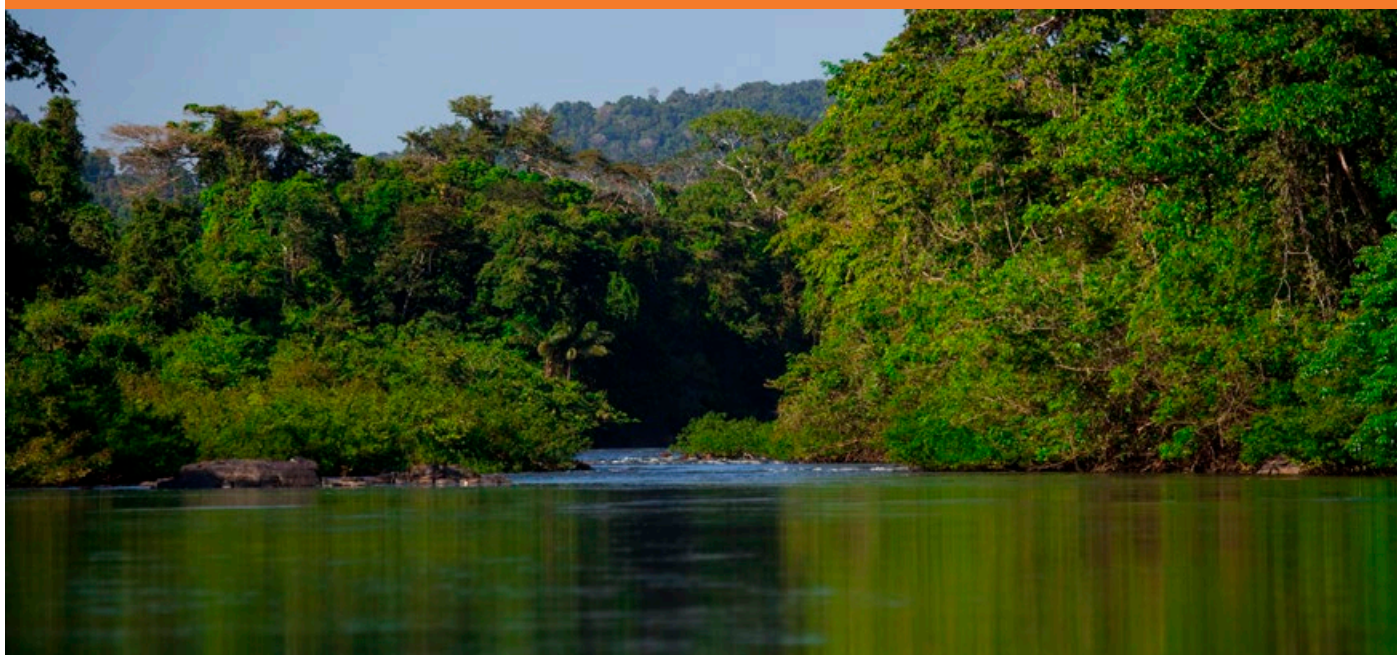




RELATÓRIO DE ATIVIDADES
ITV
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



Há dez anos a Vale criou o Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS), com o propósito de gerar oportunidades para a obtenção de conhecimento sobre o uso sustentável de recursos naturais, a partir da tríade: pesquisa, educação e empreendedorismo.

Sediado em Belém, o ITV DS se volta especialmente para o maior bioma brasileiro, a Amazônia, fomentando a produção científica e investindo em sua aplicação prática para o desenvolvimento social, econômico e ambiental da Região Amazônica.

Nesse sentido, o ITV DS inova ao qualificar e integrar talentos das comunidades locais e de todo o Brasil, que perseguem a descoberta de soluções para os desafios de uma produção cada vez mais sustentável. Assim, cria também caminhos de presente e de futuro por meio da pesquisa e do desenvolvimento de tecnologias científicas e sociais para uma mineração mais sustentável.

São esses os caminhos que buscamos compartilhar nesta publicação, que reúne algumas das recentes realizações do ITV DS.

Boa leitura!



Hugo Barreto

Diretor de Investimentos Sociais e Sustentabilidade da Vale

O ITV é uma iniciativa que agrega valor ao grande capital técnico da Vale, além de contribuir para sua visão de futuro e sustentabilidade de seu principal negócio.

Apresentação



O Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS) foi criado em 2009, após ampla discussão entre representantes da academia, governo e indústria. Originalmente, esta nova unidade desenvolveria pesquisas que orientassem o futuro da Vale, com foco em questões estratégicas e em horizontes de longo prazo. Com as mudanças no mercado mundial das commodities minerais, ocorridas em 2014, o ITV reorientou seu plano, passando a atuar em desafios e temas críticos mais imediatos para as operações da empresa.

Nossas pesquisas estão direcionadas, principalmente, aos diversos aspectos da mineração neste imenso bioma que é a Amazônia, onde os desafios para seu progresso são proporcionais à sua extensão territorial e grande biodiversidade. Nos últimos quatro anos, o ITV ajustou o perfil de seus pesquisadores, reestruturou a agenda de pesquisa e passou a trabalhar de maneira mais alinhada às necessidades da Vale, gerando informações importantes para o licenciamento e manejo dos recursos naturais nos territórios adjacentes e comunidades das áreas onde atua. As pesquisas abordam aspectos diversos da mineração, contribuindo com esforços direcionados à conservação da biodiversidade, segurança ambiental e desenvolvimento social. Os temas pesquisados têm abordagem interdisciplinar em recursos

naturais e meio físico, biodiversidade e serviços ecossistêmicos, ecologia das cangas e cavernas, genômica e genética da paisagem, florestas, rios e clima, recuperação ambiental de áreas degradadas, socioeconomia, sustentabilidade e computação. Os projetos são induzidos e buscamos contribuir para o uso eficiente dos recursos naturais, para obtenção de licença técnica e social para operar e garantir o mínimo de impacto líquido negativo ao meio ambiente, com propósito de gerar riquezas e benefícios compartilhados com a sociedade.

Também oferecemos um curso de Mestrado Profissional voltado para o uso e manejo de recursos naturais em regiões tropicais, sendo esta uma iniciativa pioneira no setor privado no Brasil e de grande impacto para a Amazônia.

Este relatório apresenta uma síntese das principais atividades de pesquisa desenvolvidas. Muitas dessas pesquisas já estão publicadas em periódicos científicos renomados nas suas respectivas áreas de conhecimento. Nossa missão é gerar conhecimento para uma mineração sustentável. Conciliar a lógica da pesquisa científica com a do negócio e fazer isto na medida certa é o nosso maior desafio. Boa leitura.

