Amazônia está secando e que esta secagem, que é prejudicial à floresta, é agravada pelo desmatamento e pelos incêndios. Entretanto, uma floresta em mau estado, degradada, não consegue mais armazenar carbono como uma floresta saudável. Assim, a floresta amazônica poderia se tornar uma fonte de carbono para a atmosfera em vez de armazená-la em suas árvores e solos. Isso aumentaria então a mudança climática global. Numa época em que a vegetação e os solos são vistos como grandes soluções para absorver mais ativamente o carbono emitido pelas atividades humanas, é essencial ter uma ideia clara da evolução do clima e das ligações entre clima, floresta e solos na Amazônia.

Assim, as bases de dados desenvolvidas nas últimas décadas por pesquisadores do IRD e seus parceiros tornaram-se inestimáveis para o monitoramento da mudança climática na Amazônia. A continuação destas medidas permitirá validar ou corrigir as previsões dos modelos e satélites. É essencial aprofundar os estudos sobre os mecanismos que regem o clima, sua variabilidade de um ano para o outro e sua tendência de longo prazo, a fim de melhor representá-los nos modelos e prever melhor o clima futuro da Amazônia, das regiões vizinhas e do globo. De fato, os modelos climáticos ainda não são muito confiáveis para representar o clima da Amazônia, em parte devido aos Andes, que produzem uma quebra muito forte no



Chegada da tempestade, Rio Negro, Brasil.

fluxo de ar. O conhecimento detalhado do clima e as simulações do clima futuro, portanto, ainda têm muita margem para melhorias.

As populações amazônicas extraordinariamente diversas dependem estreitamente do clima e da mudança climática, tanto em termos de temperatura quanto de chuvas, das quais a sobrevivência de muitas delas pode depender.

Os interesses econômicos também são importantes. Os países amazônicos são grandes fornecedores de produtos vegetais para o mercado mundial, como a soja para alimentar o gado. A questão é se estes países serão capazes de continuar esta atividade se o clima secar e o desmatamento da terra para cultivo aumentar a diminuição da pluviosidade necessária para a agricultura.

Um melhor conhecimento e simulação do clima permitirá a realização de estudos sobre os impactos das mudanças climáticas no comportamento e na saúde dos seres vivos e na economia, no intuito de antecipar e evitar, se ainda houver tempo, extinções e más escolhas econômicas, através de medidas de redução de emissões e de adaptação adequada. Os cientistas climáticos devem urgentemente associar seus esforços e modelos com os de pesquisadores de outras disciplinas, hidrologistas, etnólogos, biólogos e agrônomos. O processo já começou, mas deve ser continuado.

---

### Para mais informações

ESPINOZA J. C. *et al.*, 2018 – Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981-2017). *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4462-2

ESPINOZA VILLAR J. C. *et al.*, 2009 – Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29 : 1574-1594. 10.1002/joc.1791.

ESPINOZA J. C. *et al.*, 2022 – The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes*. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>.

GUTIERREZ-CORI O. *et al.*, 2021 – On the hydroclimate-vegetation relationship in the southwestern Amazon during the 2000-2019 period. *Frontiers in Water*, 3 : 18.

SIERRA J. P. *et al.*, 2021 – Deforestation Impacts on Amazon-Andes Hydroclimatic Connectivity. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007>

---

### Participaram das pesquisas

Josyane Ronchail (Universidade Paris Sorbonne), Jhan Carlo Espinoza Molinier (IRD), Gérard Cochonneau (IRD), Jean-Loup Guyot (IRD), Michel Molinier (IRD?), Valdemar Guimarães (aposentado, a ser modificado), Eurides de Oliveira (aposentado), Naziano Filizola (UFAM), Juan-Julio Ordenez (Senamhi, Peru), Luis Noriega (Senamhi, Peru), Jorge Molina-Carpio (UMSA), Rodrigo Pombosa (Senamhi, Peru), Henry Romero (INAMHI, Equador), Clémentine Junquas (Universidade de Grenoble-Alpes), Philippe Vauchel (aposentado), Waldo Lavado (Senamhi, Peru), Guillaume Drapeau (IRD), Steven Chavez (doutorando), Ken Takahashi (IGP), José Marengo (INPE), Hans Segura (Instituto Max Planck de Meteorologia), Omar Gutierrez-Cori (Universidade de Sorbonne), Laurent Li, (Universidade de Sorbonne), Sly Wongchuig-Correa, (Universidade de Grenoble- Alpes), Juan Pedro Sierra (Universidade de Grenoble-Alpes), Paola-Aandrea Arias (Grupo de Engenharia e Gestão Ambiental [Giga], Universidade de Antioquia, Medellín, Colômbia).



PARTE 3

O cupuí, *Theobroma subincanum*, é cultivado nas roças do Médio Rio Negro.

POVOS  
INDÍGENAS,  
POPULAÇÕES LOCAIS  
E O ECOSISTEMA





## PARTE 3



A Amazônia brasileira, como toda a Bacia Amazônica, é marcada por uma grande diversidade cultural: povos ameríndios e comunidades locais desenvolveram modos de vida que dependem de uma ampla gama de recursos naturais e culturais de um dos mais diversos biomas do planeta. A região tem mais de 180 povos indígenas, representados por mais de 440.000 falantes de mais de 162 línguas pertencentes a 24 famílias linguísticas, mais 12 línguas isoladas. Dessas 162 línguas, 12 são faladas por menos de 20 falantes. Há também diversas comunidades locais, com mais de 1.000 comunidades quilombolas, incluindo produtores de borracha e piaçava, catadores de nozes, quebradeiras de babaçu, pescadores, etc.; cada uma dessas comunidades tem seu próprio sistema de uso dos ecossistemas florestais.

Durante muito tempo considerada como a última fronteira da colonização, a Amazônia brasileira é o local de complexas dinâmicas sociais, culturais e econômicas, que se refletem na crescente degradação do ecossistema, que está se tornando cada vez mais visível tanto no âmbito local quanto internacional. A região é também um espaço de luta pelo reconhecimento dos territórios e dos direitos coletivos dos povos indígenas e das comunidades locais. Sistemas florestais e agroprodutivos insustentáveis, tais como agricultura industrial e pesca, desmatamento ilegal ou outras formas de degradação ambiental, tais como mineração, associadas à infraestrutura como estradas e barragens estão se expandindo rapidamente. Levam a uma feroz competição territorial e econômica com uma multiplicidade de outros sistemas de produção sustentáveis, tanto tradicionais, enraizados no tempo, quanto mais recentes, ligados às correntes agroecológicas e agroflorestais, que são as portadoras de inovações socioecológicas. A Amazônia também está passando por um processo de urbanização acelerada e desordenada, que cria mercados e gera novas pressões sobre os recursos florestais.

Desde os primeiros estudos realizados em 1983, o IRD e seus parceiros têm trabalhado para entender estas questões sociais, territoriais e econômicas na Amazônia. Hoje, suas pesquisas estão cada vez mais focadas na ciência da sustentabilidade. Promovem abordagens interdisciplinares, em construção compartilhada com as partes interessadas e com a vontade de apoiar a implementação de políticas públicas que permitam uma coexistência não conflituosa entre o homem e a biodiversidade, uma governança compartilhada deste complexo florestal com as populações locais e que considerem a urgência da situação.



13

## Um observatório socioambiental na Amazônia, o INCT Odisseia

Atualmente, não são as mudanças climáticas que os habitantes das várzeas mais temem, mas sim as atividades de mineração ou o desenvolvimento da pesca industrial, que ameaçam seu território, suas condições de vida e reforçam sua precariedade.

### Contexto

Na segunda metade do século XX, impulsionada por enormes investimentos públicos no desenvolvimento econômico, a Amazônia tornou-se uma das maiores regiões agropecuárias do Brasil, produzindo cereais, soja e gado. É também uma região que atrai a mineração e tem grande potencial para a hidroeletricidade. Este desenvolvimento está ocorrendo em detrimento dos ecossistemas florestais e da biodiversidade, com mudanças significativas na cobertura e uso do solo, uma urbanização acelerada mas com falta de infraestrutura de saneamento, e a construção de várias grandes e pequenas estações hidrelétricas. Para a maioria dos 20 milhões de habitantes, a injustiça social e a insegurança estão aumentando. As populações envolvidas em atividades rurais estão particularmente expostas a este novo contexto devido à sua dependência das condições hidroclimáticas e ambientais. A influência do desmatamento no clima local ainda é debatida, mas várias mudanças na distribuição sazonal das chuvas e dos fluxos fluviais são observadas nas áreas mais desmatadas da Amazônia; as pessoas também estão cientes das mudanças, como o aumento da temperatura e a redução da neblina matinal. Os danos aos ecossistemas de água doce ameaçam sua segurança alimentar ao reduzir a produtividade do peixe, sendo que o consumo de peixe pelas populações ribeirinhas é a principal fonte de proteína animal. Além dessas pressões ambientais, existem pressões socioeconômicas exercidas por grandes empresas agrícolas e mineiras, que, em nome do progresso, estão monopolizando a terra, forçando as populações a migrarem principalmente para as periferias das grandes cidades, onde se sentem desprovidas e abandonadas pelas autoridades.



Um pescador e seu filho na várzea Grande em Curuai.

Diante desta observação, as equipes franco-brasileiras que há muito tempo estão envolvidas em estudos ambientais ou sociais na Amazônia, particularmente dentro do laboratório internacional conjunto 'Observatório de Mudanças Ambientais' (OCE) (IRD/UnB), mas também dentro do dispositivo de pesquisa e formação em parceria (dP) Amazônia do CIRAD, propuseram a implementação do Observatório Odisseia (Observatório de Dinâmicas Socioambientais: sustentabilidade e adaptação às mudanças climáticas, ambientais e demográficas), cujo principal objetivo é apoiar as populações mais vulneráveis em suas transições socioeconômicas, fortalecendo sua capacidade de reagir às pressões ambientais e sociais.

### Como fazemos isso?

É cada vez mais conhecido que, diante das questões socioambientais, é importante divulgar, valorizar e, sobretudo, integrar melhor os conhecimentos produzidos no processo decisório. É em torno do desafio de produzir conhecimentos que possam ser mobilizados nas estratégias de ação territorial das partes interessadas que as equipes franco-brasileiras se mobilizaram para propor o Observatório Odisseia. O formato "observatório", por fazer parte de um período de médio a longo prazo, nos permitiria conduzir nossas pesquisas de acordo com um certo número de princípios, para desenvolver uma ou várias estruturas conceituais e metodológicas.

Aproximar ciência e sociedade como pré-requisito para acompanhar as transformações motivou o surgimento, nos últimos anos, de observatórios nos quais o cidadão (ou comunidade), os tomadores de decisão e as organizações da sociedade civil participam da construção compartilhada de conhecimento e a coprodução de dados para torná-los mais facilmente mobilizáveis em

### PARCEIROS

Universidade de Brasília,  
Centro de Desenvolvimento  
Sustentável (UnB/CDS), Brasil

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
(INPE), Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
(UFRJ), Brasil

ONG Sapopema, Brasil

estratégias de ação. É neste contexto que propusemos o desenvolvimento do Observatório Odisséia, no qual desejamos tornar a pesquisa mais inclusiva possível, em que as partes interessadas definem os objetivos com os pesquisadores e participem da coleta, análise e divulgação dos resultados. O objetivo é estabelecer uma relação de confiança suficientemente forte para limitar ao máximo a assimetria entre os participantes, e assim permitir a integração dos conhecimentos locais e acadêmicos, assim como a apropriação dos dados e conhecimentos produzidos. Nosso posicionamento não é neutro no âmbito do observatório, uma vez que somos movidos pelo ideal de justiça socioambiental, e isto se reflete na escolha dos atores com os quais desejamos trabalhar e apoiar em suas estratégias de ação. No entanto, permanecemos imparciais, mantendo protocolos criteriosos de pesquisa

O trabalho focado no local piloto de Santarém ilustra a pesquisa realizada no âmbito do observatório. Ela tem como alvo dois grupos: por um lado, as populações que vivem ao longo das planícies inundáveis, com, como estudo de caso, a várzea do Lago Grande de Curuai, uma vasta planície inundável na região de Santarém, cujas atividades agrícolas, pecuárias e pesqueiras estão sendo perturbadas pelas mudanças climáticas e pressões socioeconômicas exercidas pela pesca industrial e as grandes fazendas de gado; por outro lado, os agricultores familiares da região do Planalto de Santarém, que se deparam diariamente com o avanço da soja em seu território.

As populações rurais de Curuai são, em sua maioria, poliativas, com gado, pesca e agricultura. A pesca é essencial para atender às necessidades de proteína animal e é praticada de forma artesanal ou apenas para atender às necessidades familiares. A agricultura, essencialmente cultivos alimentícios e produção de mandioca, é praticada nos diques das terras baixas e nas terras secas adjacentes. A criação extensiva de gado, que começou nos anos 1950, ainda representa cerca de 10% da pecuária no Pará; formas mais intensivas e economicamente lucrativas estão sendo desenvolvidas em pastagens cultivadas, principalmente na região sudoeste do estado. As pastagens naturais em áreas propensas a inundações têm boas características nutricionais, que compensam parcialmente a necessidade de deslocar o gado para terra seca durante as águas altas. Nas últimas duas décadas, o pasto natural tem sido limitado pelo aumento da frequência de altas inundações, levando os agricultores a abrir novas áreas de pastagem em terras secas para aumentar as reservas de pasto. Iniciamos um processo de pesquisa para entender como essas populações locais modificam suas estratégias de vida diante das mudanças climáticas e dos conflitos socioambientais. Desta forma, procuramos avaliar estratégias de adaptação com elas e discutir e pesquisar práticas que minimizem os impactos ambientais e maximizem sua capacidade de produzir os bens necessários para sua subsistência.

Estabelecemos primeiramente uma parceria com o Sindicato dos Agricultores de Santarém (STTR), a Feagle (Federação das Associações de Agricultores) e comunidades do projeto de assentamento agroextrativista Lago Grande [PAE], cujo presidente acompanhou nossas atividades. O Projeto de Assentamento Agroextrativista Lago Grande de Curuai (PAE Lago Grande), criado em 2005 pelo INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), abrange aproximadamente 290.000 ha,

cobrindo grande parte desta região, e inclui 154 comunidades, cada uma composta de 10 a 100 famílias. A Federação das Associações e Comunidades de Moradores do PAE Lago Grande (Feagle) foi criada como uma forma de organização e representação social das comunidades. O STTR é um sindicato particularmente ativo, representando cerca de 30.000 famílias. O PAE Lago Grande estabelece uma regulamentação coletiva do uso da terra e dos recursos. Lagos, florestas e pastagens naturais são considerados propriedade comum dos moradores. Entretanto, as grandes fazendas de pecuária estão espalhadas por toda a área: ocupam a planície de inundação e também se estendem para a área de terra seca. Considerados como propriedade privada, invadem majoritariamente o território das comunidades. Apesar da condição legal do PAE Lago Grande, os direitos associados à propriedade coletiva da terra ainda não são reconhecidos por alguns residentes, tornando ainda mais complexo resistir a muitas pressões, tais como demandas de mineração, agronegócios, atividades de pesca industrial, ocupação desordenada ou desmatamento.

Para interagir com os residentes, usamos a abordagem The Companion Modelling approach (ComMod). O modelo é desenvolvido através da construção compartilhada de um Role-playing game (RPG) ou dramatização no qual os atores desempenham seu próprio papel. As regras do jogo (dinâmica ambiental e social) integram o conhecimento dos pesquisadores e dos atores, sendo estes últimos coletados durante entrevistas, atividades participativas (mapeamento, calendário de atividades agrícolas e ambientais, entrevistas, teatro fórum, etc.) e dos debates que acompanham sistematicamente as sessões do jogo. O processo de construção e as próprias sessões do jogo são momentos de discussão que permitem a todos compartilhar seus conhecimentos, vislumbrar os diferentes pontos de vista sobre o recurso a ser compartilhado e, em suma, chegar a uma visão coletiva da gestão sustentável do território.

Em um projeto anterior, entre 2013 e 2015, definimos quatro comunidades representativas da dinâmica social ao longo de um transecto desde a planície de inundação até a terra firme. Para desenvolver o jogo, nós também estabelecemos uma parceria com a escola Casa Familiar de Curuai (CFR) (uma escola de ensino médio que oferece cursos em alternância para jovens adultos de comunidades locais sobre práticas agrícolas mais sustentáveis). O jogo e o modelo, chamado Várzea Viva, se concentrava em atividades pecuárias e agrícolas, com a pesca não sendo detalhada. Em Várzea Viva, de acordo com a comunidade a que pertencem, conforme definido pelo jogo, os jogadores possuem uma propriedade que devem desenvolver em interação com outros (aluguel de mão-de-obra, aluguel de pastagens) escolhendo entre quatro atividades, cultivo de mandioca e/ou abertura de pastagens, desenvolvimento de um sistema agroflorestal, criação de gado e pesca. O jogo é então transformado em um modelo multiagente interativo, a fim de explorar cenários mais longos e representar melhor a dinâmica social e natural; o sistema é interativo porque o sistema multiagente não é autônomo, mas depende das decisões tomadas pelos jogadores durante a simulação. Para aprofundar a questão da gestão sustentável da pesca, que foi repetidamente levantada pelos moradores daquela época, além da Feagle e do STTR, desde 2019 estabelecemos uma parceria com os sindicatos de agricultores e pescadores (colônias) dos distritos de Santarém, Óbidos e



Pecuária em pequena escala (porcos, galinhas, etc.) durante a seca, nas planícies de inundação do lago do Curuai.





Ciência participativa para a pesca, Brasil.

Jurutí, dos quais dependem todas as comunidades da planície, e o Mopebam (Movimento dos Pescadores do Baixo Amazonas).

Estamos trabalhando em parceria com a ONG Sapopema, que trabalha há muitos anos para a gestão sustentável da pesca em articulação entre os representantes dos pescadores artesanais e os órgãos governamentais do Estado do Pará e do Estado Federal. Este grupo tem se reunido mensalmente desde outubro de 2021 para desenvolver o jogo Pesca Viva, destacando as atividades de pesca na região, e um acordo de parceria definindo os objetivos e as modalidades de participação na pesquisa foi assinado. Também estamos envolvendo outros grupos no desenvolvimento, comunidades na região de Curuai e um grupo de jovens da Feagle, os "guardiões da boa vida". O Pesca Viva envolve pescadores de comunidades que compartilham o mesmo recurso pesqueiro, cujo estoque está preocupante. Estes atores veem o desenvolvimento do jogo e os debates que ele provoca como uma forma de trabalhar com os acordos comunitários de pesca, que deverão ser revisados na região após o decreto estatal emitido em 2021, e como uma oportunidade de construir a capacidade de governança dos jovens que estarão envolvidos.

### Os primeiros resultados

Durante as discussões que se seguiram às sessões de jogo, os residentes enfatizaram repetidamente vários pontos:

- a dificuldade de manter os rebanhos, uma vez que a taxa atual de inundação limita o uso de pastos naturais e força a abertura de novos pastos em áreas de terra firme, ou alugá-las, o que gera um custo em relação aos ganhos esperados da atividade;
- a renda incerta do cultivo da mandioca, pois está ligada às flutuações do preço da farinha de mandioca, além da necessidade de mão-de-obra e de terra (o ciclo de seu cultivo na mesma parcela é limitado a alguns anos)

e o impacto dos grandes rebanhos de gado dos fazendeiros sobre a qualidade dos cursos d'água e sobre sua estiagem se forem criados pastos nas margens;

– a diminuição do estoque de peixes, atribuída principalmente à pesca industrial, mas também às planícies pisoteadas pelo gado e à degradação dos cursos d'água.

Nossos resultados mostram que, no final, não é tanto pela mudança climática que os habitantes das várzeas se sentem desamparados no momento, mas sim pelas atividades de mineração ou o desenvolvimento da pesca industrial que ameaçam seu território, suas condições de vida e exacerbam sua precariedade.

O planalto de Santarém, com solos adequados para o cultivo de cereais, tem visto o rápido desenvolvimento das monoculturas de soja nos últimos vinte anos, com o apoio de políticas públicas. Como em outras regiões do Brasil, o avanço da soja na região tem resultado no uso extensivo de pesticidas, cujos impactos sobre os habitantes são ignorados. O avanço da soja na região também está levando ao desaparecimento de várias comunidades de agricultores familiares, seja porque a terra é tomada pelos agricultores de cereais por intimidação, seja porque o impacto dos pesticidas sobre as plantações é tal que a terra tem que ser abandonada. A maioria da população deslocada vive na periferia de Santarém e, na maioria dos casos, desempregada.

Ao contrário da pesquisa realizada na região da várzea, onde nos aproximamos das partes interessadas após a obtenção do financiamento do projeto, levando-nos a reajustar e reformular os objetivos com eles posteriormente, aqui o primeiro passo do processo foi entender quais eram as expectativas das partes interessadas em relação à pesquisa que poderia ser realizada e assim definir os eixos de pesquisa. Com base nas relações de vários membros da equipe com o STTR e os sindicatos dos municípios de Belterra e Mojuí dos Campos, a pesquisa foi realizada com estes atores em várias oficinas para expressar coletivamente os principais desafios da região e, a partir deste inventário e das habilidades disponíveis na equipe de pesquisa, definir o roteiro. Três temas emergiram: insegurança na terra, pesticidas e agroecologia. Os sindicatos pediram dados a serem adquiridos para quantificar a produção da agricultura familiar, suas práticas e o impacto percebido dos pesticidas. Outro pedido era que os jovens agricultores fossem capacitados através de sua participação em pesquisas. Este roteiro foi formalmente validado pela assinatura de um acordo de cooperação entre o INCT Odisseia e os representantes dos sindicatos de trabalhadores rurais de três municípios, Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos, que formam a região do Planalto de Santarém. Toda a abordagem metodológica foi desenvolvida coletivamente. A organização da coleta de dados originou-se de uma oficina de zoneamento participativo, que identificou três regiões principais, uma onde a soja é dominante, uma onde a agricultura familiar persiste em meio à soja e a última onde a agricultura familiar é dominante, mas a soja está crescendo. Os jovens e os representantes sindicais foram envolvidos no desenho do questionário, que foi registrado em um smartphone através do aplicativo KoBoToolbox.. Este aplicativo gratuito para smartphone, desenvolvido pela Universidade de Harvard, é usado para desenvolver questionários e coletar dados ([www.kobotoolbox.org](http://www.kobotoolbox.org)). Os jovens agricultores, apoiados por dois pesquisadores sediados em Santarém, conduziram as entrevistas e

coletaram as respostas ao questionário de 544 domicílios (2.143 pessoas), participaram das etapas de análise enriquecendo os dados do questionário com os depoimentos que haviam coletado e finalmente divulgaram os resultados às comunidades.

Com relação ao impacto dos pesticidas na agricultura familiar, a pesquisa permitiu que os representantes dos sindicatos e os residentes se reconhecessem coletivamente como vítimas, uma vez que suas dificuldades (por exemplo, invasão por insetos, seca das colheitas) e possivelmente seus problemas de saúde (dores de cabeça, náuseas, doenças crônicas) não eram casos isolados. Os resultados foram apresentados a várias instituições locais e permitiram aos sindicatos organizar um seminário sobre as perspectivas de consolidação da agricultura familiar no Planalto de Santarém. Os resultados também foram apresentados ao Fórum Permanente de Controle de Pesticidas, com a intenção de discutir ações concretas a serem tomadas. Nessas ocasiões, estiveram presentes defensores públicos do Estado do Pará, representantes de ONGs e instituições de apoio técnico. No entanto, embora o Fórum visasse proporcionar um espaço de debate e propostas de ação quando foi criado em 2017, esta arena de discussão está agora bloqueada. De fato, o apoio político ao agronegócio no território de Santarém é tal que não é mais possível discutir os impactos dos pesticidas, e muito menos desde a chegada ao poder de Jair Bolsonaro, que dá seu apoio incondicional ao agronegócio e desconstrói meticulosamente todas as políticas de apoio à agricultura familiar e ao meio ambiente. Para serem mais eficazes, os sindicatos preferiram se concentrar na agricultura orgânica, abordando o problema dos pesticidas de forma contornada, sem dar muita visibilidade a ela. Entretanto, a ONG Terra de Direitos agiu com base nos dados coletados para incriminar a multinacional Cargill, proprietária do porto de exportação de soja em Santarém, como responsável pelos danos criados pela soja no território.

### Em conclusão

Para aumentar o impacto de nossas pesquisas sobre as populações locais e junto delas, há muitos desafios. Um dos principais é fortalecer o vínculo deste trabalho com as autoridades públicas. No caso da pesca, e graças à nossa parceria com a ONG Sapopema, mas também porque nossas atividades estão perfeitamente sincronizadas com a agenda de revisão dos acordos de pesca pelos interessados, esta articulação está em andamento, e estamos planejando incluir representantes das autoridades do estado do Pará responsáveis pelo meio ambiente. Outra ação importante é poder trazer os grandes agricultores para um processo de negociação com os agricultores familiares e os pescadores artesanais. No caso da pesca, só o faremos se os atores com os quais trabalhamos estiverem interessados, pois são possíveis acordos vantajosos para ambas as partes. O exemplo da gestão do Pirarucu (Arapaima) no Estado do Amazonas, onde pescadores industriais e artesanais pactuaram acordos de conservação que funcionam bem, é concludente. No caso da soja, e no contexto político atual no Brasil, este desafio é, infelizmente, extremamente complexo. Representantes de sindicatos de agricultores, alguns dos quais receberam ameaças de morte, preferem se mobilizar para mostrar a importância da agricultura familiar para a segurança alimentar e a criação de empregos nas áreas rurais. Esta mobilização

pode, por exemplo, levar à criação de uma lei municipal para a criação de "zonas pesticidas-zero", mas não irá, pelo menos por enquanto, elevar o perfil do incômodo causado pela soja e pela poluição associada.



Grupo fotografado após a oficina sobre o jogo sério Pesca Viva na comunidade pesqueira de Curuai

### Para mais informações

BOMMEL P. *et al.*, s.d. – Livelihoods of Local Communities in an Amazonian Floodplain Coping with Global Changes. In : Sauvage S., Sánchez-Pérez J. M., Rizzoli A. (eds), *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 8th International Congress on Environmental Modelling and Software*, Toulouse, <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2016-proceedings>

CHAPUIS K. *et al.*, s.d. – Support Local Empowerment Using Various Modeling Approaches and Model Purposes: A Practical and Theoretical Point of View. In : Czupryna M., Kamiński B. (eds), *Advances in Social Simulation*. Springer Proceedings in Complexity. Springer, Cham., [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92843-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92843-8_7)

COUDEL É., 2021 – Rendre visible les impacts des pesticides du soja : contributions et limites d'un observatoire de science citoyenne à Santarém, Amazonie brésilienne. *Vertigo*, 21 (3), <https://doi.org/10.4000/vertigo.33716>

### Participaram das pesquisas

Marie-Paule Bonnet (IRD), Beatriz Abreu dos Santos (UnB), Pierre Bommel (CIRAD), Vincent Bonnal (CIRAD), Joine Cariele (doctorado CDS/UnB), Kevin Chapuis (IRD), Émilie Coudel (CIRAD), Ricardo Folhes (Universidade Federal do Pará UFPA), Christophe Le Page (CIRAD), Denise Lima (Centro de Desenvolvimento Sustentável CDS/ UnB), Gustavo Melo (UFRJ), Txai Mitt Schwamborn (CDS/ UnB), Ione Nakamura (Ministério Público do Pará, Brasil), Neriane Nascimento da Hora (SAPOPEMA/post-doctorante CDS/UnB), Stéphanie Nasuti (UnB), Mariana Piva (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP), Valeria Fechinem (Centro de Estudos Avançados Multidisciplinares CEAM/ UnB), Gracivane Rodrigues de Moura (Sindicato dos Trabalhadores Rurais, Agricultores e Agricultores Familiares de Santarém STTR, Brasil), Carlos José Sousa Passos (CDS, UnB, Brasil), Danielle Wagner Silva (Universidade Federal do Oeste do Pará Ufopa, Brasil e Universidade de São Paulo, ESALQ/USP), os sindicatos de pesqueiros (Z20, Z 42 et Z19 de Santarém, Juruti et Obidos) e a FEAGLE.



14

## Reconfigurações dos padrões de vida e dinâmicas territoriais

Novos movimentos sociais rurais estão se afirmando através da valorização de identidades coletivas e reivindicam a apropriação dos espaços tradicionalmente ocupados, com a mudança da “luta pela terra” para a “luta pelos territórios”.

Isso reflete tanto a politização da relação identidade-território quanto a incorporação de questões de direito à diversidade de estilos de vida e formas de ocupação da terra.

### Contexto

Desde o final dos anos 1950, a Amazônia brasileira tem sofrido grandes movimentos de colonização. A população quadruplicou e atingiu 20 milhões de homens e mulheres em 2000, perturbando tanto a dinâmica das atividades quanto a paisagem. Embora o crescimento populacional tenha sido impulsionado principalmente pelas cidades amazônicas, foi a migração para as áreas rurais que polarizou a atenção, talvez por causa de sua associação com a construção de estradas favoráveis aos meios de comunicação “enfrentando a floresta” e grandes programas de colonização pública.

Os movimentos sociais e sindicais que foram estruturados na região durante as décadas de 1970-1990 desempenharam um papel fundamental na luta pela justiça fundiária. A questão da proteção ambiental rapidamente se tornou uma palavra de ordem comum; as identidades locais se tornaram instrumentos políticos. O foco mudou de reivindicações de terras para reivindicações de “territórios” e para a proteção do “patrimônio” natural e cultural.

Enquanto a reforma agrária ainda está em andamento, novas configurações de posse de terra foram surgindo, desafiando a propriedade convencional baseada na apropriação privada e individual. Ao mesmo tempo, os estilos de vida rurais estão sendo reconfigurados, integrando cada vez mais as atividades urbanas nas práticas residenciais e produtivas. A questão da terra foi assim



Frente de urbanização na Amazônia brasileira, 1988.

abordada de diferentes ângulos, que podem ser agrupados sob o tema amplo da “sustentabilidade territorial”.

### A ocupação pioneira e a regularização fundiária militar

O início das pesquisas realizadas no IRD (então Orstom) sobre o tema amplo da “posse da terra” remonta à época em que a Amazônia brasileira era conhecida como a “última frente pioneira”, composta de terras livres e abundantes, levando as aspirações dos colonos, particularmente os do semiárido Nordeste. Assim, entre o final dos anos 1960 e 1980, as principais dinâmicas territoriais concentraram-se na margem ocidental da Amazônia, uma região hoje conhecida como o “Arco do Desmatamento”. Portanto, a interação das dinâmicas de assentamento, acesso à terra, urbanização e transformação das paisagens constitui o foco da atenção dos pesquisadores.

É importante lembrar o papel do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), cuja mediação foi fundamental para iniciar e sustentar a pesquisa nas ciências humanas e sociais durante a ditadura. De fato, a colonização da Amazônia, realizada através de políticas governamentais e propaganda, tem uma forte dimensão ideológica, a da “Marcha para o Ocidente”, da expansão e desenvolvimento nacional, que os pesquisadores

### PARCEIROS

Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável (UnB/CDS), Brasil

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Brasil

Centro de Estudos Avançados da Amazônia da Universidade Federal do Pará (NAEA/UFPA), Brasil

Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Brasil



do IRD/Orstom entenderam rapidamente. Em sua dimensão ideológica, a colonização deve oferecer aos migrantes a promoção vertical impossível em regiões econômica e sociologicamente estabilizadas. Ao prometer as mesmas oportunidades para todos na fronteira, o Estado defende um igualitarismo teórico que é uma expressão concreta da utopia pioneira. De fato, é através da “incorporação” das terras periféricas que se faz a promessa de garantir o “milagre econômico” de todo o país, de proporcionar acesso à terra aos pequenos produtores pobres do Nordeste e de garantir a segurança nacional contra ameaças externas e internas.

Gradualmente, à medida que a fronteira se estabiliza, geográfica e socialmente, os temas de pesquisa evoluem.

Durante os anos 1980 e 1990, os estudos reconstruíram as correntes migratórias e os padrões de assentamento dos colonos, e dividiram o mecanismo de ocupação em duas grandes ondas. O primeiro período é o de assentamento, de ocupação espontânea, caracterizado por uma alta densidade de pioneiros; em um segundo período, a instalação desses pioneiros permite melhorar as condições de acesso à área (abertura de estradas, primeiro desmatamento) e, como resultado, atrai especuladores e criadores mais capitalizados, que trazem em seu rastro uma grande onda de apropriação fraudulenta da terra e muitas vezes levam à expulsão dos ocupantes e a um acentuado processo de êxodo rural. Este processo de incorporação da terra no mercado fundiário leva inevitavelmente à concentração da terra, particularmente em conexão



Fabricação de cercas no Brasil.

com a consolidação de latifúndios e a instalação de grandes projetos de desenvolvimento (mineração, agro comércio).

Os pesquisadores também abordam corajosamente as experiências violentas das frentes pioneiras. O filme *La Terre et la Peine* (1997), de Frédéric Létang ([http://www.film-documentaire.fr/4D/DACTION/w\\_fiche\\_film/4347\\_1](http://www.film-documentaire.fr/4D/DACTION/w_fiche_film/4347_1)), descreve perfeitamente a violenta competição pela terra no coração da floresta e apresenta com precisão os atores nestes confrontos, todos legítimos de acordo com a lógica que os impulsiona.

A criação de uma lei de reforma agrária em 1964 (a Lei do Estatuto da Terra) e de instituições reguladoras (o Instituto Brasileiro de Reforma Agrária [IBRA] em 1964 e o Instituto Brasileiro de Colonização e Reforma Agrária [Incra] em 1970), responsáveis pela elaboração de um cadastro nacional de assentamentos rurais e pela administração de terras públicas, não impediu uma onda de conflitos e grilagens que se espalharam ao longo das margens da fronteira de ocupação, do leste do Pará ao norte do Acre, absorvendo o Estado de Rondônia no processo.