José Oswaldo Siqueira

Diretor do Instituto Tecnológico Vale do Pará

Sumário

ITV - Instituto Tecnológico Vale

Quem Somos

Produção Técnica e Científica

Mestrado Profissional

Pesquisas ITV

Mudanças da Cobertura e Uso do Solo

Recursos Hídricos

Geologia e Geoquímica Ambiental

Tempo e Clima

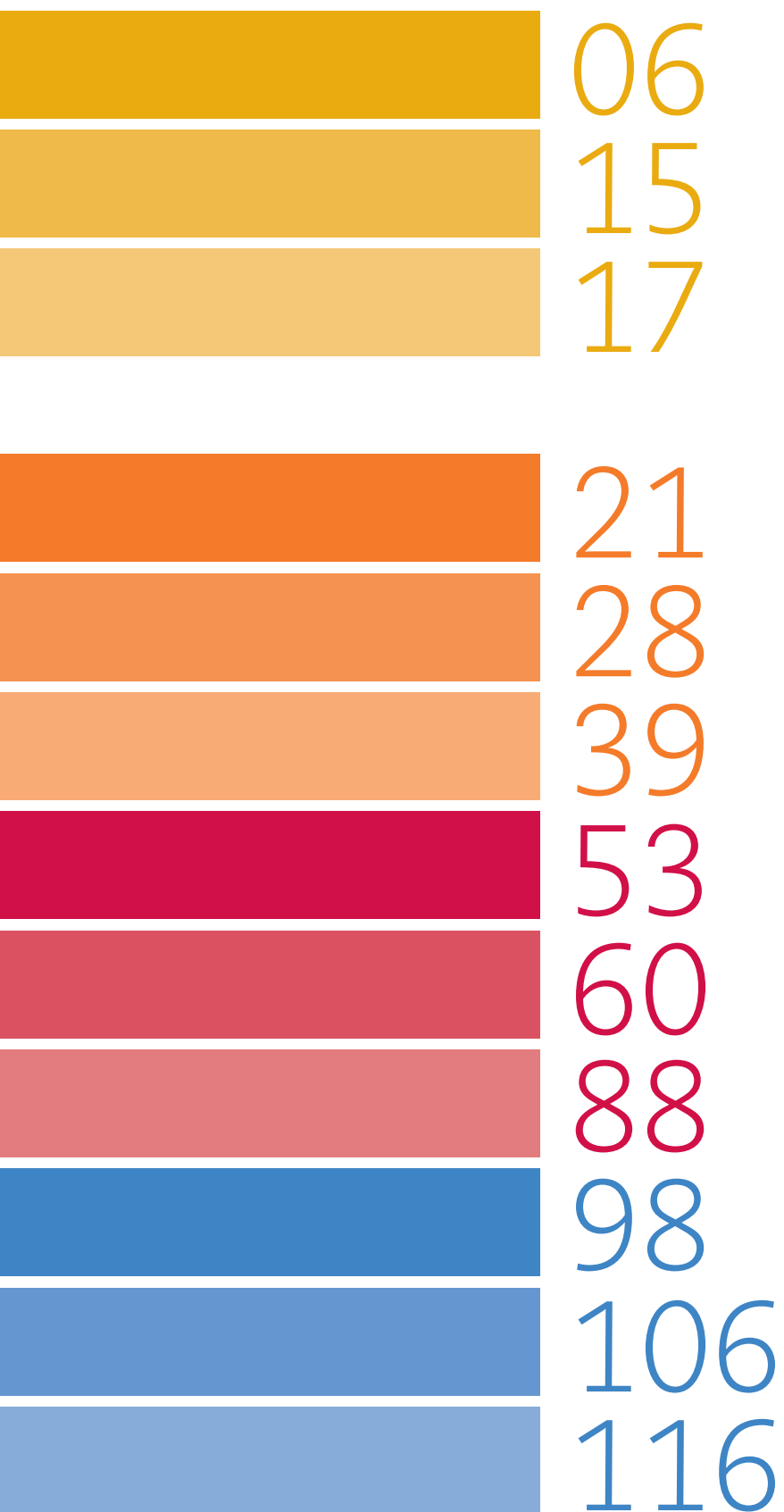
Biodiversidade e Serviços de Ecossistemas

Genômica Ambiental e Bioinformática

Recuperação de Áreas Degradadas

Socioeconomia

Computação Aplicada



Quem somos?

O Instituto Tecnológico Vale é uma associação civil com fins não econômicos criado em 2009 pela sua mantenedora, a Vale SA. Entre seus objetivos está a geração de conhecimento e o desenvolvimento de competências em mineração e sustentabilidade (Figuras 1).

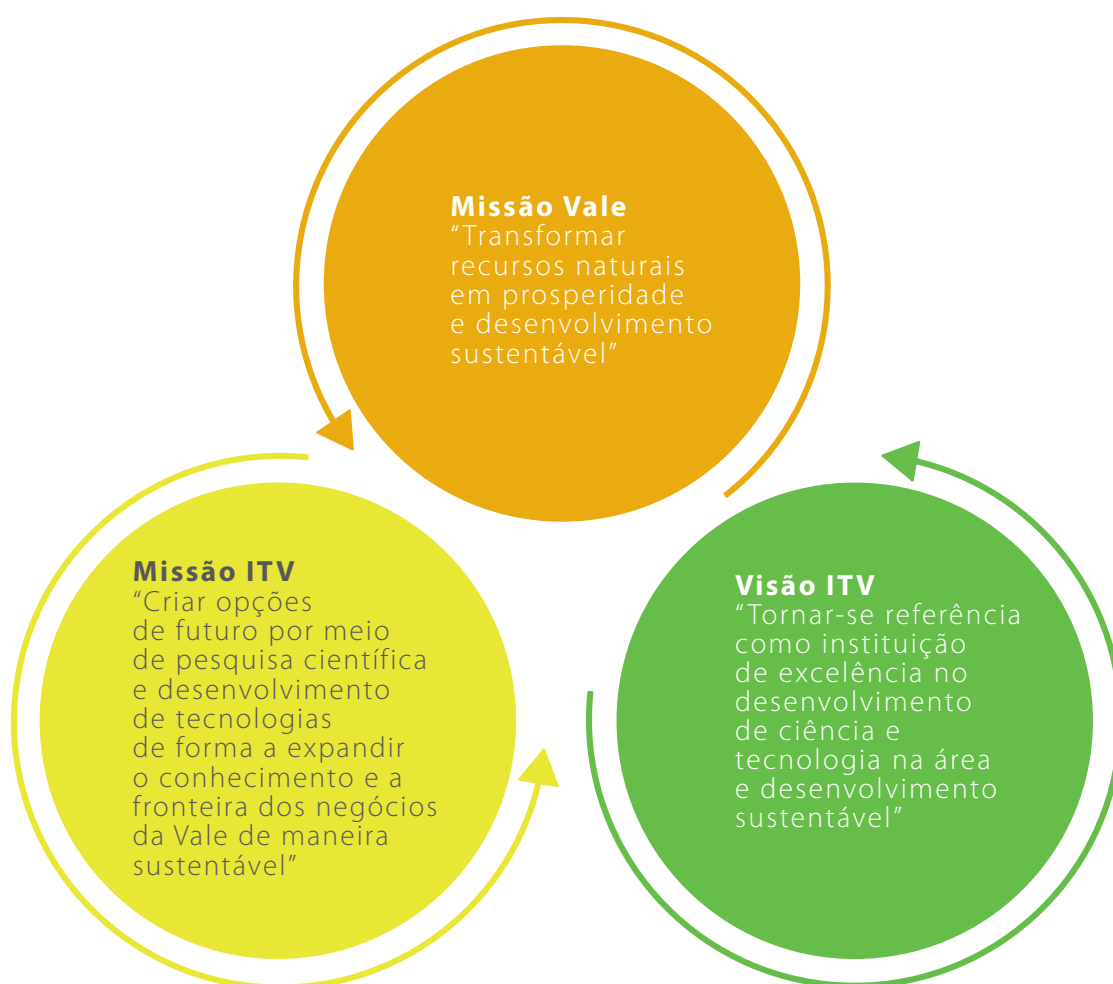


Figura 1: Missão da Vale refletida pela Visão e Missão do Instituto Tecnológico Vale.

O Instituto Tecnológico Vale

Desenvolvimento Sustentável

Sediado na cidade de Belém, no estado do Pará, está bem estruturado para desenvolver pesquisa em vários campos e possui um quadro com pesquisadores e 56 pesquisadores bolsistas com especialidades diversas, conforme o quadro a seguir.

Pesquisador/Titulação Área	Especialidade
Cecilio Frois Caldeira Junior, Ph.D. em Biologia Vegetal	Fisiologia Vegetal
Claudia Priscila Wanzeler da Costa, Ph.D. em Clima e Ambiente	Modelagem climática e mudança do clima
Clovis Wagner Maurity, MSc. Geologia e Geoquímica	Geoquímica de Superfície/Espeleologia
Daniela Cristina Zappi, Ph.D. em Ciências	Botânica
Douglas Batista da Silva Ferreira, MSc. Ciências Ambientais	Meteorologia e modelagem numérica
Elena Leonidovna Babiitchouk, Ph.D. em Genética	Biologia Molecular de Planta
Gisele Lopes Nunes, Ph.D. Microbiologia Agrícola	Bioinformática/Biologia Molecular
Guilherme Correa de Oliveira, Ph.D. Biologia Molecular	Genômica e Bioinformática
Jair da Silva Ferreira Junior, MSc. Ciência da Computação	Des. de sistemas e inteligência artificial
Jorge Manuel Filipe dos Santos, Ph.D. Engenharia Geográfica	Socioeconomia e Cartografia
Jose Augusto Pires Bitencourt, Ph.D. Biologia Marinha	Microbiologia Ambiental
Jose Tasso Felix Guimaraes, Ph.D. Geologia e Geoquímica	Sedimentologia e Paleontologia
Luciano Costa, MSc. Apicultura	Ecologia e biologia de abelhas
Marcio Sousa da Silva, MSc. Geologia e Geoquímica	Geofísica e Recursos Hídricos
Markus Gastauer, Ph.D. Botânica e Recuperação Ambiental	Ecologia da reabilitação
Mauricio Takashi Coutinho Watanabe, Ph.D. em Ciências	Botânica
Paulo Rogenes Monteiro Pontes, Ph.D. Recursos Hídricos e Saneamento	Recursos Hídricos
Pedro Walfir Martins e Souza Filho, Ph.D. Geologia	Sensoriamento Remoto e Geomática

Pesquisador/Titulação área	Especialidade
Prafulla Kumar Sahoo, Ph.D. em Geoquímica	Geoquímica ambiental
Rafael Borges da Silva Valadares, Ph.D. Solos e Nutrição de Plantas	Microbiologia e Proteômica
Renata Gonçalves Tedeschi, Ph.D. em Meteorologia	Climatologia
Renato Oliveira da Silva Junior, Ph.D. Ciências Ambientais	Geoquímica/ Hidrologia
Roberto Dall Agnol, Ph.D. Geologia	Geoquímica ambiental
Rodolfo Jaffe Ribbi, Ph.D. Ecologia	Genética da Paisagem
Ronnie Cley de Oliveira Alves, Ph.D. Inteligência Artificial	Aprendizado de máquinas e bioinformática
Rosa de Nazare Paes da Silva, Ph.D. Agronomia	Desenvolvimento rural
Rosane Barbosa Lopes Cavalcante, Ph.D. Recursos Hídricos e Saneamento	Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Samia do Socorro Serra Nunes, Ph.D. Ciências Ambientais	Restauração Florestal
Santelmo Selmo de Vasconcelos Junior, Dr. Biologia Vegetal	Genética e Biologia Molecular
Sergio Ivan Viademonte da Rosa, Ph.D. Computação	Sistemas Inteligentes/ Análise de Dados
Silvio Junio Ramos, Ph.D. Ciência do Solo	Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas
Tereza Cristina Giannini, Ph.D. em Ecologia	Serviços Ecossistema
Valente Jose Matlaba, Ph.D. em Economia	Economia e desenvolvimento
Vera Lucia Imperatriz Fonseca, Ph.D. em Ecologia	Biodiversidade/ Serviços Ecossistemas
Wilson da Rocha Nascimento Junior, Ph.D. em Geologia	Geomática/ Sensoriamento Remoto

Tabela 1: Quadro profissional dos pesquisadores do ITV e suas especialidades.

Em que e como atuamos?

O ITV DS é uma instituição de Ciência e Tecnologia (ICT) privada que realiza ações de pesquisa e desenvolvimento em temas estratégicos para a sustentabilidade do setor mineral. Atua na pesquisa e ensino nas áreas de biodiversidade, serviços ambientais, recursos hídricos, socioeconomia, genômica ambiental, reflorestamento com espécies nativas, recuperação de áreas degradadas, ocupação e uso da terra, mudanças do clima, entre outros.

A agenda de pesquisa é bem dinâmica, passando por adequações em função da maturidade do Instituto, de seus profissionais e, principalmente, das

orientações estratégicas e demandas específicas da empresa. Os temas estruturantes da agenda de pesquisa são construídos de acordo com as diretrizes e políticas da Vale, tendo a sustentabilidade como o pilar central da atuação da unidade.

Com a criação da Diretoria Executiva de Sustentabilidade, o ITV DS migrou da Gerência de Tecnologia e Inovação para esta nova estrutura. As principais áreas e os respectivos temas de pesquisa, assim como as finalidades dos resultados gerados para a empresa, estão destacados na Figura 2.