Poderes especiais foram dados aos militares para “pacificar a terra” no início dos anos 1980, mas apesar da concessão de muitos títulos, especialmente aos pequenos agricultores, as medidas desapontaram os ativistas da reforma agrária, que argumentaram que a regularização fundiária era vista como um elemento adicional no processo de mercantilização da terra e uma forma de porta traseira para reforçar o processo de apropriação de terras pelos empresários do Sul. Da mesma forma, a reforma agrária, embora declarada prioridade nacional em 1985, é contestada: um exíguo número de agricultores foi de fato instalado em projetos de reforma agrária na Amazônia em comparação com o número de candidatos a terras rurais no Brasil. Além disso, a ocupação da terra tinha que estar de acordo com os objetivos de modernização do setor rural que havia animado o governo militar desde que tomou o poder. Por exemplo, uma das condições para a concessão do título era que a principal atividade do terreno fosse a criação de gado, enquanto a produtividade do terreno era evidenciada por seu estado de desmatamento. Esta avaliação reflete a antiga tendência brasileira de procurar resolver a questão dos pequenos produtores sem incomodar as elites rurais estabelecidas nas áreas de ocupação mais antiga. Este texto não aborda a questão das terras indígenas e do deslocamento dos povos indígenas, o que exigiria um capítulo à parte. No entanto, isto não deve ocultar o fato de que o território em discussão esteve ocupado por muito tempo.

### Proteger conjuntamente a biodiversidade e a sociodiversidade

No início dos anos 1990, surgiram novos esquemas fundiários e ambientais que procuravam conciliar o acesso à terra com a proteção ambiental: por um lado, novos tipos de loteamentos de reforma agrária - projetos de desenvolvimento sustentável (PDS), projetos de assentamento extrativista (PAEx) - destinados a agricultores familiares; por outro lado, na categoria ampla de áreas protegidas, preferivelmente destinadas às populações tradicionais, além dos territórios ameríndios, as chamadas unidades de conservação de “uso sustentável” - reservas extrativistas (Resex), regiões de desenvolvimento sustentável (RDS) - e os territórios quilombolas



Cartaz promovendo o modelo alimentar nacional na base de arroz e feijão, enquanto o peixe e a farinha de mandioca estão na base da alimentação na Amazônia.





Transporte até o local da comercialização das fibras de piaçava (*Leopoldinia piassaba*) coletadas na floresta, Rio Negro.

(ocupados por afrodescendentes). Muitos dos habitantes desses territórios na Amazônia profunda, coletores de castanhas-do-pará, os seringueiros, as quebradeiras de babaçu, que vivem ao longo das várzeas, ainda são frequentemente vítimas de figuras de autoridades locais que justificam seu domínio por direitos de propriedade que são muitas vezes fictícios. É a estes grupos sociais que se dirigem estas medidas, que se traduzem numa extensão dos direitos territoriais para as populações rurais, nomeadamente através do reconhecimento legal do termo “povos tradicionais”. Essas “políticas da diferença” possibilitam o surgimento de novas modalidades de transferência de terras, notadamente através do usufruto ou da propriedade coletiva, mas também rompem com o paradigma que separa a “natureza” da “cultura” que prevalecia até então nas estruturas de proteção ambiental. Estes novos arranjos são apresentados como ferramentas operacionais para o desenvolvimento sustentável e prometem conciliar os três pilares, combinando a preservação ambiental com o reconhecimento cultural, social e econômico das populações tradicionais, garantindo ao mesmo tempo sua segurança econômica.

Assim, ao interessar-se por essas novas possibilidades de proteção da biodiversidade e da sociodiversidade, um maior número de pesquisadores e disciplinas se envolveu indiretamente na questão fundiária, o que possibilitou, por um lado, ampliar o debate para toda a Amazônia, incluindo áreas isoladas, e, por outro lado, envolver um maior número de grupos sociais, populações tradicionais e povos ameríndios.

Em particular, o debate adquiriu novos contornos políticos com a consolidação de novos movimentos sociais rurais, que se afirmaram através da valorização das identidades coletivas e reivindicaram a apropriação de espaços tradicionalmente ocupados. O trabalho destaca assim a mudança da “luta pela terra” para a “luta pelos territórios”. Mais do que apenas minuciosidade semântica, esta fórmula reflete tanto a politização da relação identidade-território através da projeção de marcadores culturais no espaço, quanto a incorporação de questões de direito à diversidade de padrões de vida e formas de ocupação da terra.

Vale ressaltar a força da proposta mostrada durante este período pelos movimentos sociais, que exigiram novos modos de governança de recursos (por exemplo, os “acordos de pesca” nas planícies de inundação), bem como novas configurações territoriais. O exemplo mais conhecido é a “reserva extrativista”, um arranjo ambiental cuja origem é altamente carregada socialmente e marcada pela luta política. Este modelo é caracterizado por um retorno à propriedade federal da terra e apropriação coletiva, obtida pelos habitantes em troca da aceitação da “responsabilidade ambiental”. Foi proposto pelo movimento dos seringueiros. Baseia-se em particular na valorização de uma forma diferenciada de relação com os recursos naturais, “extrativismo”, termo adaptado do termo lusitano. O conceito abrange todos os sistemas de exploração de produtos florestais, desde que integrados a uma economia de mercado no âmbito regional, nacional ou internacional. Ela difere da coleta, que é reservada aos recursos destinados ao consumo familiar ou ao intercâmbio local.



Loja de tecidos na cidade de Tefe, Amazonas, Brasil.

Nos anos 2000, diante dos persistentes bloqueios de terra e da falta de vontade política para regularizar as terras tradicionalmente ocupadas, surgiram estratégias alternativas como um contraponto que buscavam proteger recursos e práticas independentemente do acesso à terra ou das políticas ambientais. Vários projetos de pesquisa estão examinando o potencial de instrumentos de “patrimonialização” no processo de construção de territórios. Este mecanismo inovador consiste em proteger os recursos naturais e cultivados, registrando todo o sistema de produção como patrimônio nacional. Ela se baseia no princípio da interdependência entre diversidade biológica e cultural; a implementação do know-how que sustenta os sistemas agrícolas ou extrativos depende, portanto, da proteção cruzada de estilos de vida, práticas espirituais e territórios. Em 2010, o Instituto Brasileiro do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) registrou o sistema agrícola tradicional do Rio Negro, compartilhado por 22 povos ameríndios, como patrimônio cultural da nação. Foi o primeiro sistema agrícola a ser reconhecido como tal. Merece destaque o engajamento do projeto científico franco-brasileiro “Pessoas, Agrobiodiversidade e Conhecimento Tradicional Associado” (Pacta, 2005-2019) neste processo, bem como na parceria de pesquisa participativa implementada, envolvendo associações ameríndias locais, ONGs, instituições públicas e pesquisadores.

O tema da agrobiodiversidade encontra outro ponto de interseção com a questão da dinâmica territorial através do estudo dos fenômenos de circulação. O trabalho de Eloy e Emperaire (2011) reintroduz a dimensão urbana, que é central para entender os novos padrões de mobilidade dos indivíduos e famílias rurais da Amazônia, muito além do êxodo rural convencional. A análise dos fenômenos de multi-residência das populações ameríndias mostrou a intensidade das práticas de circulação entre as áreas rurais e urbanas (caso dos Quilombolas de Trombetas). Este trabalho mostra que a cidade é uma característica essencial das estratégias residenciais e produtivas das populações rurais da Amazônia, que são compartilhadas por toda a região, mesmo em locais isolados. Também é importante para entender que a mobilidade não é contraditória à atribuição de direitos de terra às populações rurais e tradicionais.

A reconfiguração dos estilos de vida rurais da Amazônia é um tema central para a compreensão das dinâmicas territoriais da Amazônia contemporânea. Um passo nessa direção foi dado no âmbito do programa de pesquisa Duramaz (2007-2014). Tomando literalmente a ideia de que a Amazônia poderia ser um "laboratório de desenvolvimento sustentável", o projeto estabeleceu um protocolo comparativo, no tempo e no espaço, procurando esclarecer vários aspectos da "sustentabilidade dos territórios": o papel das políticas públicas, usos da biodiversidade, gestão comunitária, mudança climática, mudanças nos sistemas de produção e alimentação, e novas dinâmicas de assentamento

### Conclusão

O modelo de desenvolvimento da Amazônia que justificou a abertura da fronteira nos anos 60 está agora sendo revitalizado. Novas rotas de penetração, especialmente ferrovias, estão sendo construídas para transportar minério; portos estão sendo construídos para transportar soja, que está avançando para os territórios da agricultura familiar; e infraestruturas para a instalação de linhas elétricas são todas novas ameaças aos territórios frágeis. As políticas públicas se concentram nas grandes propriedades (Cadastro Ambiental Rural, Projeto Terra Legal Amazônia) como ferramentas para a regularização fundiária.

A Amazônia legal, que cobre mais de 5 milhões de quilômetros quadrados, viu uma diminuição na área florestal de mais de 10.000 km<sup>2</sup> por ano nos últimos 40 anos, com exceção de uma pausa no período de 2009-2015 (ver Capítulo 3). O papel dos modelos alternativos de posse na proteção do bioma é essencial para evitar o desmatamento acelerado, como é atualmente o caso.

Entretanto, existe a necessidade de os gerentes adotarem novas ferramentas e técnicas para monitorar recursos e mapear territórios. Cada vez mais, universidades e ONGs estão se envolvendo neste processo; movimentos sociais estão se mobilizando (redes sociais, denunciando empresas que adquirem produtos de florestas superexploradas). Novas ferramentas de colaboração estão surgindo. Um exemplo disso é a MapBiomas, uma rede colaborativa de ONGs, universidades e startups de tecnologia. O projeto torna a visualização da conversão da terra acessível para todos. Produz um mapeamento anual da cobertura e uso do solo desde 1985,

valida e relata todos os eventos de desmatamento detectados no Brasil desde janeiro de 2019 e monitora as águas superficiais e as cicatrizes dos incêndios mensalmente desde 1985 (Mapbiomas Brasil). Finalmente, o paradigma da sustentabilidade, que inclui a valorização da diversidade e a exigência de maior autonomia na governança e na gestão comunitária, está caminhando na mesma direção.

---

### Para mais informações

ELOY L., EMPERAIRE L., 2011 – La circulation de l'agrobiodiversité sur les fronts pionniers d'Amazonie (région de Cruzeiro do Sul, état de l'Acre, Brésil). *L'Espace géographique*, 40 (1) : 62-74.

NASUTI S. et al., 2013 –, La construction de territoires multisitués en Amazonie. Le cas des Quilombolas du Trombetas (Pará, Brésil). *L'Espace géographique*, 4 (42) : 324-339.

NASUTI S. et al., 2014 – Régularisation foncière et mobilités rurales-urbaines en Amazonie brésilienne. *Espace populations sociétés*, 2 (3) : <http://journals.openedition.org/eps/5789> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/eps.5789>

---

### Participaram das pesquisas

Stéphanie Nasuti (UnB), Philippe Lena (IRD), Ricardo Folhes (UFPA), Laure Emperaire (IRD), Catherine Aubertin (IRD), Martine Droulers (CNRS), François-Michel Le Tourneau (CNRS).



15

## Plantas cultivadas: produção e conservação da diversidade

Surpreendentemente, é apenas recentemente que a biodiversidade associada à agricultura tradicional (agrobiodiversidade) está começando a ser visível no cenário político e biológico da conservação, enquanto a biodiversidade florestal, que é considerada espontânea, tem sido o foco de muitas pesquisas.

### PARCEIROS

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil

Instituto Socioambiental (ISA), Brasil

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasil

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), Brasil

Fundação Joaquim Nabuco (FUNDAJ), Brasil

Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), Brasil

Instituto Nacional do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), Brasil

Ministério Público do Distrito Federal e Territórios (MPDFT), Brasil

### Contexto

Os ecossistemas amazônicos como os conhecemos hoje são o resultado de uma complexa história de processos ecológicos e de manejo humano. É nessa interface que se situam as pesquisas do programa Pacta (Populações, agrobiodiversidade e conhecimentos tradicionais associados) coordenado pela Universidade estadual de Campinas (Unicamp) e o IRD entre 2005 e 2019 em vários contextos geográficos e culturais. Seu objetivo é compreender as dinâmicas socioculturais associadas a um compartimento pouco estudado da biodiversidade, o da agrobiodiversidade, entendida aqui como a diversidade das plantas cultivadas. O Pacta está alinhado com outras pesquisas que destacam os laços estreitos entre as atividades agrícolas e florestais.

Surpreendentemente, é apenas recentemente que a biodiversidade associada às agriculturas tradicionais começa a ser visível no cenário político e no campo da biologia da conservação, enquanto a biodiversidade florestal, considerada espontânea, tem sido o foco de muitas pesquisas. No entanto, trabalhos recentes em arqueobotânica e ecologia histórica mostram que as dicotomias entre “cultivado/espontâneo” e “silvestre/domesticado” exigem uma abordagem matizada e que não correspondem necessariamente a campos disciplinares como agronomia, silvicultura ou ecologia os definiriam. As práticas, conhecimentos e normas na base dessa diversidade biológica construída permitem múltiplas imbricações e sobreposições entre os polos mencionados.



Canas, caju, carás e abacaxi coletados numa roça do médio Rio Negro.

A história da agricultura tradicional não é a de uma sucessão de etapas baseadas em uma visão linear das práticas agrícolas, mas uma de ajustes contínuos entre contextos sociopolíticos e ecológicos, práticas sociais e técnicas, e escolhas culturais. Três exemplos de registros de dados destacam este entrelaçamento. O que é considerado o maior complexo florestal do mundo, visto como não alterado pela ação humana, resulta de múltiplas ações antrópicas ao longo do tempo. Um primeiro indicador disto é a presença de agregados de espécies domesticadas nos arredores de sítios arqueológicos, que resultam provavelmente de um enriquecimento voluntário da floresta em espécies úteis. O segundo elemento é o da presença das férteis terras pretas de origem indígena. Ricas em nutrientes, podem cobrir dezenas de hectares e são com frequência associadas a vestígios arqueológicos. O mais antigo desses sítios está situado no Alto Madeira e foi datado de 3.500 anos Antes da Era Comum (AEC). No entanto, a ocupação da maioria destas terras data do início da nossa era e, às vezes prossegue até hoje. Finalmente, os vestígios arqueobotânicos mostram que, além das primeiras colheitas

### PARCEIROS

Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Brasil

Universidade Federal de Roraima (UFRR), Brasil

Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

Federação das Organizações Indígenas do Rio Negro (FOIRN), Brasil

Associação das Comunidades Indígenas do Médio Rio Negro (ACIMRN), Brasil





A queima controlada é uma etapa fundamental da agricultura tradicional na Amazônia (Rio Negro).

tal como a mandioca ou ariá (*Calathea* sp.) no início do Holoceno, há cerca de 10.000 anos, muitas outras espécies não cultivadas compunham dietas variadas e que a diversidade de recursos durante este período aumentou consideravelmente. Esses conjuntos de espécies, cultivadas ou florestais, são índices de práticas ligadas a uma agricultura de corte e queima integradas no funcionamento do ecossistema florestal e, portanto, apontam para práticas sustentáveis que não impactaram com violência as paisagens amazônicas.

A agrobiodiversidade, como abordada no programa Pacta, foi apenas um dos fios condutores de um questionamento mais amplo, que indagava sobre o futuro de agriculturas historicamente marginalizadas em termos técnicos, cognitivos, econômicos e territoriais. Estas são pensadas como uma entrave a um desenvolvimento agrícola fundamentado numa modernidade técnica e econômica, que tende a padronizar conhecimentos e práticas, e raramente reconhece os sistemas de valores localmente atribuídos aos objetos complexos, culturais e biológicos, que são as plantas cultivadas.

Este contexto perpetua fortes assimetrias de poder entre os saberes científicos e locais, ainda mais se forem femininos. O quadro global é também marcado por uma erosão de escala mundial dos recursos genéticos vegetais, que resulta por um lado na perda de uma diversidade genética, potencial

resposta aos desafios das mudanças climato-ecológicas, e, por outro, na perda de um bem cultural, no entanto de natureza biológica, forjado no decorrer da história, ou seja, de um patrimônio cultural cuja continuidade se fundamenta no direito de expressar livremente escolhas culturais nas práticas produtivas, cognitivas e sociais.

Outro elemento, relacionado a ética e ao direito, moldou fortemente as práticas de pesquisa do Pacta, e objetivou criar as condições de um constante diálogo com os parceiros locais. No que se refere à conservação da biodiversidade, as relações com os atores locais não fundamentam mais em relações de assistência mas de intercâmbio e parceria, posição em acordo com os trabalhos da Plataforma Intergovernamental de Política Científica sobre Biodiversidade e Serviços dos Ecossistemas (IPBES). Em termos legais, a realização do Pacta se enquadrava em 2005 na medida provisória sobre acesso a recursos genéticos e conhecimentos tradicionais associados. A obtenção de autorizações de pesquisa para cada um dos locais de pesquisa estava condicionada ao estabelecimento de um termo de consentimento prévio informado que indicava os objetivos da pesquisa, seus métodos, os usos dos resultados, os direitos das partes e que incorporava, quando apropriado, solicitações específicas das populações envolvidas. A abordagem do Pacta tem sido o documento de referência do reitorado da Unicamp para a obtenção deste termo de consentimento por vários anos.