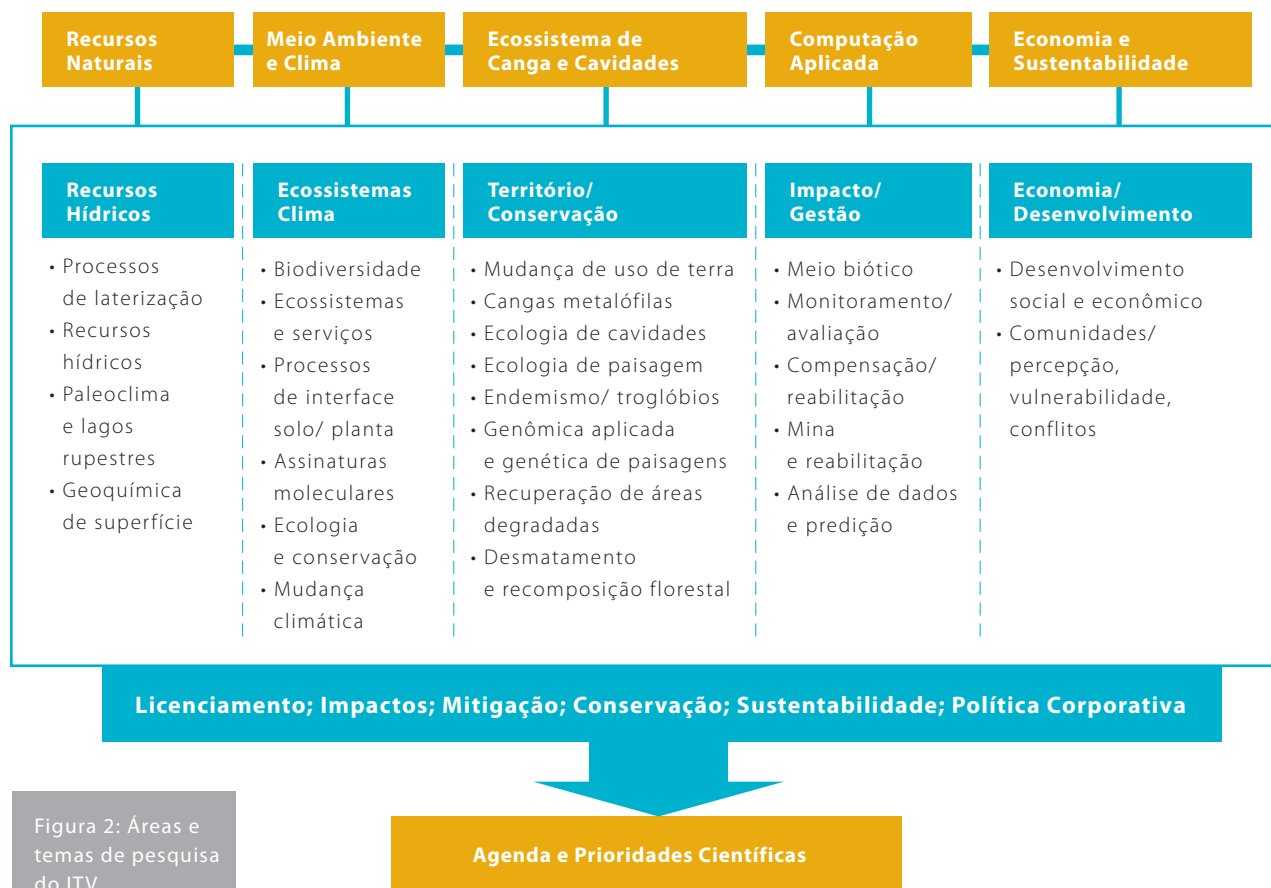


Figura 2: Áreas e temas de pesquisa do ITV.

O ITV tem o desafio de conciliar e integrar os interesses da indústria com a abordagem técnico-científica (Figura 3). Realiza pesquisa fundamentada e aplicada, capaz de agregar valor e sustentabilidade ao negócio. A Figura 3 mostra uma síntese das características típicas desta pesquisa para a empresa, destacando-se a finalidade, orientação, compromisso, o aspecto tempo, a necessidade de publicações e, acima de tudo, uma visão de conhecimento inovador para a sustentabilidade do negócio.

As pesquisas seguem os princípios do método científico enquanto buscam a solução de problemas enfrentados pela indústria mineral. Por um lado, os resultados das pesquisas precisam ser validados pela academia, sendo submetidos a processos de peer-review, por meio de publicações científicas. Por outro lado, os resultados dessas pesquisas precisam contribuir de forma rápida para solucionar problemas enfrentados pela mineração. Uma vez publicada, a pesquisa ganha visibilidade e credibilidade, validando o conhecimento gerado no instituto.

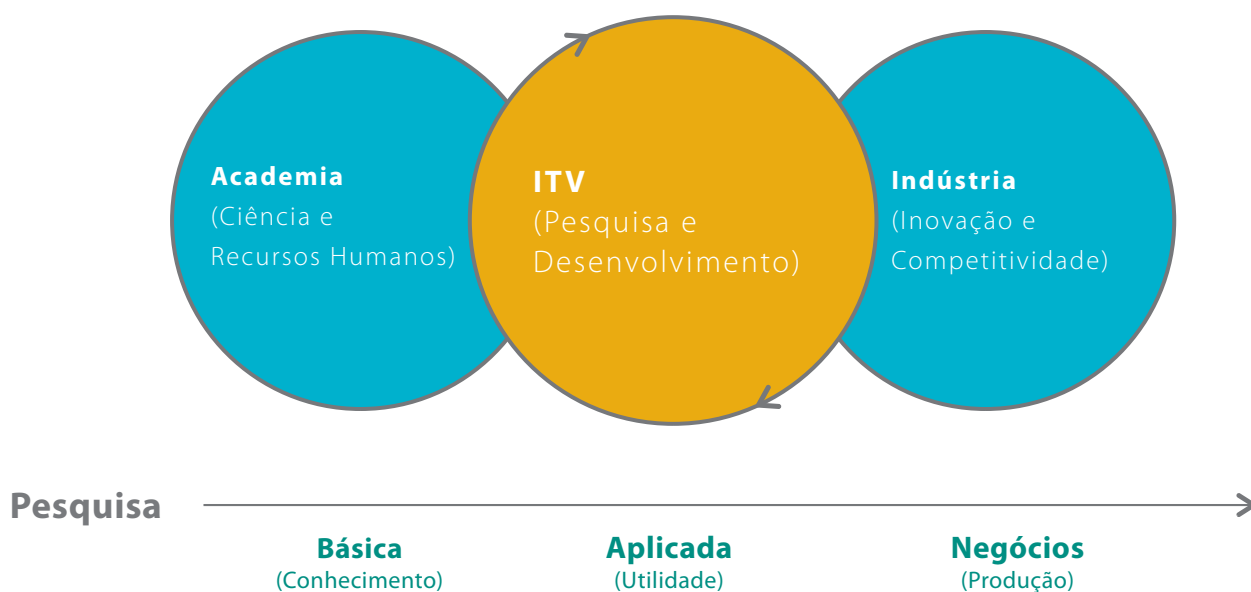


Figura 3: Posicionamento do ITV em relação à pesquisa, evidenciando o papel principal de conectar o conhecimento acadêmico às necessidades e desafios da indústria.

O ITV desenvolve, atualmente, diversos projetos que se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento (Tabela 2).

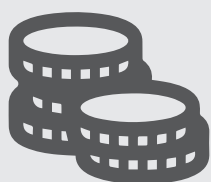
Nº	Projeto	Objetivo	Área Responsável
1	Estudo de Lagoas de Altitude	Promover estudos interdisciplinares, com base em evidências geológicas, geomorfológicas, sedimentológicas e palinológicas, para reconstrução do paleoambiente e mudanças paleoclimáticas nas lagoas do Platô Sul de Carajás.	Geologia Ambiental e Recursos Hídricos
2	Recursos Hídricos na Bacia do Rio Itacaiúnas	Realizar monitoramento integrado dos recursos hídricos da bacia. Estabelecer o controle de qualidade quanto à geração de dados e informações consistentes a fim de garantir a sustentabilidade e manutenção dos ecossistemas e o atendimento das demandas de água na área da bacia.	Geologia Ambiental e Recursos Hídricos
3	Background Geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas	Promover o mapeamento geoquímico para definição da distribuição espacial de elementos químicos em solos, águas superficiais e sedimentos de leitos de rios e estabelecimento de valores referenciais de ocorrência (background e baseline geoquímicos) para 43 elementos químicos.	Geologia Ambiental e Recursos Hídricos
4	Formação das Crostas Ferruginosas	Estudar os processos de formação da canga ferruginosa (lateritas) que recobre os platôs da Serra dos Carajás como subsídio para a compreensão da evolução da paisagem e da influência de processos de sua formação.	Geologia Ambiental e Recursos Hídricos
5	Mudanças de Uso e Ocupação da Terra	Compreender e quantificar as mudanças de cobertura e uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas organizando um banco de imagens e dados geoespaciais que possam servir de referência no futuro para identificar modificações antropogênicas na paisagem (visualização da dinâmica multitemporal).	Tecnologia Ambiental
6	Técnicas de Revegetação para RAD	Desenvolver técnicas de revegetação de áreas impactadas em Carajás por meio do estudo de substratos, emprego de plantas nativas e implantação de técnicas de plantio mais eficientes.	Tecnologia Ambiental
7	Monitoramento e Definição de Indicadores de Recuperação	Aplicar indicadores e monitoramento de áreas em fase de recuperação com objetivo de verificar a evolução da Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) e permitir ajustes no manejo.	Tecnologia Ambiental
8	Tempo e Clima	Avaliar, por meio de modelagem matemática, os fenômenos meteorológicos causadores de interrupções nas atividades operacionais da Vale e prover previsões de variáveis atmosféricas, com horizonte de curto, médio e longo prazos.	Tecnologia Ambiental
9	Flora das Cangas de Carajás	Desenvolver estudos sobre as cangas de Carajás, com análise geral da flora, raridade e endemismo das espécies relacionadas à mineração e com potencial para uso na revegetação e outros usos.	Biodiversidade e Serviços de Ecossistema
10	Biodiversidade na Mineração	Estudar a biodiversidade de canga e vegetações abertas da Amazônia, com ênfase na análise do impacto da mudança climática devido à atividade antropogênica buscando determinar espécies para uso na revegetação; áreas potencialmente adequadas para as espécies no futuro. Análises de genômica da paisagem para identificar áreas chave para proteger a diversidade genética das espécies.	Biodiversidade e Serviços de Ecossistema
11	Serviços Ambientais	Avaliar e testar uma metodologia para valorar, do ponto de vista econômico, os serviços ecossistêmicos providos pelas áreas protegidas pela Vale (RPPN* Mata do Jambreiro do Quadrilátero Ferrífero - MG e a área de Compensação Ambiental Serra da Bocaina, adjacente à Serra dos Carajás - Pará).	Biodiversidade e Serviços de Ecossistema

* Reserva de Patrimônio Particular Natural

12	Impactos Climatológicos na Biodiversidade	Identificar as principais espécies da fauna que executam funções de polinizadores, dispersores de sementes e controle biológico, buscando proteger os serviços de ecossistema prestados por elas. O projeto tem foco nas abelhas, aves, morcegos e subsidia a modelagem de dados, com o objetivo de compreender o funcionamento ecossistêmico atual e futuro da fauna sob impacto de uma potencial mudança climática.	Biodiversidade e Serviços de Ecossistema
13	Genômica de Plantas de Canga	Gerar conhecimento científico de base genética e genômica da flora da canga, por meio da produção em escala de códigos de barras de DNA para espécimes de plantas, a fim de verificar a diversidade intraespecífica, promover análises comparativas e avaliar relações evolutivas.	Genômica Ambiental
14	Ecologia e Biodiversidade de Cavernas	Fazer uso de ferramentas de biologia molecular para identificar, avaliar e monitorar a biodiversidade cavernícola de maneira rápida, objetiva e de baixo custo. Promover o levantamento de assinaturas moleculares de cavernas a partir da microbiota, por meio de DNA ambiental e de proteínas correlacionadas com a biodiversidade cavernícola. Desenvolver estudo do efeito da biota e da ecologia de troglobios e morcegos sobre a relevância da cavidade.	Genômica Ambiental
15	Socioeconomia na Mineração	Realizar estudos socioeconômicos e sobre relacionamentos de comunidades com a Estrada de Ferro de Carajás (EFC), a fim de contribuir com o entendimento em relação à vulnerabilidade social, interdições e desenvolvimento sustentável dessa região. Diagnosticar as potencialidades e oportunidades de desenvolvimento nos territórios em torno da Estrada.	Socioeconomia e Sustentabilidade
16	Identificação Digital: Plantas e Abelhas	Desenvolver métodos e técnicas computacionais de inteligência artificial para automatização do processo de identificação de plantas e abelhas.	Computação Aplicada
17	Análise Visual de Dados	Desenvolver soluções de análise de segurança para áreas operacionais da Vale através do uso de tecnologias digitais difusas (detecção e monitoramento) e técnicas de engenharia de software (middleware). Realiza análise de incidentes.	Computação Aplicada
18	Inspeção de Vagões	Desenvolver tecnologias e modelos analíticos para aumentar a assertividade das análises de danos e desgaste de equipamentos, diminuindo o tempo gasto para a realização das verificações e manutenções de maquinário operacional.	Computação Aplicada
19	Treinamento Cognitivo	Desenvolver um programa de aprimoramento cognitivo para operadores de escavadeira por meio da inteligência artificial, processamento digital de sinais biológicos, treinamento cognitivo e realidade virtual.	Computação Aplicada

Tabela 2: Lista dos principais projetos em desenvolvimento no ITV.

US\$ 10 MM



Orçamento 2019

35



Pesquisadores

56

Pesquisadores
Bolsistas



19

Pessoal
Administrativo



60



Mestres Formados

54

Mestrandos
Matriculados



6

Linhas de
Pesquisa



10

Temas
Prioritários



392



Publicações
Técnico-Científicas

10

Laboratórios
de Pesquisa



6

Equipamentos de Grande Porte,
Microscópios, Sequenciadores
de DNA e Computadores de
Alto Desempenho



+40



Parcerias e
Colaborações

4



Livros
Publicados

As parcerias complementam as competências não existentes na unidade, sendo realizadas por meio de Acordos de Cooperação e pela colaboração entre pesquisadores. O Instituto considera as instituições locais – Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, Universidade Federal do Pará, Universidade Federal Rural da Amazônia e Instituto SENAI de Inovação – como parceiros estratégicos para sua agenda de pesquisa fortalecendo o desenvolvimento local da rede de especialistas.