As três fases do Pacta visavam compreender as bases sociais e ecológicas de uma diversidade de plantas cultivadas em um determinado contexto; identificar os instrumentos suscetíveis de dar visibilidade a estas agriculturas tradicionais em escala nacional; e, finalmente, propor uma reflexão sobre seu futuro num contexto marcado pela globalização e intensificação do comércio. O programa foi desenvolvido em diversos contextos de acordo com três grandes abordagens complementares: a agrobiodiversidade como processo socioambiental; as formas de qualificação das plantas cultivadas; e as políticas públicas e os instrumentos para a conservação desta diversidade biológica, com diferentes centros de interesse, sensibilidades e metodologias, e tendo como ponto de partida uma planta ou um sistema agrícola. Essas abordagens visavam identificar os valores imateriais da agrobiodiversidade e examinar em que ela participa do funcionamento de uma sociedade e de suas relações com um território e as revela. Este texto, baseado nas principais contribuições de cada uma das vertentes de pesquisa, evidencia a diversidade das formas de produção da agrobiodiversidade, a riqueza das relações entre agrobiodiversidade e sociedades e a necessidade urgente de pensar em políticas públicas que levem em conta uma variabilidade de situações. Conclui com recomendações resultantes desta pesquisa.

### Uma diversidade de processos socioambientais

Os relatórios da FAO sobre o estado mundial dos recursos fitogenéticos revelam um conhecimento detalhado da amplitude das coleções de germoplasma mantidas nas instituições e das inovações (casas de sementes, guardiões da biodiversidade, etc.) desenvolvidas para garantir esta conservação. No entanto, poucos dados permitem avaliar com precisão a amplitude o estado da diversidade dos cultivos mantidos pelas populações



locais. Os trabalhos do Pacta ressaltaram a amplitude da diversidade de plantas cultivadas por povos indígenas ou comunidades tradicionais.

Assim, 52 agricultores da região de Cruzeiro do Sul no Acre manejam um leque de 218 gêneros com 263 espécies, enquanto a conservação no âmbito nacional abrange 426 gêneros e 1.956 espécies: o esforço de conservação feito pelas populações locais reflete-se muito diretamente nestes números. Cerca de cem variedades de mandioca levantadas no médio Rio Negro e mais de 300 outras espécies ou variedades cultivadas por 28 agricultoras reforçam esta observação tendo como elemento central a diversidade de batatas doces (*Ipomoea batatas*) com 56 variedades.

A existência desta diversidade agrobiológica resulta de processos cumulativos de produção acidental de novos morfótipos (via mutações ou reprodução sexual, por exemplo, no caso da mandioca) e de escolhas de conservação feitas por gerações de “coleccionadores de diversidade”, que favorecem o diverso frente ao homogêneo. Por exemplo, a pesquisa sobre o pequi (*Caryocar brasiliense*), realizada junto aos Kuikuro (Mato Grosso), revelou variações fenotípicas significativas nas frutas que podem ser comparadas a uma síndrome de domesticação, ou seja, que uma diversidade se manifesta agora nos pequizais (pomares polivariados). No entanto, esta domesticação não pode ser lida apenas em termos de genética e não pode ser dissociada de sua inserção social.

A diversidade agrobiológica está intimamente ligada a uma estética da diversidade das plantas nas roças e ao seu papel memorial. Nas roças de Mebengokré, a presença de espécies ou variedades obtidas, coletadas, trocadas com parentes ou conhecidos revela vínculos e trajetórias. No Rio Negro, a circulação das plantas cultivadas é igualmente importante. Ela responde a normas sociais: as plantas, em particular as variedades de mandioca, circulam principalmente entre mulheres num modo intergeracional, enquanto as frutíferas circulam mais entre os homens. Ambos exemplos mostram o quanto a agrobiodiversidade está ligada a um modo de funcionamento da sociedade, e o quanto ela o reflete. Por meio da rede social que ela mobiliza, a circulação qualifica não apenas a pessoa cujas práticas e saberes levaram a uma profusão vegetal nas roças mas também a planta que transita entre pessoas, lugares, paisagens e etapas de vida. Além disso, a diversidade, que é de interesse coletivo e não pode ser apropriada individualmente, constitui um bem intergeracional que circula em larga escala e contribui para a coesão socioeconômica e a igualdade de acesso aos recursos vegetais. Nas frentes de expansão agrícola do Acre, as redes de trocas de plantas refletem uma dinâmica de fixação coletiva no espaço. Vetores de significados afetivos e memoriais, as plantas têm um papel que vai muito além do registro de uso e, juntamente com a cultura material e o sistema alimentar que delas derivam, estão na base da noção de sistema agrícola tradicional.

#### Qualificação da agrobiodiversidade

A compreensão da pluralidade de mundos construídos ao redor e pelas plantas cultivadas foi desenvolvida principalmente no contexto do guaraná (*Paullinia cupana*). Esta planta está no centro da vida social dos Sateré-Mawé



Os tubérculos de mandioca são transportados num cesto-cargueiro tradicional ou aturá até a casa do forno (Rio Negro).



As roças indígenas tradicionais não ultrapassam 0,3 ha e abrigam uma imensa diversidade de plantas cultivadas entre as quais as variedades de mandioca têm um papel central (Rio Negro).

e mobiliza, além deles, uma diversidade de atores e discursos em torno dos desafios econômicos e sociopolíticos de sua valorização nos mercados nacionais e internacionais. A abordagem é baseada no conceito da ontologia da planta, ou seja, a performatividade de um discurso sobre o guaraná, que é suscetível de modificar práticas e, portanto, o que ele é - seus contornos, seu conteúdo, suas propriedades – em função dos contextos e objetivos a serem alcançados. Seja pequi, guaraná ou mandioca, cada uma destas plantas, assim como os produtos derivados delas, deve ser tratada da maneira correta, aquela que é oriunda de normas compartilhadas. A expressão de sua função social exige o respeito de uma ética de relações entre a planta e aqueles que cuidam dela. O estudo multiespecífico realizado entre os Pataxós (Bahia) mostra que a relação entre os humanos e as plantas cultivadas também remete a um companheirismo entre estas entidades.

As situações de escala local estão integradas, e sempre estiveram, em jogos de ruptura e continuidade sob a dependência de dinâmicas globais. A modernidade atual se reflete em particular em deslocamentos no lugar de vida para a cidade (os pequenos focos urbanos que se desenvolvem ao longo dos rios), por uma integração econômica sob uma forma monetizada e por políticas de desenvolvimento agrícola.





Colheita de pimentas numa roça do médio Rio Negro.

Porém, o laço com o local de origem é mantido por exemplo em situações de risco geradas pelo ambiente urbano. Entre os Ye'kuana, somente alimentos das roças das aldeias de origem são então consumidos. O alimento torna-se o vetor de todos os cuidados transmitidos pelos parentes. O retorno aos lugares florestais ainda deve ser estudado em profundidade no contexto da epidemia de Covid-19.

As agriculturas periurbanas analisadas no Acre junto a descendentes de seringueiros e, no Rio Negro, num contexto ameríndio respondem a dois modelos. No Acre, esta agricultura está associada a uma estratégia disruptiva, com a recriação de um sistema agrícola que, baseado em extensas redes de conexões, importa uma diversidade agrícola que atende as exigências dos novos consumidores. Este sistema agrícola é portanto recriado, enquanto no contexto indígena, em Santa Isabel do Rio Negro, a estratégia é conservadora, com uma transposição da diversidade agrícola e redes de circulação similares às desenvolvidas nas áreas florestais. A roça se apresenta como um espaço de resistência a uma forma de modernidade e, a primeira vista, o ambiente urbano não coloca em questão seu funcionamento. Uma etnografia das trajetórias de três mulheres destaca no entanto uma diversidade de relações afetivas com a prática agrícola. Assim, ter a responsabilidade e o domínio de uma roça em termos de saberes e práticas revela-se fundamental para a construção da identidade feminina indígena do Rio Negro, no obstante esta identidade está sendo maltratada pelos projetos de modernização agrícola. Também, uma fragilidade diante destas dinâmicas globais com suas escolhas econômicas se expressa na instalação de migrantes oriundos do alto Rio Negro na área de influência de Manaus. Quaisquer que sejam estas configurações, os agricultores tradicionais estão hoje intimamente ligados aos contextos urbanos.

### Direitos e instrumentos de conservação

As interações descritas vão além daquelas relativas à genética evolutiva mobilizada na conservação *in situ*, que por si só marca um grande avanço sobre a conservação *ex situ*, baseada em bancos de germoplasma, que isolam o material biológico de seu ambiente socioecológico. Os objetos e as escalas espaço-temporais mobilizados pela conservação *ex situ* e *in situ* ainda têm dificuldade de diálogo. O desafio da conservação está se ampliando: não se trata apenas de manter a rede de significados e valores que as plantas têm para os grupos culturais que as mantêm, mas também de identificar suas articulações com as normas legais.

Um início da visibilidade destas agriculturas no cenário brasileiro está ocorrendo na área cultural: aquele que reconhece ao fato agrícola, além de sua ancoragem ecológica, uma especificidade sociocultural, uma outra forma de ver e fazer. Sob a égide do IPHAN, com uma parceria com a Unicamp, IRD, ISA e associações indígenas do Rio Negro, o sistema agrícola tradicional do Rio Negro foi reconhecido como patrimônio imaterial da nação em 2010. Dez anos depois, o título, o primeiro a se referir a um sistema agrícola, está agora sendo revalidado. Mais recentemente, o sistema agrícola dos quilombolas do Vale do Ribeira foi reconhecido como patrimônio imaterial. Também há avanços no campo das políticas ambientais: por exemplo,



Torrefação da farinha de mandioca, Brasil.

a queima, até recentemente era condenada em bloco, enquanto o controle de sua sazonalidade e de sua extensão pelas populações locais a torna um fator de produtividade e de conservação da biodiversidade para as agriculturas locais como no contexto do Jalapão.

### Pesquisa futura

A contribuição central do programa Pacta foi integrar os sistemas agrícolas tradicionais ao contexto brasileiro e colocá-los em diálogo com a agroecologia. No campo agrônomo, produzir foi visto, e ainda é em grande parte, como um fato comensurável entre todas as agriculturas, capaz de mobilizar universos técnicos que poderiam se complementar, se encaixar ou serem substituídos e sobre o qual intervir fazia sentido na lógica de um gradiente evolutivo linear no qual cada nova etapa absorvia a anterior. Em resumo, a combinação de um repertório agrotécnico tradicional com um repertório agrotécnico científico parecia promissora, mas não levava em conta as relações de poder expressas por este último. Embora a configuração possa ser frutífera em alguns pontos, ela é insuficiente para garantir um futuro para a diversidade destas agriculturas tradicionais. Assim, as contribuições dos Povos Indígenas



e Comunidades Locais (IPLC) dizem respeito tanto a existência material da diversidade biológica - sobre a qual, *in fine*, se fundamentam nossos modos de alimentação - quanto a existência imaterial de uma diversidade de relações com os organismos vivos, bem como aos contextos fundiários e ambientais em que a diversidade agro-bio-ambiental está inserida.

Novas linhas de pesquisa estão surgindo em decorrência do Pacta, e fazem sentido tanto no campo da agricultura tradicional quanto no da agroecologia. Trata-se de reforçar a compreensão de suas dinâmicas e de suas vulnerabilidades sociais e ecológicas; de desenvolver novas conexões interculturais fundamentadas em pesquisas pensadas desde seu início nos planos científicos e institucionais num modo colaborativo; e de fortalecer abordagens multidisciplinares da biodiversidade e da agrobiodiversidade, integrando não apenas ciências humanas e sociais e ciências da vida, mas abordagens do direito e da filosofia: "Compreender [o] regime ontológico [das plantas] é fundamental se quisermos propor modos *sui generis* de proteção e salvaguarda de conhecimentos tradicionais associados à biodiversidade, que possam ser efetivamente utilizados por povos indígenas na promoção de seus direitos" (Smith e Fausto, 2016).

---

### Para mais informações

ARROYO-KALIN M., 2021 – « As terras antrópicas da Amazônia: mais que somente terras pretas ». In NEVES E. G. (éd.) : *Biodiversidade e Agrobiodiversidade como legados de Povos Indígenas*, São Paulo, SBPC, 6 : 33-46.

BRONDIZIO E. S. et al. (eds), 2019 – *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES, 1 148 p., <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

CASSINO M. F. et al., 2021 – « Archaeobotany of Brazilian Indigenous Peoples and Their Food Plants ». In Jacob M. C. M, Albuquerque U. P. (eds) : *Local Food Plants of Brazil*, Springer International Publishing, Cham : 127-159, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69139-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69139-4_8).

NERI I. F. et al., à paraître – « Produtos indígenas do Sistema Agrícola Tradicional do Rio Negro -Amazonas/Brasil: experiências de valorização de um patrimônio cultural ». In Nogueira M. et al. (ed.) : *Coletânea do Mestrado Profissional em Sustentabilidade junto a Povos e Territórios Tradicionais (MESPT)*, UnB.

SMITH M., FAUSTO C., 2016 – Socialidade e diversidade de pequis (*Caryocar brasiliense*, Caryocaraceae) entre os Kuikuro do alto rio Xingu (Brasil). *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 11 : 87-113.

---

### Participaram das pesquisas

Mauro Almeida (Unicamp), Laure Emperaire (IRD), Geraldo Andrello (ISA), Marilena Altenfender (Esalq-USP), Sonia Maria Alves Bueno (Unicamp), Patrícia Bustamante (Embrapa), Thiago Cardoso\* (INPA), Manuela Carneiro da Cunha (USP, U. Chicago), Pedro Castelo (Fundaj), Mélanie Congretel\* (Agro-Paris-Tech), Pascal Cristofoli (Ehess), Carla Dias (ISA), Janaína Diniz (UnB), Ludivine Eloy (CNRS), Thayná Ferraz\* (UFRJ), Geoffroy Filoche (IRD), Esther Katz (IRD), Elaine Moreira (UFRO), Fernando Niemeyer\* (Unicamp), Florence Pinton (Agro-Paris-Tech), Augusto Postigo\* (Unicamp), Rafael Luís Galdini Raimundo\* (Unicamp), José Onésio Ramos\* (Unicamp), Roberto Rezende\* (Unicamp), Roberta Rizzi\* (Unicamp), Pascale de Robert (IRD), Laura Santonieri\* (Unicamp), Juliana Santilli\* (Ministère Public - DF), Maira Smith\* (UnB), Lúcia van Velthem (MPEG).

\* O asterisco indica que o trabalho é parte de um mestrado e/ou de um doutorado.

16

## O sistema alimentar

O termo “sistema alimentar” abrange a diversidade de plantas e animais na base da dieta, mas também técnicas de culinária, utensílios de cozinha, formas de comer, assim como o sistema mental associado a preparações e degustações, tal como a concepção de sabores e cheiros. A evolução do sistema alimentar pode ser vista como uma testemunha das profundas transformações que estão ocorrendo.

### Contexto

Nas últimas décadas, as práticas alimentares na América Latina, do campo ao prato passando pela cozinha, mudaram significativamente e novos problemas relacionados à desnutrição de populações vulneráveis e à qualidade dos alimentos produzidos surgiram. Certas dinâmicas são repetidamente citadas como causas: a tendência em adotar alimentos globalizados, a forma como os alimentos são processados industrialmente, a forma como comemos... O Brasil não escapou dessas grandes transformações, mesmo em suas regiões aparentemente mais “remotas” e de difícil acesso, como a Amazônia.

A compreensão de como esses processos globais se manifestam localmente motivou uma equipe de cientistas de várias disciplinas a estudar os sistemas alimentares da Amazônia brasileira. Foram realizados dois estudos, um no Alto Juruá, Estado do Acre, entre antigos seringueiros de origem nordestina, e um estudo mais aprofundado sobre o Médio Rio Negro, na pequena cidade multiétnica de Santa Isabel, cerca de 800 km a montante de Manaus, e comunidades vizinhas, principalmente entre os ameríndios dos grupos lingüísticos Arawak e Tukano Oriental. A literatura sobre alimentos na Amazônia era e ainda é escassa, e a literatura sobre mudanças dietéticas na região é ainda mais.

### A alimentação dos povos indígenas da Amazônia: o exemplo do Rio Negro

Esta pesquisa no Rio Negro, realizada de 2006 a 2019, tem sido uma aventura humana de observação e paciência. Durante cada período de campo, os pesquisadores do projeto conduziram observações e entrevistas com os habitantes, acompanhando-os em suas atividades diárias.



Preparação da bebida de açaí (Santa Isabel do Rio Negro, Amazonas, Amazônia Brasileira).



Os tubérculos de mandioca pubam na água alguns dias antes do preparo da farinha (Rio Negro).