A rede de relacionamentos do ITV é dividida em 4 grupos principais: Áreas de negócio da Vale; parcerias com ICTs e Universidades nacionais; ICTs e Universidades internacionais e Instituições governamentais e agências de fomento e amparo à pesquisa (Figura 4).

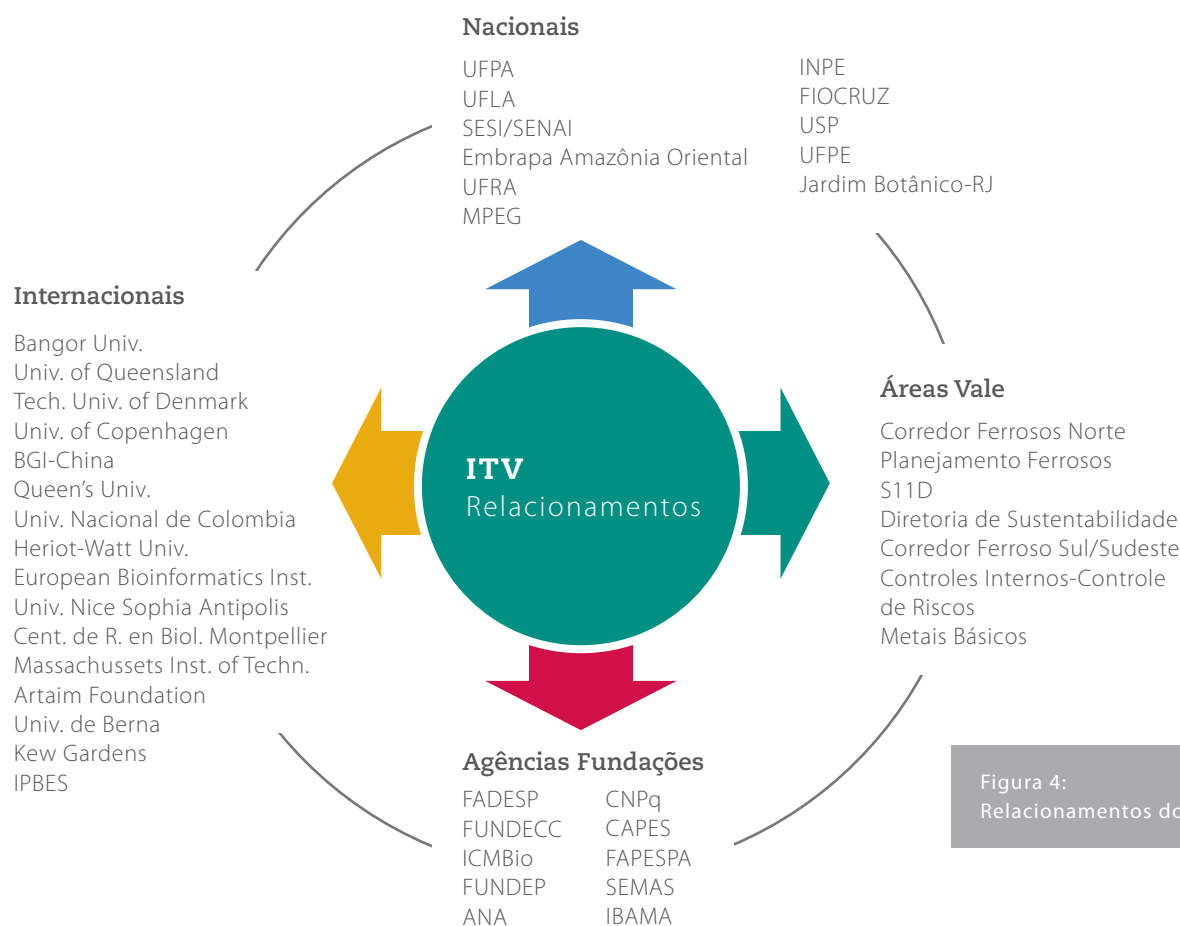


Figura 4:
Relacionamentos do ITV.

As parcerias com as agências de fomento governamentais – CAPES (Coordenação de Apoio à Pesquisa e Ensino Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – são de grande importância para a agenda

de pesquisa do ITV. Por meio delas, o Instituto viabiliza a concessão de bolsas em diversas modalidades para pesquisadores e alunos do mestrado. Em 2019, contamos com 56 bolsistas, em diversas modalidades, com estudos nas temáticas da agenda de pesquisa do ITV.

Produção Técnica e Científica do ITV

A produção técnica e científica do Instituto torna-se cada vez mais expressiva, cumprindo o papel de gerar conhecimento (Figura 5). Estas publicações reportam resultados relevantes dos projetos nos diversos períodos de atuação do Instituto.

Como exemplos de artigos publicados, destacamos:

Biogeochemical processes in canga ecosystems: Armoring of iron ore against erosion and importance in iron duricrust restoration in Brazil. **Ore Geology Reviews**, abr. 2019.*(A)

Biodiversity surrogates in Amazonian iron cave ecosystems. **Ecological Indicators**, jun. 2019.*(B)

Complete mitochondrial genomes of three troglophile cave spiders (Mesabolivar, pholcidae). **Mitochondrial DNA Part B**, dez. 2018.*(C)

Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. **Water Resources Research**, abr. 2019.*(D)

Valuing nature's contribution to people: The pollination services provided by two protected areas in Brazil. **Global Ecology and Conservation**, set. 2019.*(E)

Plotting a future for Amazonian canga vegetation in a campo rupestre context. **PlosOne**, ago. 2019.*(F)

Landscape genomics to the rescue of a tropical bee threatened by habitat loss and climate change. **Evolutionary Applications**, mar. 2019.*(G)

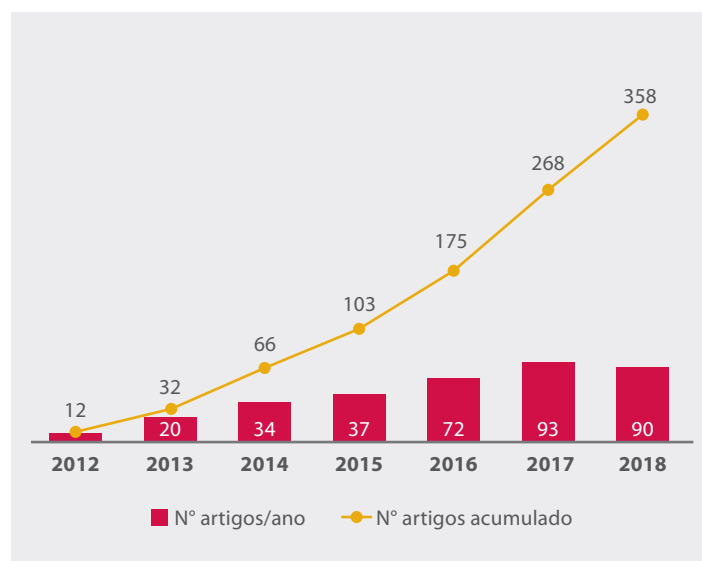


Figura 5. Crescimento anual e acumulado do número de artigos do ITV.