A dieta tradicional da região é baseada na mandioca amarga, a base da roça, e no peixe, e é complementada por caça, insetos, frutas e tubérculos cultivados e silvestres. A diversidade de plantas alimentícias cultivadas é considerável: mais de 100 espécies, incluindo 50 espécies frutíferas, 10 palmeiras e quase 40 espécies anuais. A mandioca tem pelo menos 100 variedades, e a agrobiodiversidade de pimentas, inhames, abacaxis e bananas também é extensa. As florestas da região são ricas em árvores frutíferas e de castanhas. As ‘águas negras’ do Rio Negro são menos abundantes em peixes do que as ‘águas brancas’ de outros rios, como o rio Amazonas, mas mostram uma grande biodiversidade. Os habitantes de Santa Isabel comem pelo menos 30 espécies de peixes, assim como tartarugas de rio.

Para falar de alimentos, precisamos ser inclusivos: embora os ingredientes que provêm da biodiversidade de plantas e animais, sejam a base dos alimentos, limitando-nos a eles daria um quadro incompleto sem as técnicas culinárias, os modos de consumo, assim como o sistema mental associado aos preparados e degustações, como a concepção de sabores e cheiros, de onde vem o termo sistema alimentar, que leva em conta todas estas dimensões.

### PARCEIROS

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil

Associação das Comunidades Indígenas do Médio Rio Negro (ACIMRN), Brasil





O cesto de carregamento, aqui um waturá baré, é um elemento central da cultura material na prática agrícola ameríndia no Rio Negro. Santa Isabel do Rio Negro, roça de Maria de Sousa Lima, 24/11/2014.

A agricultura tradicional do Rio Negro, nas mãos das mulheres, tem como elemento estruturante a mandioca amarga, que requer um complexo processo de desintoxicação para se tornar comestível, e da qual se prepara uma grande variedade de alimentos: farinha, beiju, goma, tapioca, mingau, manicuera, tucupi, caxiri, manisoba, com uma variedade de farinha, beiju, mingau e caxiri.

O outro ingrediente básico é o peixe, pescado principalmente por homens. É preparado cozido, grelhado, frito e em piracui (grelhado e desfiado). O prato mais típico do Rio Negro é o quinhapira (caldo de peixe muito apimentado). Nas comunidades ameríndias do alto Rio Negro, se come pela manhã mingau e/ou quinhapira com beiju, e novamente quinhapira no final da tarde, quando voltam da pesca ou da roça. Todas as famílias comem juntas, compartilhando todos os pratos que cada mulher preparou. Nas comunidades ao redor de Santa Isabel, esta partilha de alimentos ainda é praticada aos domingos, mas é muito mais rara na cidade. O ritmo das refeições é mais marcado pelas atividades escolares ou assalariadas, já que as pessoas que vão à pesca ou à roça não são mais a maioria. A quinhapira é consumida com menos frequência, e a farinha de mandioca tornou-se mais importante do que o beiju. É possível preparar uma grande quantidade de cada vez, armazená-la por vários meses e levá-la consigo quando você viaja, por exemplo, para a floresta. Seu uso tem sido favorecido pelo extrativismo que, no meio do Rio Negro, foi durante muito tempo a principal atividade econômica. Além da farinha de mandioca, o arroz e o feijão são agora os alimentos básicos na maior parte do Brasil. O peixe nem sempre é mais consumido diariamente e se come também frango ou carne bovina, importados congelados de outras regiões.

### Qual é a evolução deste sistema alimentar?

Esta questão é fundamental no contexto das grandes transformações sociais, econômicas e ambientais que a Amazônia tem sofrido nas últimas décadas. A urbanização, em particular, está tendo um forte impacto sobre a agricultura e a pesca. Há cada vez menos espaço perto da cidade para as roças, e o crescimento populacional e a pressão sobre o recurso significam que os pescadores têm que viajar mais longe para encontrar peixe.

Por outro lado, os alimentos produzidos localmente não estão amplamente disponíveis na cidade, onde as lojas são preenchidas principalmente com alimentos industriais, assim como frutas e vegetais como maçãs, tomates ou cebolas, que chegam de Manaus de barco.

Os cardápios dos restaurantes seguem o conceito de comida “nacional”, com arroz, feijão, massas, carne, salada; entretanto, a farinha de mandioca está sempre presente e o peixe também é oferecido, mas raramente pratos regionais, como a quinhapira. Em outras palavras, os alimentos locais se tornam invisíveis, o que muitas vezes leva à sua desvalorização pelos próprios ameríndios. Em Santa Isabel do Rio Negro, cerca de um terço das famílias continuam a cultivar a roça ao redor da cidade, mas esta é uma atividade que é realizada principalmente por mulheres mais velhas e tem pouco apelo para os jovens. A alimentação pode ser considerada como uma testemunha das profundas transformações que estão ocorrendo. É neste contexto



Cozinhando farinha de peixe (piracui) no Lago Grande de Curuai, Amazônia, Brasil.

que nasceu a idéia da patrimonialização do sistema agrícola tradicional do Rio Negro, no qual o sistema alimentar foi integrado.

### A patrimonialização do “sistema alimentar”

O que é herança alimentar? Este patrimônio engloba dimensões materiais, ingredientes de plantas e animais e utensílios culinários, e dimensões imateriais, conhecimentos, práticas, rituais, relações sociais, tradições orais, aspectos de identidade ligados à alimentação.

O IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional do Brasil), que segue a Convenção da Unesco sobre Patrimônio Cultural Imaterial, patrimonializou em 2010 o sistema agrícola tradicional do Rio Negro (que inclui o sistema alimentar) na seção “conhecimento”. Este dossiê é o resultado de um esforço conjunto no qual pesquisadores, ONGs e, acima de tudo, membros de associações ameríndias trabalharam lado a lado.

No contexto global de mudanças dietéticas, com uma maior incidência de doenças relacionadas a “junk food”, este exemplo de revalorização de

alimentos locais, menos processados e mais nutritivos pode ser visto como um exemplo a seguir. Além disso, o conhecimento tradicional, a alimentação e o ecossistema cultivado e selvagem se tornam visíveis, destacando a história cultural da Amazônia que une estreitamente os povos indígenas e seus territórios; um elemento chave para enfrentar os desafios socioeconômicos e ambientais atuais e futuros.



Produção de farinha de mandioca, Amazônia brasileira.

---

### Para mais informações

CARNEIRO DA CUNHA M. *et al.*, 2021 – *Povos tradicionais e biodiversidade no Brasil: contribuições dos povos indígenas, quilombolas e comunidades tradicionais para a biodiversidade, políticas e ameaças*. São Paulo, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), 278 p.

VAN VELTHEM L., EMPERAIRE L., 2016 – *Manivas aturás beijus: o Sistema Agrícola Tradicional do Rio Negro. Patrimônio Cultural do Brasil*. Santa Isabel do Rio Negro, Associação das Comunidades Indígenas do Médio Rio Negro (ACIMRN), 72 p.

KATZ E. *et al.*, 2016 – « Valorisation des cuisines amérindiennes dans les Amériques : fêtes, foires, et festivals ». In Tibeiro M. L. (ed.) *et al.* : *Livro de atas : Alimentos e manifestações culturais tradicionais. Alimentação e cultura : tradição e inovação na produção e consumo de alimentos*, Vila Real, UTAD : 249-259.

---

### Participaram das pesquisas

Esther Katz (IRD), Lucia Van Velthem (MPEG), Laure Emperaire (IRD)



## Biodiversidade espontânea nos agrossistemas: plantas silvestres úteis e plantas invasoras

Como a presença de seres humanos perturba o equilíbrio dos ecossistemas, é preciso encontrar soluções para aumentar a produção nas áreas cultivadas, reduzindo ao mesmo tempo os insumos e a mão-de-obra, a fim de alimentar a população humana, cada vez mais numerosa. A manutenção de espécies nativas úteis nas plantações é uma maneira de alcançar esse objetivo, conservando ao mesmo tempo a biodiversidade.

### Contexto

Em 1979 a ORSTOM/IRD designou seu primeiro pesquisador para o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) em Manaus. Desde então pesquisas em botânica, ecologia e pedologia, entre outras, se sucederam na Amazônia, sempre com o apoio de inúmeras missões de pesquisadores, professores, estudantes franceses e brasileiros. Em 1993, uma colaboração com a universidade federal do Para (UFPA) e a universidade federal rural da Amazônia (UFRA) em Belém, possibilitou o início no estado do Pará de projetos associando o estudo de solos e vegetação, que mais recentemente foram seguidos por projetos sobre biodiversidade. Desde 2013, iniciou-se também uma colaboração com a universidade federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), em Marabá. Com essas Universidades, os estudos foram focados nas áreas ocupadas pela agricultura familiar.

A avaliação da biodiversidade na zona tropical húmida está no centro das preocupações internacionais, razão pela qual os pesquisadores do IRD e seus colegas brasileiros têm desenvolvido estudos sobre a biodiversidade nos agrossistemas e a parte útil dessa biodiversidade na comunidade de Benfica, também chamado de PA-Benfica (Projeto de Assentamento Benfica), localizada em uma área de pequenos agricultores familiares, onde anteriormente era ocupada por grandes propriedades que a haviam desmatado apenas parcialmente.

Assim como outras regiões do Brasil, a região de Marabá no estado do Pará, onde se localiza o PA-Benfica, caracteriza-se pela presença de frentes pioneiras mais ou menos antigas. Uma densa floresta úmida com alta biodiversidade



Medição da coroa de uma palmeira babaçu em um pasto em PA-Benfica, Brasil.

predominava inicialmente na região. A instalação de agricultores resultou em uma mudança gradual na paisagem. De fato, a cada ano, eles escolhem uma porção de suas terras, primeiro removem as árvores de grande porte, em seguida desmatam toda a floresta, e por fim a queimam. Após esse preparo de área, eles plantam arroz e depois a forrageira para formar o pasto, ou formam diretamente o pasto. Entre os pequenos agricultores familiares, com quem trabalhamos, o cultivo é manual, sem uso de tratores. No entanto, o uso de herbicidas, incomum até os últimos anos, tem se tornado cada vez mais comum.

Entre 1987 e 2005, a paisagem do PA-Benfica passou por intensas transformações devido à mudança no uso do solo. Passou de uma paisagem florestal a um mosaico de parcelas agrícolas e em particular de pastagens, atualmente dominantes. Algumas áreas podem se tornar improdutivas devido ao esgotamento dos solos que não recebem nenhum fertilizante. Essas áreas são temporariamente abandonadas e inicia-se então o processo de regeneração florestal por meio da sucessão secundária. Uma floresta secundária é reconstituída e será mantida por um período mais ou menos longo, chamado período de pousio; após o qual essa floresta pode ser novamente cortada e transformada em um novo campo agrícola.

Essa região do sudeste do estado do Pará era conhecida como "polígono dos castanhais", devido à alta concentração de castanha-do-pará

### PARCEIROS

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Brasil

Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil

Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Brasil

Instituto Nacional de Pesquisa Agrônoma (INRA), França

Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Brasil



Palmeira babaçu e castanheira (nogueira amazônica), Amazônia brasileira

(*Bertholletia excelsa* H.B.K.) nas florestas “primárias” – quer dizer florestas velhas, normalmente chamadas de florestas maduras, que não possuem registro de desmatamento - que dominavam; infelizmente a densidade dessa espécie diminuiu significativamente. No PA-Benfica, as florestas “primárias” bem preservadas apresentam uma grande riqueza de espécies típicas desses ambientes. A exploração da madeira na floresta e a agricultura, são as principais atividades que levam à degradação da floresta. Podemos perceber pelo menos três níveis diferentes de florestas: aquelas bem preservadas, onde encontramos espécies típicas de florestas úmidas não perturbadas, florestas perturbadas, com predominância de espécies florestais típicas no sub-bosque, mas com um dossel pobre em espécies devido à extração de madeiras e florestas recentemente perturbadas, com vestígios de queimadas e presença marcante de espécies arbóreas pioneiras (espécies demandantes de luz). Os agricultores usam as florestas ricas em biodiversidade para caçar, colher frutas, sementes e madeira.

As matas ciliares, embora protegidas pela Lei nº 4.771 de 2012 do Código Florestal Brasileiro, às vezes também são desmatadas, em especial para abrir caminhos para o gado beber água ou para instalar áreas recreativas. Aquelas adjacentes às pastagens mostram o mais alto grau de degradação. A palmeira açai (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma espécie típica destas florestas. Esta espécie frequentemente aproveita as clareiras resultantes da extração para se desenvolver e se tornar quase mono-dominante. O fruto do açai é consumido pela população local e tem sido vendido no comércio de Itupiranga e Marabá. Algumas vezes as formações de açai nestas áreas, localmente chamadas açaiçais, são cortadas para a colheita do palmito. É durante estas perturbações que a taboa (*Typha domingensis* Pers.), uma espécie herbácea encontrada em quase todo o planeta, torna-se invasivo e retarda fortemente o fluxo de água, às vezes até mesmo secando as terras baixas.

### Como fazemos nossa pesquisa?

Após um primeiro contato com as lideranças do sindicato dos agricultores, uma reunião com a população local possibilitou discutir as pesquisas que deveriam ser realizadas e estabelecer um acordo com os agricultores para desenvolver a pesquisa em suas propriedades. Uma visita a essas propriedades ajudou na seleção das parcelas a serem estudadas: roças de arroz, pastagens, florestas “primárias”, florestas secundárias e florestas de galeria. Os proprietários forneceram informações sobre o histórico de cada parcela: o ano de derrubada da floresta, a data de plantio da roça ou pastagem, as práticas culturais (fogos, limpeza, herbicidas), a data do abandono do cultivo no caso de florestas secundárias, etc. Essas informações foram essenciais para a interpretação dos dados registrados em cada parcela.

As coletas de dados no campo mobilizam uma pequena equipe de 3 a 6 pessoas. Um transecto é marcado com fitas métricas, estacas e cordões e todas as plantas presentes são medidas, descritas e identificadas. A identificação das plantas é iniciada no campo e confirmada nos herbários, em particular no Herbário João Murça Pires do Museo Goeldi, onde são depositadas as amostras com flores ou frutos. As imagens de satélite também são usadas para caracterizar os tipos de cobertura da terra e identificar as palmeiras.

### O que podemos dizer sobre a biodiversidade?

Nesse contexto a pergunta mais frequentemente feita é: A biodiversidade diminui quando se muda de uma floresta não perturbada para uma plantação ou pastagem? Apesar das aparências, durante a derrubada e queima da floresta tropical pela agricultura familiar não mecanizada, parte do potencial vegetal é preservado. São as sementes presentes no solo (banco de sementes do solo) e suficientemente enterradas para que o calor do fogo não as alcance, e as partes subterrâneas de certas plantas voltam a crescer após a destruição das partes aéreas. Assim, em roças e pastagens, várias espécies nativas às vezes se desenvolvem muito rapidamente a partir desse potencial de caules subterrâneos, raízes, sementes, oriundos da vegetação inicial, a floresta “primária”. No banco de sementes do solo também existem espécies de ambientes abertos, que estavam próximas à floresta e cujas sementes entraram na floresta, transportadas involuntariamente por animais ou mesmo pelo homem e que se acumulam no solo ao longo do tempo. Essas sementes de vida longa têm a capacidade de esperar, no solo da floresta, por condições de luz favoráveis à sua germinação, como a queda de um galho, de uma árvore ou um desmatamento.

Uma roça de arroz recém-instalada, logo após a derrubada da floresta, contém um conjunto de espécies particularmente resistentes à ação humana moderada (desmatamento manual e queima), portanto a área não sofre uma eliminação total de espécies. Nas pastagens que muitas vezes seguem a roça de arroz, as ervas daninhas competem com a forrageira plantada. Essa biodiversidade, embora importante, é inferior à da floresta. Existem plântulas e jovens de espécies herbáceas, lianas, palmeiras, arbustos e árvores que se desenvolvem mais ou menos rapidamente. Durante o período de cultivo, essas ervas daninhas estão sujeitas às práticas culturais: limpeza manual e, por vezes, queima, realizada pelos agricultores para limitar a competição com as espécies cultivadas. A duração do período de cultivo influencia a biodiversidade das parcelas. De fato, algumas espécies, principalmente as da floresta inicial, resistem por períodos variados nesses ambientes modificados pelo homem. Ao longo do tempo, nas parcelas cultivadas, ocorre a substituição de espécies lenhosas (trepadeiras lenhosas, arbustos e árvores) por espécies herbáceas.

Por várias razões, pode acontecer que as parcelas agrícolas sejam abandonadas mais ou menos rapidamente, com ou sem retomada posterior da atividade agrícola. Nesses locais, a regeneração florestal começa com um potencial inicial fortemente ligado à duração do uso e práticas culturais durante o período agrícola. Também é influenciada pela presença na área circunvizinha de florestas bem preservadas e ambientes abertos que fornecem sementes. Em todas as fases da sucessão secundária, considerando as florestas secundárias estudadas no PA-Benfica, as espécies típicas das florestas tropicais foram representadas por um número maior de indivíduos do que as espécies pioneiras, provavelmente devido à forte influência das florestas maduras remanescentes e ao fato de que a mudança de uso do solo tinha ocorrido recentemente.

No nosso estudo, a biodiversidade vegetal diminui quando a floresta é degradada ou desmatada para dar lugar à roça ou pastagem, e sua diminuição é maior quanto maior for o tempo de cultivo.





Colheita de frutas de babaçu sob a palmeira adulta pelos habitantes do PA-Benfica, Brasil.

Outra pergunta é: Podemos conservar a biodiversidade útil enquanto evitamos a invasão?

Entre as espécies da vegetação florestal inicial ou de formações secundárias, presentes nos ambientes abertos, algumas são úteis ao homem. Fornecem madeira, frutas, ração animal, são medicinais ou permitem a confecção de diversos objetos destinados ao uso doméstico ou à venda. Nas pastagens dos pequenos agricultores familiares, essas espécies úteis são numerosas. De fato, o gado consome não apenas as espécies forrageiras plantadas, mas também 110 espécies de plantas daninhas, das quais mais de um quinto são leguminosas nativas. Nessas pastagens também existem árvores e palmeiras, algumas das quais foram mantidas pelos agricultores na época da derrubada da floresta e outras se desenvolveram ao longo do tempo. Entre as 71 espécies de árvores e palmeiras observadas, 9 espécies são particularmente interessantes porque têm usos múltiplos. Resistentes ao fogo, persistem mesmo em pastagens antigas. A vantagem para os agricultores é que essas espécies ocorrem naturalmente. Não há preparo da terra, plantio ou manutenção, apenas reconhecê-las para poder usá-las quando necessário. Poderiam assim ser facilmente preservadas por todos e permitir o aumento da biodiversidade das pastagens.

A palmeira babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.) é uma dessas 9 espécies. É uma espécie especial porque é de uso múltiplo e invasiva. As mulheres que quebram o coco babaçu, a colhem para extrair as sementes e produzir óleo. Mas este uso não é o único. De fato, mais de 60 usos foram relatados para esta espécie na literatura, incluindo 14 na comunidade do PA-Benfica. Podemos citar o uso da farinha extraída da polpa do fruto, o leite extraído das sementes frescas, as folhas usadas na cobertura de casas, o estipe (falso tronco das palmeiras) como material de construção, etc. Essa palmeira é economicamente uma das principais espécies não madeireira do Brasil exploradas no âmbito do extrativismo - atividade de coleta seguida de comercialização de espécies nativas, não cultivadas - e sua produção de óleo é listada anualmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e de Estatística (IBGE). No plano social, também está no centro de um importante movimento de reivindicação das quebradeiras de coco babaçu pelo livre acesso a essa palmeira, localizada nas terras dos grandes proprietários ou agricultores familiares.

No entanto, esta espécie também tem a particularidade de proliferar em ambientes abertos, por isso é considerada invasiva. Durante a derrubada inicial da floresta "primária", enquanto os indivíduos adultos mais altos são derrubados, os indivíduos adultos de tamanho médio são mantidos, da mesma forma que outras palmeiras úteis. Em roças e pastagens, as limpezas manuais periódicas realizadas pelos agricultores não afetam o estipe subterrâneo dos indivíduos jovens de babaçu, apenas retardam seu crescimento; pois a lâmina da foice ou a passagem do fogo, apenas cortam ou queimam as folhas aéreas. Assim, poucos dias depois, esta espécie já produz novas folhas. Por outro lado, nos indivíduos mais desenvolvidos o estipe é aéreo e se cortado, então o indivíduo é eliminado. Os indivíduos adultos produzem numerosos frutos que caem sob os pés da planta-mãe e são dispersos por animais selvagens como a cutia ou a paca que consomem sua polpa,

mas também pelo gado e às vezes involuntariamente pelo homem. Nessas ocasiões os frutos podem ser enterrados e isso protege as sementes da destruição por exposição ao sol e fogo, e promove a germinação. O babaçu se desenvolve mais rapidamente nas pastagens onde se beneficia da maior luminosidade do que aquela encontrada no sub-bosque da floresta "primária" onde os indivíduos jovens estão na sombra das grandes árvores. Alguns autores mostraram que nas pastagens o babaçu alcança a idade adulta após 8 a 12 anos enquanto na floresta é preciso esperar 70 anos. Nas pastagens, as palmeiras adultas ficam expostas ao sol, não precisam investir na produção de um estipe muito alto, enquanto as que cresceram na floresta devem atingir o dossel para absorver mais radiação solar. No pasto, seus estipes mais baixos também são mais largos que os das florestas. Essa dinâmica populacional, mais rápida no pasto do que na floresta, pode levar em alguns casos à invasão da palmeira e à eliminação da forrageira, a tal ponto que alguns agricultores abandonam essas áreas que se transformam em florestas secundárias, dominadas pela palmeira babaçu.

Nos últimos anos, os agricultores se conscientizaram da forte capacidade dessa palmeira de invadir os agrossistemas. Atualmente, eles se esforçam para cortar os indivíduos adultos e remover quimicamente os jovens. Diante dessa realidade e para evitar o desaparecimento desse recurso, utilizado pelas mulheres, pesquisas estão sendo realizadas para entender como essa espécie invade as áreas cultivadas, a fim de alcançar um equilíbrio entre a palmeira e as lavouras, preservando ao máximo o recurso. Para isso, os estudos se concentram na dinâmica populacional de babaçu e na distribuição espacial dos indivíduos. Especialmente a distribuição espacial dos adultos foi estudada por sensoriamento remoto em imagens de satélite de altíssima resolução espacial (menos de 1 m).

Além disso, um modelo da dinâmica populacional da palmeira babaçu foi construído a partir de medições realizadas anualmente em campo, em mais de 6.000 indivíduos das várias fases da vida (plântulas, jovens e adultos). Este modelo permite simular as possíveis evoluções da população de babaçu para os próximos 5, 10 ou 15 anos com remoções de frutos que variam de 0 a 100%. Mesmo que todos os frutos sejam removidos, após 15 anos os adultos continuarão a proliferar: Altas remoções de frutos (mais de 75%) afetam apenas indivíduos muito jovens. A pressão sobre os adultos, irá se manifestar somente depois de muitos anos. Essas simulações, de acordo com as informações fornecidas pelos agricultores, reforçam a forte resiliência da palmeira nesses ambientes e explicam sua capacidade de invadir as áreas de cultivos agrícolas. Apesar disso, o estudo de imagens de satélite mostra que as densidades de adultos, na escala local, são em média menores nas pastagens do que na floresta inicial, o que deve estar ligado aos recentes cortes da palmeira. No entanto, é possível observar em uma pequena parte da região, áreas abandonadas onde a espécie prolifera sem interferência humana. A análise de imagens de satélite combinada com estudos de campo também permite prever o potencial de produção na escala regional. Em 2013, por exemplo, o potencial de produção de óleo dos frutos das 25.015 palmeiras adultas de babaçu, nas áreas abertas do PA-Benfica, foi avaliado em 27,4 toneladas de óleo.



Paisagem de frentes pioneiras amazônicas: ao fundo a floresta "primária", em segundo plano um pasto com predominância de palmeiras babacús jovens e adultas, em primeiro plano um pasto onde foram eliminadas as palmeiras babaçus.

### O que podemos concluir do nosso estudo?

Na Amazônia, a biodiversidade de agrossistemas em áreas recentemente desmatadas e cultivadas com práticas manuais, com poucos insumos, depende da biodiversidade inicial das florestas. Nas áreas cultivadas, espécies oriundas de vegetações primárias e secundárias são misturadas e suas presenças são influenciadas pelas técnicas agrícolas exercidas sobre as áreas. Se a medição desta biodiversidade é fundamental, a identificação dos fatores que influenciam a sua erosão também é essencial para compreender e travar a perda de biodiversidade. Dentre essas espécies algumas são úteis ao homem e podem fornecer matéria-prima ou renda adicional necessária ao bem-estar das populações locais. Algumas dessas espécies são ao mesmo tempo úteis e invasoras e as pesquisas realizadas permitem propor planos de manejo visando controlá-las sem eliminá-las para que possam continuar a ser utilizadas.

Mesmo com a presença do homem, que perturba o equilíbrio dos ecossistemas, é preciso encontrar soluções para aumentar a produção das áreas cultivadas, reduzindo insumos e mão de obra, para alimentar a população humana em constante aumento. A permanência de espécies nativas úteis nas lavouras é uma das formas, entre outras, de atingir esse objetivo e, ao mesmo tempo, conservar a biodiversidade. Diante dos atuais problemas de mudança climática e perda de biodiversidade, é extremamente urgente que tais pesquisas sejam realizadas sobre diversas espécies. No entanto, a aplicação real dos resultados da pesquisa pode levar tempo. Na pior das hipóteses os resultados podem não ser postos em prática, pois nem sempre correspondem às necessidades das empresas quando são disponibilizados. Por seu lado, as populações locais têm um grande conhecimento do seu ambiente e são elas que, em última análise, irão agir sobre o ambiente de acordo com os seus próprios critérios e com o conhecimento de que dispõem. A mobilização conjunta das competências dos cientistas e da sociedade civil permitirá uma maior eficiência e uma implementação mais rápida dos resultados da pesquisa sobre o manejo sustentável das espécies vegetais.

### Para mais informações

ANDERSON A. B. *et al.*, 1991 – *The Subsidy from Nature: Palm Forests, Peasantry, and Development on an Amazon Frontier*. New York, Columbia University Press, 233 p.

ARAÚJO R. F., LOPES M. A., 2012 – Diversity of use and local knowledge of palms (Arecaceae) in eastern Amazonia. *Biodiversity Conservation*, 21 : 487-501.

COELHO R. D. F. R. *et al.*, 2013 – Conservação das florestas do projeto de assentamento Benfica, sudeste da Amazônia. *Ciência Florestal*, 23 : 1-17.

MITJA D. *et al.*, 2018 – Satellite Images Combined with Field Data Reveal Negative Changes in the Distribution of Babassu Palms after Clearing off Amazonian Forests. *Environmental Management*, 56 : 1-16.

PIVELLO V. R. *et al.*, 2018 – Thinking about super-dominant populations of native species – Examples from Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 16 : 74-82.

SANTOS A. M., MITJA D., 2011 – Pastagens arborizadas no projeto de assentamento Benfica, Município de Itupiranga, Pará, Brasil. *Revista Árvore*, 35 : 919-930.

SANTOS A. M. *et al.*, 2017 – Estimating babassu palm density using automatic palm tree detection with very high spatial resolution satellite images. *Journal of Environmental Management*, 193 : 40-51.

### Participaram das pesquisas

Roberto Barbosa Dos Santos (UFPA), Sébastien Barot (IRD), Deurival da Costa Carvalho (agricultor), Eric Delaître (IRD), Laurent Demagistri (IRD), Thierry Desjardins (IRD), Jean-Louis Guillaumet (IRD), Roberta de Fátima Rodriguez Coelho (Ufra, IFPA), Wilson Filguera Batista Júnior (Ufra, MPEG), Bénédicte Fontes (Montpellier SupAgro), Michel Grimaldi (IRD), Deiane Jorge Macedo (UFPA, UM e UPVD), Anne Elisabeth Laques (IRD), Marcos Antônio Leite Silva (Ufra, MPEG), Thérèse Libourel (Universidade de Montpellier), Patrick Lavelle (IRD), Patrice Loisel (Inra), Charlotte Maquet (IRD, UPVD), Paulo Fernando Martins (UFPA, Ufra), Jessica Anastacia Medeiros dos Reis (Ufra), Guy D. Meija (UnB), Alessio Moreira Dos Santos (Unifesspa, Ufra), Sandra Maria Neiva Sampaio (Embrapa, Ufra), Michel Petit (IRD), Hervé Rey (Cirad), Pascale de Robert (IRD), Márcia Nazaré Rodrigues Barros (Ufra), Tânia dos Santos Silva (Ufra), Max Sarrazin (IRD), Nikolay Sirakov (UM, Inra), Luciano Souza da Silva (Ufra), Maria Regina Teixeira da Rocha (Unitins), Jean-François Tourrand (Cirad).



18

## Desmatamento, garimpo e mercúrio

Emissões de mercúrio oriundas da mineração de ouro têm sido uma preocupação crescente durante as últimas duas décadas, devido a três aspectos principais de seu ciclo biogeoquímico: sua permanência no meio ambiente, seu transporte atmosférico em distâncias muito longas e sua capacidade de bioacumulação e biomagnificação.

### Contexto

A bacia amazônica destaca-se regularmente pelos problemas ambientais e de saúde humana gerados pelas atividades antrópicas. Nas últimas duas décadas, a poluição por mercúrio (Hg) oriunda da mineração ilegal de ouro nos países da América do Sul aumentou e tornou-se a principal causa de emissões significativas de vapor atmosférico e descargas de mercúrio em cursos d'água. O mercúrio é um elemento natural utilizado em uma grande variedade de processos e produtos. Uma vez que o mercúrio não pode se degradar, seus efeitos nocivos podem afetar os ecossistemas por décadas. Portanto, é considerado um poluente persistente e está presente nos solos e sedimentos, na atmosfera, na água doce e salgada, nos peixes, na vida selvagem e no corpo humano. A Organização Mundial da Saúde declarou o mercúrio como uma das seis substâncias mais perigosas para a saúde devido a sua alta toxicidade e riscos para a saúde humana e o meio ambiente. Uma vez introduzido no meio ambiente, o mercúrio tem um ciclo biogeoquímico complexo e ativo. Seus efeitos adversos sobre o meio ambiente e a saúde chegaram ao conhecimento público nos anos 1950 e 1960, após uma série de mortes e malformações congênitas inexplicáveis entre os residentes da Baía de Minamata, no Japão. Este desastre levou à documentação de um problema de saúde pública (conhecido como doença de Minamata) relacionado ao acúmulo de metil mercúrio em pacientes, mercúrio proveniente de descargas diretas de uma indústria química na água da Baía de Minamata.

A mineração de ouro mudou de regiões historicamente importantes, como os Estados Unidos, para um número crescente de países do sul do planeta, principalmente de renda média e baixa, incluindo os países da região



Draga de garimpo e seu rebocador na fronteira Bolívia-Brasil. Esta área está muito poluída pelos resíduos da mineração de ouro, incluindo o mercúrio.



Local da mina Dorlin, no centro da Guiana Francesa.

amazônica. A mineração de ouro na Amazônia cresceu devido ao aumento sustentado dos preços mundiais do ouro, que começou nos anos 1980 e aumentou em 500% nos últimos 15 anos. Desde então, as operações ilegais de mineração de ouro se espalharam pela bacia amazônica e, além de graves danos ambientais, causaram uma profunda perturbação no funcionamento das sociedades locais, tradicionais e ameríndias.

Estima-se que 60% do mercúrio utilizado na mineração de ouro é liberado em solos de superfície próximos aos locais de mineração, enquanto 40% é liberado diretamente nos rios. O mercúrio liberado nos solos e rios é absorvido na superfície das partículas e transportado centenas de quilômetros rio abaixo. Na América Latina, as emissões de mercúrio das atividades de mineração representam 71% do total de emissões de mercúrio. Mais de 25% das emissões globais de mercúrio provenientes de atividades ilegais de mineração ocorrem na bacia amazônica.

O mercúrio, que ocorre naturalmente no meio ambiente em pequenas quantidades (elementos traços), é considerado um poluente prioritário internacionalmente. A gestão adequada do mercúrio tem sido uma preocupação ambiental global desde os anos 1950, devido a sua alta toxicidade e riscos. Pesquisas em Minamata, Japão, mostraram que a bioacumulação na cadeia alimentar é a principal via de exposição humana ao mercúrio, particularmente através do consumo de peixes contaminados.

### PARCEIROS

Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Agência Nacional de Águas (ANA), Brasil

Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), Brasil

Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), Brasil

Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

Universidade de São Paulo (USP), Brasil

Universidade de Québec em Montréal (UQAM), Canadá



Queima de amálgama de ouro/mercúrio em uma cooperativa de ouro da Amazônia boliviana (emissão direta de vapor de mercúrio para a atmosfera).

As emissões de mercúrio provenientes da mineração de ouro têm sido uma preocupação crescente nas últimas duas décadas, devido a três aspectos principais de seu ciclo biogeoquímico: sua permanência no meio ambiente, seu transporte atmosférico por distâncias muito longas e sua capacidade de bioacumulação e biomagnificação.

### Estudos conduzidos em uma abordagem multidisciplinar

Esta preocupação tem levado a numerosos estudos sobre a poluição por mercúrio em todo o mundo. No final dos anos 1990, o IRD se envolveu em pesquisas na bacia amazônica sobre o assunto. A complexidade do ciclo biogeoquímico do mercúrio, a diversidade das fontes de emissão e seus efeitos adversos sobre o meio ambiente e a saúde humana tornou essencial integrar e desenvolver uma abordagem multidisciplinar que combine hidrologia, geoquímica, ciências ambientais, medicina e ciências humanas e sociais.

Em 1995, graças ao programa HyBam (ver capítulo 1) em colaboração com universidades brasileiras e bolivianas, foram feitas as primeiras medições de mercúrio na água, sedimentos e o solo na Amazônia. Desde então, inúmeros estudos têm sido realizados sobre a dinâmica e os efeitos do mercúrio nos ecossistemas e seu impacto sobre a saúde humana.