A metagenomic survey of soil microbial communities along a rehabilitation chronosequence after iron ore mining. **Scientific Data**, fev. 2019.*(H)

Os volumes especiais da revista Rodriguésia sobre a Flora das Cangas da Serra dos Carajás, em cooperação técnico-científica com o Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). A totalidade dessa flora foi descrita em quatro fascículos, após a realização de um projeto que incluiu coletas e estudos das espécies consideradas especiais (plantas ameaçadas, endêmicas, raras, invasoras e de importância para recuperação de áreas degradadas). (Figuras: 6 e 7).

*(A) doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.03.013oregeorev.2019.03.01

*(B) doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.086

*(C) doi.org/10.1080/23802359.2018.1547139

*(D) doi.org/10.1029/2019WR025083

*(E) doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00782

*(F) doi.org/10.1371/journal.pone.0219753

*(G) onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/eva.12794

*(H) doi.org/10.1038/sdata.2019.8

Figura 6: Quatro fascículos da Revista Rodriguésia com artigos científicos de descrição da Flora de Carajás.



De acordo com o critério de qualidade dos periódicos nacionais e internacionais utilizado pela CAPES, denominado QUALIS, 42% das produções científicas do Instituto estão classificadas como A1 e A2, ou seja, são publicações de elevada qualidade, o que as tornam referências internacionais.



Figura 7: Publicação sobre Paisagens e Plantas de Carajás; Guia das Espécies Invasoras; Plantas nativas para recuperação de áreas de mineração em Carajás; Guia de Plantas para a Recuperação de Áreas Degradadas nas Cangas do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais e de Carajás.

Resultados de pesquisas sobre a biodiversidade em áreas de atuação da Vale também são disponibilizados de maneira mais acessível para o público em geral na forma de livros e guias.

Mestrado Profissional

Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais



Figura 8: Estudantes do Mestrado Profissional.

Para contribuir com a formação de recursos humanos na Região Norte do Brasil, o ITV criou o Mestrado Profissional em "Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais" (Figura 8) com duas áreas de concentração: "Socioeconomia e Sustentabilidade na Mineração" e "Uso Sustentável dos Recursos Biológicos". Essas áreas dão suporte a seus principais objetivos:

- Formar profissionais capacitados a enfrentar questões relacionadas com o aproveitamento de recursos naturais e atender as novas demandas da sociedade por um desenvolvimento sustentável;
- Proporcionar visão sistêmica e integrada do uso de recursos naturais e contribuir para a geração de inovação tecnológica baseada na visão sistêmica de sustentabilidade desses recursos.

O curso foi reconhecido pela CAPES em 2012 e está em sua sexta turma, em sistema semipresencial. Em 2019, foram oferecidas 35 vagas, sendo 12 destinadas aos empregados Vale e de empresas controladas e coligadas, e 23 à comunidade em geral. Para dar mais aderência do curso de pós-graduação às iniciativas do Programa do Estado do Pará 2030 e às políticas da Vale, o ITV criou uma ação especial denominada Programa de Mestrados Residentes Pará. Esta iniciativa está vinculada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS) e destina dez bolsas de estudo para candidatos residentes do estado que desenvolvam pesquisas nos temas dos 17 ODS.

O corpo docente é formado por 23 docentes, que atuam como

professores permanentes, e quatro colaboradores. A atuação cada vez mais integrada dos grupos de pesquisa do Instituto tem se refletido na reformulação da grade curricular do curso, criando disciplinas que envolvem professores de grupos distintos e são efetivamente de caráter interdisciplinar.

Os estudantes originam-se de diferentes áreas da Vale e da comunidade. Isso contribui para a integração do ITV às unidades da empresa e à sociedade como um todo. Ao longo de seus seis anos de existência, o programa tem recebido crescente reconhecimento tanto pelas áreas da Vale, que a cada ano enviam mais empregados para se capacitarem, como também pela demanda externa que compõe o maior público do curso (Figura 9).



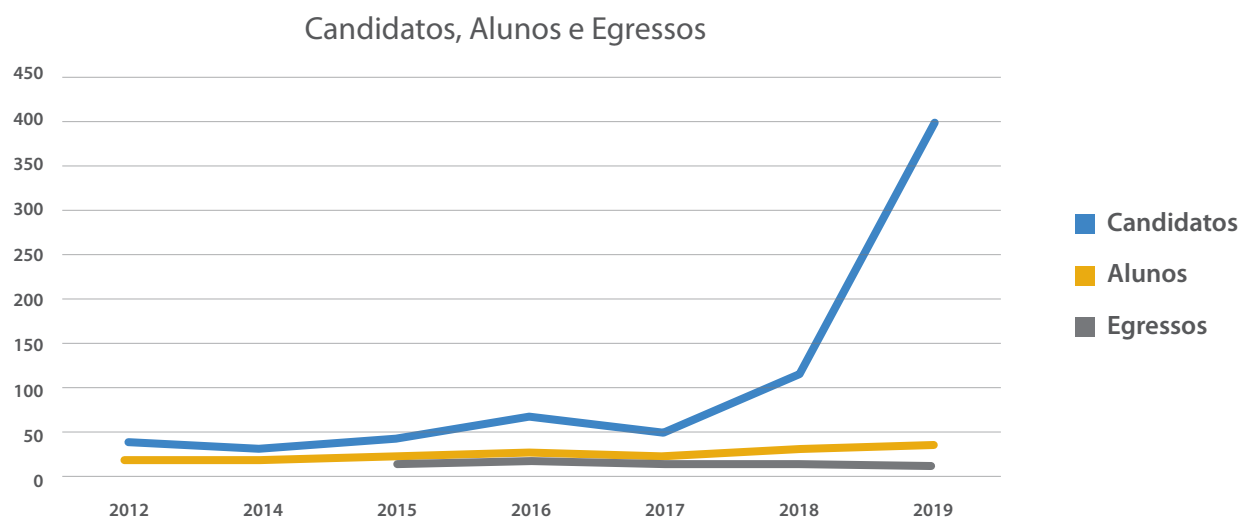


Figura 9: Candidatos inscritos, selecionados e egressos dos anos anteriores e 2019 do curso.



Figura 10: Principais temas presentes nas dissertações e produções técnicas do Mestrado.

Alunos Egressos

Os mestres formados devem apresentar capacidade de análise crítica e visão sistêmica dos temas abordados (Figura 10).