As fontes de emissões e descargas de mercúrio no bioma amazônico são tanto naturais (processos de envelhecimento de rochas e combustão de biomassa) quanto antropogênicas (mineração de ouro). Vários impactos relacionados à mineração ilegal são observados na Amazônia. O mercúrio elementar líquido é usado para amalgamar partículas finas de ouro no solo ou sedimento extraído pelos garimpeiros de ouro. O amálgama de mercúrio é então aquecido, fazendo com que o mercúrio se evapore e o ouro seja recuperado. Este processo resulta na liberação de vapor de mercúrio para a atmosfera. O mercúrio pode então ser transportado pelo ar e contaminar solos e cursos de água através da deposição seca ou úmida durante a precipitação. As emissões de mercúrio da mineração de ouro também ocorrem localmente através de resíduos despejados no solo e em corpos d'água.

As concentrações de mercúrio medidas na água, solo e sedimentos nas bacias do Tapajós e Madeira mostram que as atividades de mineração de ouro aumentaram as emissões naturais de mercúrio devido à extração/mobilização de sedimentos aluviais e da liberação no rio após o processo de amalgamação e produção de ouro. Em contraste com a tendência global de redução do uso de mercúrio nos processos industriais, os países amazônicos relataram um aumento nas importações totais de mercúrio desde 2015.

Embora a mineração de ouro seja a principal fonte de mercúrio na Amazônia, estudos mostram que os solos da bacia amazônica, muitas vezes muito antigos (vários milhares de anos), contêm naturalmente altas concentrações de mercúrio com baixa mobilidade. A mudança no uso da terra (desmatamento, queima, lavoura) e os processos de erosão e perturbação associados podem levar à remobilização do mercúrio e sua liberação nos rios através do escoamento. Portanto, é importante compreender o papel do desmatamento e da degradação resultante do solo no ciclo do mercúrio na Amazônia.

Estudos nas várzeas (ver Capítulo 5) do curso inferior do Rio Amazonas indicam que o mercúrio pode ser remobilizado em lagos de planície de inundação. O mesmo fenômeno ocorre durante a construção de grandes barragens na Amazônia (por exemplo, a barragem de Tucuruí no Brasil). A interface entre os sedimentos do fundo do lago e a coluna de água sobreposta é onde as reações biogeoquímicas levam à remobilização do mercúrio. Os microrganismos são responsáveis pelas reações que provocam a liberação de mercúrio na forma de metil mercúrio biodisponível, que é facilmente assimilado pelos organismos vivos. Uma vez liberados na água, os processos de assimilação por ingestão e bioacumulação levarão a um aumento progressivo na concentração de mercúrio ao longo da cadeia alimentar. Assim, o mercúrio será transferido e bioacumulado entre organismos vivos: macro invertebrados, crustáceos, peixes, aves e mamíferos, até os seres humanos, particularmente quando o peixe é consumido.

### Consumo de pescado, a principal via de exposição ao mercúrio

A fim de alertar as populações locais sobre os perigos do alto consumo de peixe, é essencial medir as concentrações de mercúrio em diferentes espécies, pois o peixe é a fonte de proteína de qualidade e um alimento básico para mais de 2 milhões de habitantes. Por exemplo, nas comunidades ao longo do rio Tapajós, estas podem apresentar níveis alarmantes de contaminação por mercúrio (de 10 a 20  $\mu\text{g/g}$ , enquanto o nível aceitável em cabelos é de 6  $\mu\text{g/g}$  de acordo com a OMS). Estudos demonstraram que a maioria dos peixes carnívoros contém altos níveis de mercúrio, a maioria excedendo o limite da OMS (0,5  $\mu\text{g/g}$  para peixes), enquanto os peixes herbívoros estão muito menos contaminados com mercúrio. Foi realizado um "mapeamento" dos peixes comumente capturados nos rios da bacia amazônica, de acordo com suas concentrações de mercúrio.

A maioria dos estudos na Amazônia evidencia forte correlação entre a frequência do consumo de peixe e os níveis de metil mercúrio medidos em amostras de cabelo e sangue, e confirma que o alimento é a principal via de exposição ao mercúrio. O envenenamento por mercúrio provoca manifestações diferentes de acordo com a idade, por exemplo, entre crianças e adultos. Os sintomas são variados e podem incluir irritação da pele, febre, dores de cabeça, náuseas, diarreia, fadiga, insônia, irritabilidade, diminuição da acuidade sensorial, cegueira, problemas renais, perda de memória, tremores, danos cerebrais e outros distúrbios neurológicos como a doença de Minamata. As populações mais expostas ao mercúrio são mulheres grávidas, recém-nascidos, crianças e adolescentes.

### Conclusion : un défi pour les années à venir

Ainda existem incertezas em nosso conhecimento da biogeoquímica do mercúrio em ambientes tropicais, tanto na escala regional quanto no ecossistema. Assim, é complicado distinguir e quantificar em detalhes as emissões de metais naturais e antropogênicos. Também é difícil quantificar as emissões relacionadas à retroalimentação de atividades humanas, como o desmatamento. Um avanço promissor na compreensão do





Cartaz informativo sobre os riscos de impregnação ao mercúrio na Guiana Francesa.

ciclo do mercúrio e de outros metais é o uso de isótopos estáveis. Os isótopos do mesmo elemento químico se distinguem por um número diferente de elementos (nêutrons) no núcleo. Diz-se que eles são estáveis porque não são radioativos. Isótopos estáveis podem ser usados para rastrear as fontes de certos elementos como o mercúrio. Esta nova linha de pesquisa deve possibilitar a distinção entre fontes naturais e antropogênicas de mercúrio e melhorar nossa compreensão dos processos pós-emissão que afetam o destino, a biodisponibilidade e a contaminação ambiental e humana. As lacunas nas informações sobre emissões de mercúrio estão ligadas a redes de monitoramento nacionais e regionais insuficientes nos diferentes países da bacia amazônica (incluindo os países do Escudo das Guianas).

O estudo e o controle deste problema ambiental e social enfrentam dificuldades de acesso às áreas de emissão e exposição ao mercúrio. Os programas de monitoramento de água e sedimentos também são insuficientes. Em geral, a Amazônia está sub-representada no monitoramento global de mercúrio e nas redes de geração de conhecimento. A assinatura da Convenção de Minamata em 2013 deu novo impulso à regulamentação jurídica, à articulação interinstitucional e ao estabelecimento de objetivos comuns com base nos compromissos da Convenção. Com exceção da Venezuela, todos os países cujo território está dentro do bioma Amazônia, incluindo a França, assinaram e ratificaram a Convenção de Minamata e estão em processo de criação de seus planos de ação nacionais.

Em uma época de preocupação com o desmatamento e a mineração de ouro na Amazônia, a região é mais do que nunca objeto de numerosos riscos ambientais conhecidos ou latentes. As recentes notícias sobre o aumento dos incêndios florestais e o desmatamento, assim como a “Corrida do Ouro do Rio Madeira” em novembro de 2021, por exemplo, nos mostram que, apesar das evidências de contaminação humana, as atividades de mineração de ouro estão prosperando a um ritmo alarmante. Além disso, as recentes falhas de barragens em Minas Gerais e o consequente derramamento de grandes quantidades de resíduos têm destacado a fragilidade do sistema de controle ambiental. A urgência de compreender o destino e os riscos da poluição por mercúrio e outros poluentes metálicos nos ecossistemas tropicais é um desafio para os próximos anos.



Amostras de água do rio Challana no sopé dos Andes bolivianos, usando protocolos de ultra limpeza, para a análise de metais traças incluindo mercúrio (lavagem de garrafas de teflon em banhos ácidos, usando luvas sem talco de uso único).

### Para mais informações

LACERDA L. D., SALOMONS W., 1998 – *Mercury from gold and silver mining: a chemical time bomb?* Berlim, Springer-Verlag, 147 p.

MARTINELLI L. A. et al., 1988 – Mercury Contamination in the Amazon: A Gold Rush Consequence. *Ambio*, 17 (4) : 252-254. <http://www.jstor.org/stable/4313470>. Accessed 1 Sep. 2022.

ROULET M. et al., 1999 – Effects of recent human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems. *Water Air Soil Pollut.*, 112 : 297-313.

### Participaram das pesquisas

Jérémie Garnier (UnB), Patrick Seyler (IRD), Marc Roulet (IRD), Marc Lucotte (Uqam), Luiz Drude de Lacerda (Universidade Federal do Ceará, UFC), Laurence Maurice-Bourgoin (IRD), Jacques Gardon (IRD).

## Meio ambiente e saúde na Amazônia, uma abordagem de saúde única

No campo das relações saúde-ambiente, o IRD e seus parceiros fazem a ligação entre a escala local (a da tomada de decisões pelos atores locais, em relação às especificidades do território) e à escala global (a da saúde global, essencial de um ponto de vista de avaliação e da gestão de riscos e crises globais), em particular mediante uma questão pouco estudada, a da saúde transfronteiriça.

### PARCEIROS

Universidade de Brasília (UnB), Brasil

Agência Regional de Saúde (ARS), Guiana Francesa

Embaixada da França no Brasil

A Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento (Cirad), França

Coletividade Territorial da Guiana Francesa (CTG)

Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde da Fundação Oswaldo Cruz (Icict/Fiocruz), Brasil

Instituto Leônidas & Maria Deane (ILMD/Fiocruz Amazônia), Brasil

Instituto Oswaldo Cruz, Laboratório de Doenças Parasitárias (Fiocruz/IOC/LDP), Brasil

Fundação de Pesquisa do Estado do Amapá (FAPEAP), Brasil

Fundação de Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), Brasil

### Contexto

De acordo com a OMS, 24,3% das mortes no mundo (aproximadamente 13,7 milhões de mortes por ano) devem-se a fatores ambientais “modificáveis”, ou seja, fatores ligados às atividades humanas ou nos quais os seres humanos podem agir para reduzir seu impacto negativo sobre a saúde humana. Exemplos incluem poluição, desmatamento, ou seja, qualquer mudança no meio ambiente e no clima que podem criar habitats favoráveis para os vetores que transmitem doenças. A porcentagem da carga total (estimada em Anos de vida perdidos ajustados por incapacidade [DALYs]), um DALY sendo a perda equivalente a um ano de saúde plena), atribuível a condições ambientais modificáveis foi estimado em 95% para dengue, 80% para malária, 56% para a doença de Chagas e 43% para doenças diarreicas. Isso significa que a grande maioria dos casos dessas doenças poderia ter sido evitada por meio de uma melhor gestão ambiental e fundiária ou de uma adaptação do comportamento em relação ao meio ambiente. Estas doenças são particularmente prevalentes na região amazônica: de acordo com a OMS, foram registrados 653.000 casos de malária (409 mortes) em 2020, dos quais 35% na Venezuela, 26% no Brasil e 16% na Colômbia. No Brasil, 99% dos casos são registrados na Amazônia Legal. Além disso, embora a situação tenha melhorado em vários países da região, o Brasil tem visto um número estável de casos desde 2015, quando o país foi eleito “campeão de controle da malária” pela OMS/OPAS. Como a diminuição esperada não ocorreu, o país não alcançou o objetivo intermediário da estratégia global de controle da malária (alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável)



Amostragem de sangue e pesquisa “Conhecimento, Atitudes, Práticas” (KAP), projeto de seroprevalência.

que era reduzir a incidência da malária em pelo menos 40% até 2020. Isto torna difícil atingir o objetivo final de reduzir a incidência em 90% até 2030. Isto indica que ainda há muito a ser feito para quebrar a transmissão da malária na região amazônica.

Entretanto, a capacidade de estudar a relação entre o meio ambiente e a saúde aumentou consideravelmente nas últimas décadas. A quantidade dos principais satélites de observação da Terra de média e alta resolução em operação dobrou nos anos 2000, ultrapassando 15 satélites em 2011. Além disso, a resolução espacial das imagens obtidas por esses satélites aumentou em um fator de 100 entre 1970 e os anos 2010, e atualmente é inferior a 1 m. Desde os anos 2000, o desenvolvimento tecnológico relacionado à aquisição de dados ambientais, às capacidades de armazenamento e cálculo, bem como o melhor acesso aos dados (especialmente de satélites) e o surgimento de softwares livres para a construção de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e análise espacial, têm proporcionado novas oportunidades para estudar as complexas relações entre ambiente e saúde.

Os impactos do meio ambiente sobre a saúde não são fáceis de medir, porque a dinâmica de muitas doenças relacionadas com o meio ambiente são influenciadas por outros fatores (sociodemográficos, econômicos e

### PARCEIROS

Fundação de Pesquisa do Estado de Maranhão (FAPEMA), Brasil

Hospital de Caiena, Guiana Francesa

Instituto de Pesquisa Científica e Técnica de Amapá (IEPA), Brasil

Instituto Pasteur da Guiana Francesa

Secretaria Municipal de Saúde de Oiapoque, Brasil

Superintendência de Vigilância Sanitária no Amapá, Brasil

Universidade de Brasília, Núcleo de Medicina Tropical (UnB/NMT), Brasil

Universidade de Brasília, Laboratório de Geografia, Meio Ambiente e Saúde (UnB/LAGAS), Brasil

Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Brasil

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Brasil



políticos. No entanto, eles podem ser conhecidos pelo estudo dos contextos ambientais e pela caracterização dos habitats de vetores e/ou reservatórios de agentes patogênicos dessas doenças, por exemplo. Além disso, a abundância de dados ambientais via satélite permite agora relacionar, identificar e analisar a influência de fatores sobre a dinâmica das doenças em diferentes escalas temporais e espaciais, o que pode ser de grande ajuda no controle de doenças relacionadas ao meio ambiente.

Neste contexto, o IRD e seus parceiros se interessaram em estudar as ligações entre o meio ambiente (incluindo o clima), fatores sociodemográficos, políticas públicas e a situação da saúde na Amazônia durante as últimas décadas. O objetivo é fornecer conhecimentos para apoiar, especificar e diversificar as ações de saúde pública destinadas a melhorar a situação sanitária das populações da região, avaliando os impactos relativos dos fatores ambientais, sociodemográficos e relacionados com as políticas públicas.

### Como fazemos isso?

O IRD e seus parceiros adotaram uma abordagem integrada das questões de saúde desde o início. Este tipo de abordagem é atualmente conhecido como "Saúde única" e é baseado na ciência da sustentabilidade, que agora é fortemente promovida pelo IRD. O conceito Saúde única está associado a uma abordagem sistêmica e holística da saúde, que leva em conta a saúde humana mas também a saúde animal e do ecossistema, considerando os diferentes dimensões sociais (cultura, economia, política, e outras), sistemas de saúde (infraestrutura, serviços, regulamentações, e outros) e as interações entre todos esses componentes. A ciência da sustentabilidade visa estudar as soluções associadas ao desenvolvimento sustentável e suas interações, mediante uma abordagem participativa e integrada, a fim de maximizar os impactos positivos e sustentáveis e evitar efeitos negativos diretos e indiretos.

Os estudos realizados são baseados, entre outras coisas, em dados coletados por organizações e agências nacionais e internacionais, ou ainda por equipes locais. A diversidade dos problemas de saúde e a natureza multifatorial dos sistemas eco-epidemiológicos existentes na Amazônia se refletem na diversidade de métodos de coleta de dados e informações, através de diferentes tecnologias e em diferentes escalas de espaço e tempo.

As observações de campo variam desde a coleta de insetos vetores de doenças (como malária e doença de Chagas), que fornece informações sobre a distribuição dos vetores e o risco de transmissão, até o uso de questionários da PAC (que fornecem dados sobre o conhecimento, atitudes e práticas das populações locais) e facilitando grupos de reflexão (incluindo gerentes, membros da associação, representantes da comunidade).

Os estudos também se beneficiam de dados ambientais obtidos de estações de medição permanentes, tais como as estações de medição do nível da água dos rios Solimões e Negro, ou estações meteorológicas. Uma vez que os fatores hidroclimáticos podem influenciar, entre outras coisas, a presença e densidade de vetores de doenças, e devido à baixa densidade das redes de medição *in situ*, os dados de satélite também são levados em consideração, a fim de caracterizar as condições hidrometeorológicas dos habitats desses

vetores. Os dados de sensoriamento remoto também podem ser utilizados para caracterizar o uso da terra e da paisagem, para mapear habitats ecológicos de vetores, habitações humanas, permitindo assim a criação de indicadores de risco de exposição a certas doenças (como a exposição da população humana ao vetor da malária). Métodos desenvolvidos em outras regiões, mas plenamente aplicáveis na Amazônia, também foram desenvolvidos, por exemplo, para estimar a distribuição da população humana por sensoriamento remoto, a fim de melhor mapear a taxa de incidência de doenças.

Mas não haveria estudo da saúde humana sem dados sobre os casos da doença estudada, e isto foi possível graças à robustez dos sistemas de informação de vigilância epidemiológica brasileiros gerenciados pelo Ministério da Saúde, que têm o princípio de tornar seus dados públicos, através do Sistema de Informação Hospitalar (SIH), do Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM), do Sistema de Vigilância Epidemiológica (Sivep) e do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (Sinan), entre outros.

### Quais são os principais resultados?

No IRD, o ponto de partida para uma abordagem integrada da saúde que leva em conta os fatores ambientais e a dimensão espacial foi a tese de doutorado de Helen Gurgel, *Malaria and environmental dynamics in the state of Roraima in Brazil* (2006). Ao considerar o meio ambiente (dados meteorológicos, distribuição da vegetação a partir de dados de satélite), fatores sociodemográficos e o funcionamento do sistema de saúde, este trabalho aborda a questão da malária em Roraima de forma holística e sistêmica, demonstrando que os fatores não agem ao mesmo tempo e escalas de espaço, e oferece uma melhor compreensão da doença, bem como elementos de apoio à tomada de decisões para seu controle e eliminação.

No final dos anos 2000, o projeto Poor Land Use, Poor Health (PLUPH), codirigido pelo IRD e pela Universidade de Québec em Montreal (UQAM, Canadá), representou um exemplo de abordagem integrada, sistêmica e participativa da saúde humana e do ecossistema. A saúde humana foi vista não apenas como a ausência de doenças (neste caso, a doença de Chagas e problemas de saúde resultantes da exposição ao mercúrio), mas também como a capacidade das comunidades envolvidas de produzir alimentos de qualidade e gerar renda comercial, de acordo com suas práticas e cultura. Isto atende à definição da OMS de saúde como "um estado de completo bem-estar físico, mental e social e não apenas a ausência de doenças".

Assim, este trabalho confirmou o compromisso do IRD no Brasil e seus parceiros com a abordagem Saúde única promovida pelo Instituto, que foi reforçado no âmbito de vários programas e projetos, como o LMI OCE, o projeto PLUPH ou o projeto Relais ("Sistema de informação sobre paisagens epidemiológicas na Amazônia", coordenado pelo IRD e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro [UFRJ], 2012-2015), com, em particular, o acolhimento de vários doutorandos brasileiros pelo IRD em Montpellier, França, no âmbito do programa Ciência sem Fronteiras. Por exemplo, Markus Fuckner, que tem trabalhado em doenças diarreicas de origem infecciosa em relação ao clima, tem destacado relações distintas entre as regiões do país: "Os períodos do ano com o maior número de internações hospitalares por



Veículo para o projeto de soroprevalência no Distrito Federal. Esta pesquisa também foi conduzida na Amazônia, nas cidades gêmeas de Tabatinga (Brasil, Amazonas) e Leticia (Colômbia) (tese de José-Joaquín Carvajal, Projeto Gapam-Sentinela).



Habitat favorável aos insetos vetores da doença de Chagas, Amazônia boliviana.

diarreia estão predominantemente associados à estação chuvosa no norte/noroeste e à estação seca nas regiões sudeste/centro-oeste, envolvendo variação de acordo com a etiologia da infecção, ou seja, bacteriana ou viral". Bruna Wolfarth estudou a relação entre a dinâmica hidrológica na bacia amazônica e a malária, mostrando, entre outras coisas, que, dependendo do contexto geográfico, o fator mais influente é a pluviosidade ou o nível da água do rio, demonstrando assim a importância dos métodos de monitoramento do nível da água por satélite para melhor espacializar o risco de malária na Amazônia; Missifany Silveira centrou-se nos impactos da construção de barragens sobre a saúde, com foco particular na barragem de Belo Monte, mostrando a importância de processos participativos e integrados (levando em conta o meio ambiente, a saúde, a ética do desenvolvimento) para minimizar os efeitos negativos deste tipo de projeto. Leandro Gregório estudou a contribuição dos dados de satélite ao destacar a relação entre a expansão urbana ou densificação e a dinâmica da dengue. Estes estudos, entre outros, têm demonstrado a necessidade da abordagem da ciência de sustentabilidade.

Vários outros trabalhos foram desenvolvidos com parceiros brasileiros, e o IRD contribuiu significativamente para o fortalecimento, visibilidade e estruturação da comunidade da geografia da saúde brasileira, graças a suas ferramentas de parceria. Assim, em 2013, foi criado o Laboratório de Geografia, Meio Ambiente e Saúde da Universidade de Brasília (UnB), apoiado pelo IRD de 2016 a 2018 através da jovem equipe associada ao IRD (JEA) "Gestão, Indicadores e Território: Meio Ambiente e Saúde no Brasil" (GITES). Uma JEA é um mecanismo de IRD que permite que uma nova equipe surja como um laboratório autônomo sobre uma questão de pesquisa inovadora.

Como continuação do JEA GITES, o Laboratório Misto Internacional Sentinela (LMI) (observatórios transfronteiriços do ambiente e de doenças zoonóticas, locais sentinelas do Observatório Brasileiro Clima e Saúde) foi criado em 2018 entre a UnB, a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) e o IRD, visando criar um polo de referência em questões relacionadas à vigilância sanitária integrada e territorializada, inclusive em áreas transfronteiriças, através da pesquisa, ensino e diálogo com políticas públicas. Além da publicação de artigos científicos em revistas e congressos, o LMI contribuiu para a supervisão e apoio de mais de 50 estudantes de graduação, mestrado e doutorado, com uma maioria de estudantes brasileiros (mais de 80%), bem como para o ensino nas áreas de geografia da saúde, geoprocessamento para a saúde, epidemiologia, vigilância sanitária, saúde pública, geoprocessamento aplicado à ecologia dos vetores, e outros. Desenvolveu e implementou um sistema de vigilância da malária transfronteiriça entre a Guiana Francesa e o Brasil, contribuiu para um grande estudo transversal sobre arbovírus no Distrito Federal, com a coleta de amostras de sangue, respostas a questionários da PAC e informações ambientais. O LMI também participou da vigilância e análise de tendências da pandemia de Covid-19 no Brasil e em áreas transfronteiriças (fronteira entre a Guiana Francesa e o Brasil; fronteira triplice entre a Colômbia, Peru e Brasil). Ele acompanha as políticas públicas, incluindo o estabelecimento de salas de situação bi- e trinacional (ou centros transfronteiriços) para vigilância e resposta epidemiológica, sob a responsabilidade do Ministério

da Saúde, da Superintendência de Vigilância Sanitária do Amapá, da Fundação Amazonas de Vigilância Sanitária e da Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS), entre outros.

A JEA GITES e o LMI Sentinela também apoiaram a organização do Simpósio Nacional de Geografia da Saúde de 2015 e o Seminário Internacional "Geografia e saúde – teoria e método na atualidade", em 2018, com a participação de mais de 150 participantes cada. Também contribuíram para a publicação de dois cadernos temáticos sobre geografia e saúde (um sobre conceitos teóricos e outro sobre aplicações) na revista franco-brasileira de geografia *Confins*, em 2018 e 2019.

### Em conclusão

O IRD visa posicionar-se como um dos líderes mundiais na promoção da abordagem One Health para o desenvolvimento sustentável. "Ela gere uma 'comunidade de conhecimento' (CoSav) no assunto e participa da coordenação da iniciativa internacional Prezode (Preventing Zoonotic Disease Emergence) e o programa "The future of one health" para promover projetos inovadores com um forte impacto social na prevenção e gestão de crises de saúde através da abordagem da saúde única. Na Amazônia, o IRD faz a ligação entre a escala local (a da tomada de decisões pelos atores locais, em relação às especificidades do território) e a escala global (a da saúde global, uma escala essencial do ponto de vista da avaliação e da gestão dos riscos e das crises globalizadas), em particular, através de uma questão pouco estudada, a da saúde transfronteiriça. Neste sentido, o LMI Sentinela coorganizou a sessão especial «Cross-border health, a neglected global health challenge» na conferência internacional Geomed, nos Estados Unidos, em outubro de 2022.

Os estudos do IRD realizados em parceria com seus parceiros brasileiros contribuem para melhor caracterizar, monitorar e prever as complexas relações entre o meio ambiente (incluindo o clima), fatores sociodemográficos, sistemas de saúde e saúde humana. Além de novos métodos e conhecimentos, o IRD também contribuiu para demonstrar a viabilidade de soluções operacionais, particularmente no que diz respeito ao desenvolvimento de observatórios de saúde locais e territorializados, considerados como "sítios sentinelas" do Observatório Brasileiro de Clima e Saúde. Desde 2019, o IRD e o LMI Sentinela também vêm apoiando políticas públicas, fornecendo apoio técnico-científico na implementação de estruturas binacionais para vigilância e resposta a emergências de saúde pública nas fronteiras.

No entanto, muitos desafios permanecem!

A produção de dados e indicadores relevantes, multifatoriais, inteligentes e úteis para os agentes de saúde em suas tarefas de monitoramento e gestão da saúde, de forma sistemática, sustentável e mais eficaz continua a representar desafios científicos e tecnológicos. A realização destes objetivos num contexto transnacional é ainda mais complexa, devido à falta de interoperabilidade dos sistemas de informação, à incomparabilidade dos dados, às dificuldades em desenvolver e implementar um sistema de gerenciamento de dados comum, e à falta de uma linguagem comum. A realização destes objetivos num contexto transnacional é ainda mais complexa, devido à falta de interoperabilidade dos



Missão de campo franco-brasileira em Oiapoque, Amapá, Brasil, em 2013.





Semana de Capacitação em Saúde na Fronteira, 2017, em Oiapoque (Brasil, Amapá) e Saint-Georges-de-l'Oyapock (Guiana Francesa): oficina participativa de mapeamento com trabalhadores comunitários em saúde, oficiais de controle de doenças endêmicas de Oiapoque, membros de ONGs, pesquisadores e gestores de saúde do Brasil e da Guiana Francesa (entre 31 e 35 participantes).

sistemas de informação, à incomparabilidade dos dados, às dificuldades em desenvolver e manter a cooperação transfronteiriça local e às diferenças socio-legais e econômicas entre os países.

As soluções envolvem um diálogo permanente entre disciplinas científicas (exatas e humanas) e setores (acadêmico, privado, políticas públicas, sociedade civil, e outros) para os quais as abordagens participativas e comunitárias podem fornecer várias soluções.

Finalmente, outro desafio é conciliar a disseminação de dados e conhecimentos científicos à sociedade (através dos princípios da ciência aberta, em particular, a fim de reduzir as desigualdades na área da saúde e lutando contra a disseminação de notícias falsas) com o respeito a considerações éticas (incluindo a proteção de comunidades vulneráveis) e à privacidade, que é uma questão particularmente sensível no campo da saúde.

---

### Para mais informações

IRD le Mag' : <https://lemag.ird.fr/fr/le-paludisme-sous-surveillance-transfrontaliere>.

<https://www.soscienc.org/les-programmes-open-innovation/open-innovation-one-health/>

[https://prezode.org/prezode\\_fre/](https://prezode.org/prezode_fre/)

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240000377>

---

### Participaram das pesquisas

Emmanuel Roux (IRD), Helen Gurgel (UnB), Nadine Dessay (IRD), Thibault Catry (IRD), Christina Romana (Universidade de Paris V), Marc Lucotte (Uqam), Naziano Filizola (Ufam), Laurent Durieux (IRD), Anne-Élisabeth Laques (IRD), Paulo Peiter (Fiocruz), Christovam Barcellos (Fiocruz), José-Joaquín Carvajal (Fiocruz), Margarete do Socorro Mendonça Gomes (Superintendência de Vigilância Sanitária do Amapá SVS/AP), Allan Kardec Galardo (IEPA), Eliane Lima e Silva (UnB), Walter Ramalho (UnB).

---

## Lista de autores

---

### PARTE 1 **Monitorar as dinâmicas, entender os processos**

#### **1 O Observatório HyBAm em grandes rios da Amazônia**

William Santini, engenheiro hidrológico, UMR GET  
Naziano Filizola, geólogo,  
Universidade Federal do Amazonas, Brasil  
Jean-Michel Martinez, hidrólogo, UMR GET  
Jean-Loup Guyot, hidrólogo, UMR GET

#### **2 Mensurar a diversidade florestal**

Raphael Pélissier, ecólogo, UMR Amap  
Eduardo Falconi, biólogo, IRD Representação Brasil  
Frédérique Seyler, pedóloga, sensoriamento remoto,  
UMR Espace-DEV

#### **3 Monitorar o desmatamento e a degradação florestal**

Laurent Polidori, sensoriamento remoto, geodésia,  
Universidade Federal do Pará, UMR Cesbio, Brasil  
Claudio Almeida, sensoriamento remoto,  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

#### **4 Os solos : da dinâmica das lateritas à degradação da terra e da biodiversidade**

Thierry Desjardins, pedólogo, UMR IEES  
Paulo Martins, agrônomo, Universidade Federal do Pará, Brasil  
Frédérique Seyler, pedóloga, sensoriamento remoto,  
UMR Espace-DEV

#### **5 O papel essencial das várzeas no funcionamento do hidrossistema amazônico**

Patrick Seyler, geoquímico, UMR HSM, emérito  
Geraldo Boaventura, geoquímico,  
Universidade de Brasília, Brasil



## **6 Ictiologia Amazônica**

Marc Pouilly, ictiólogo, UMR Borea  
Carlos Freitas, Universidade Federal do Amazonas, Brasil

## **7 Recursos hídricos e dados espaciais**

Rodrigo Paiva, hidrólogo larga escala,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Fabrice Papa, hidrólogo, climatólogo, UMR Legos

## **PARTE 2 Interações global-local**

### **8 O sistema estuarino amazônico**

Fabien Durand, oceanógrafo, UMR Legos  
Alice César Fassoni Andrade, hidróloga, pós-doutorando  
Patrick Seyler, geoquímico, UMR HSM, emérito  
Daniel Moreira, engenheiro cartográfico, hidrólogo,  
geodésia, Serviço geológico do Brasil  
Pieter van Beek, geoquímico, UMR Legos

### **9 O sistema costeiro da Amazônia**

Jean-François Faure, geógrafo, UMR Espace-DEV  
Maria Teresa Prost, geomorfóloga,  
Museu Paraense Emílio Goeldi, Brasil

### **10 Processos físicos na foz do Amazonas**

Ariane Koch Larouy, oceanógrafa, UMR Legos  
Flavia Lucena Fredou, ecóloga,  
Universidade Federal Rural do Pernambuco, Brasil  
Moacyr Araujo, oceanógrafo, climatólogo,  
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil  
Arnaud Bertrand, ecólogo, UMR Marbec

### **11 Climas do passado**

Renato Campelo Cordeiro, geoquímico,  
Universidade Federal Fluminense, Brasil  
Abdel Sifeddine, climatólogo, UMR Locean

## **12 Climas atuais**

Josyane Ronchail, geógrafa, UMR LOCEAN  
Jhan Carlo Espinoza, agrônomo, UMR IGE

## **PARTE 3 Povos indígenas, populações locais e o ecossistema**

### **13 Um observatório socioambiental na Amazônia, o INCT Odisseia**

Marie-Paule Bonnet, hidróloga modeladora,  
UMR Espace-DEV

### **14 Reconfigurações dos padrões de vida e dinâmicas territoriais**

Stéphanie Nasuti, antropóloga,  
Universidade de Brasília, Brasil

### **15 Plantas cultivadas: produção e conservação da diversidade**

Mauro Almeida, sócio-antropólogo, Professor colaborador,  
Universidade Estadual de Campinas, Brasil  
Laure Emperaire, etnobotânica, UMR PALOC, emérita

### **16 O sistema alimentar**

Esther Katz, antropóloga, UMR Paloc  
Lucia Van Velthem, antropóloga,  
Museu Paraense Emílio Goeldi, Brasil

### **17 Biodiversidade espontânea nos agrossistemas: plantas silvestres úteis e plantas invasoras**

Izildinha Miranda, ecóloga,  
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil  
Danielle Mitja, botânica, UMR Espace-DEV

**18 Desmatamento, garimpo e mercúrio**

Jérémie Garnier, geoquímico,  
Universidade de Brasília, Brasil

Patrick Seyler, geoquímico, UMR HSM, emérito

**19 Meio ambiente e saúde na Amazônia,  
uma abordagem de saúde única**

Emmanuel Roux, matemático, UMR Espace-DEV

Helen Gurgel, geógrafa,  
Universidade de Brasília, Brasil





[www.editions.ird.fr](http://www.editions.ird.fr)

---

Resultado de um esforço coletivo, este livro apresenta o trabalho realizado na Amazônia brasileira pelo IRD e seus parceiros há mais de trinta anos. Os vários temas e projetos de pesquisa são apresentados numa perspectiva histórica e evolutiva: inicialmente focalizados em inventários e conhecimento de espécies ou redes hidrológicas, a pesquisa se abriu à gestão de recursos e à proteção da biodiversidade. Agora, a fim de responder aos desafios sociais e ambientais, as abordagens disciplinares estão sendo hibridizadas, e os cientistas estão estabelecendo o diálogo e o envolvimento com as populações locais. Cada capítulo destaca o papel da ciência na gestão sustentável do ecossistema e no acompanhamento das políticas públicas.

Essa ciência comprometida, envolvida no diálogo com as sociedades, está lançando as bases científicas para uma adaptação sustentável na Amazônia brasileira.

  
**AMBASSADE  
DE FRANCE  
AU BRÉSIL**  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Apoio a esta publicação: Embaixada da França no Brasil

ISBN: 978-2-7099-2968-4