A realização desta pós-graduação facilita a maior inserção dos alunos tanto no setor privado quanto no público em áreas relacionadas à sustentabilidade (Figura 11). Parte dos alunos prossegue com sua formação acadêmica ingressando em programas de doutorado, atuando em diversas instituições de ensino públicas ou privadas, bem como em empresas do setor.



Figura 11: Situação dos alunos egressos.



Pesquisas ITV

Mudanças da Cobertura e Uso do Solo

Evolução do Desmatamento da Amazônia Legal desde a década de 1970

Entender a evolução do desmatamento na Amazônia Legal é de suma importância para o planejamento da conservação dos recursos naturais na região. Iniciativas como o Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite (PRODES) – de responsabilidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – monitora as taxas de desmatamento na Amazônia Legal desde 1988, gerando informações que são usadas pelo governo brasileiro para o estabelecimento de políticas públicas na área ambiental. Com base nas taxas de desmatamento da Amazônia brasileira, estima-se que 20% da área de florestas foram desmatadas e que a temperatura na região aumentou cerca de 1° Celsius nos últimos 60 anos.

Com o melhor entendimento dessa questão, o ITV realizou uma análise de séries históricas de imagens dos satélites *Landsat*. A análise mostra que aproximadamente 780.000 km² de florestas já foram suprimidos até o momento na Amazônia Brasileira (Figura 12). Esse valor representa 16% da área de floresta da região. Uma plataforma digital foi desenvolvida para essa pesquisa, de onde foram extraídos os dados de desmatamento de 1972 a 2017, conforme ilustrado na Figura 13, complementando a série histórica do PRODES gerada pelo INPE (1988-2017).

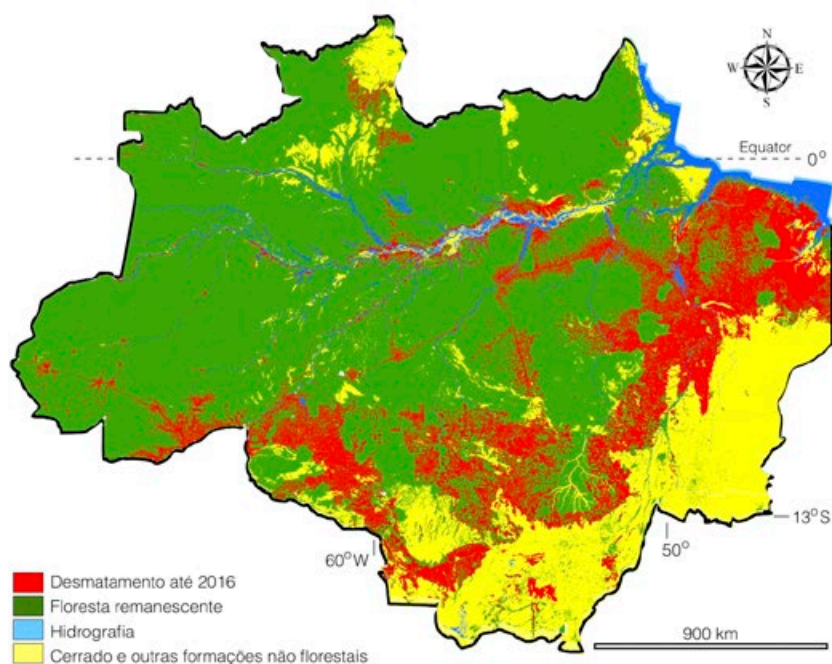


Figura 12: Mapa do desmatamento da Amazônia Legal.
Fonte: PRODES, 2017.

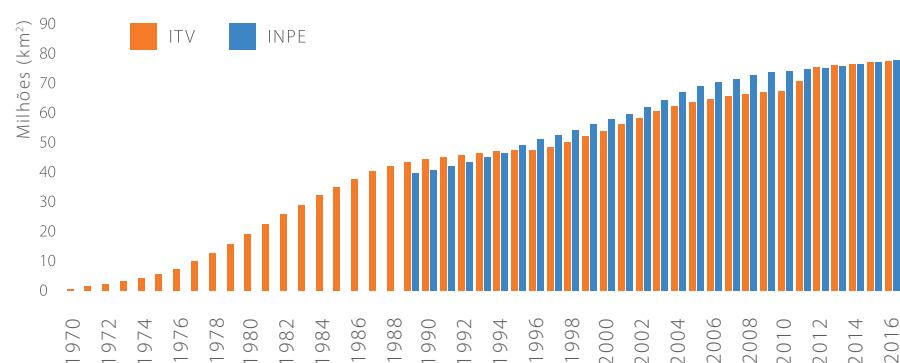


Figura 13: Série histórica do desmatamento calculado a partir de imagens de satélites da série Landsat.

As pesquisas também incluem a compilação de dados do inventário florestal, assim como a estimativa de estoque e perda de carbono em consequência do desmatamento.

Entre outras funções, essas análises contribuem para entender melhor o processo de ocupação territorial da Amazônia desde a implantação dos grandes projetos de infraestrutura, incluindo a construção de rodovias,

como a Transamazônica, a BR-364 e a BR-010, entre outras; a instalação das hidroelétricas de Tucuruí, Samuel, Balbina; e a implantação dos grandes projetos de mineração, como o de ferro em Carajás (PA), o de bauxita em Oriximiná (PA) e Juruti (PA), e o de cassiterita em Ariquemes (RO).

Dessa forma, foi possível estimar o impacto direto da exploração mineral sobre a cobertura nativa de florestas e savanas, conforme apresentado a seguir.

Atividades de Mineração na Amazônia

A Amazônia Legal possui um total de 5,2 milhões de km². Desses, 1.084,7 km² de cobertura nativa foram suprimidos, em decorrência das atividades de mineração em treze regiões analisadas (Tapajós, Carajás, Xingu, Peixoto de Azevedo, Trombetas/Juruti, Capim, Pitinga, Ariquemes, Pontes e Lacerda, Amanã, Amapá, Barcarena e Madeira)*. A área suprimida corresponde a 0,02% da Amazônia Legal e a 0,14% de toda a área desmatada na região. A mineração em pequena escala (garimpo) compreende 64% da área total de mineração, enquanto

a industrial representa 36%. Em relação ao total minerado, a maior parte (74%) das áreas está localizada no estado do Pará, seguido por Mato Grosso, Rondônia, Amazonas e Amapá (Figura 14A).

A mineração de ouro utiliza 58,7% dessa área total minerada; a de cassiterita, 13,5%; a de bauxita, 12,8%; a de ferro, 6,4% e a de cobre, 5,3% (Figura 14B). É importante destacar o baixo impacto da mineração de ferro sobre a cobertura florestal e a elevada contribuição dessa commodity para a balança comercial positiva do estado do Pará.

A área suprimida em decorrência das atividades minerais corresponde a 0,02% da Amazônia Legal e a 0,14% de toda área desmatada da região, dos quais 6,40% correspondem à mineração de minério de ferro.

* dx.doi.org/10.3390/rs10081178

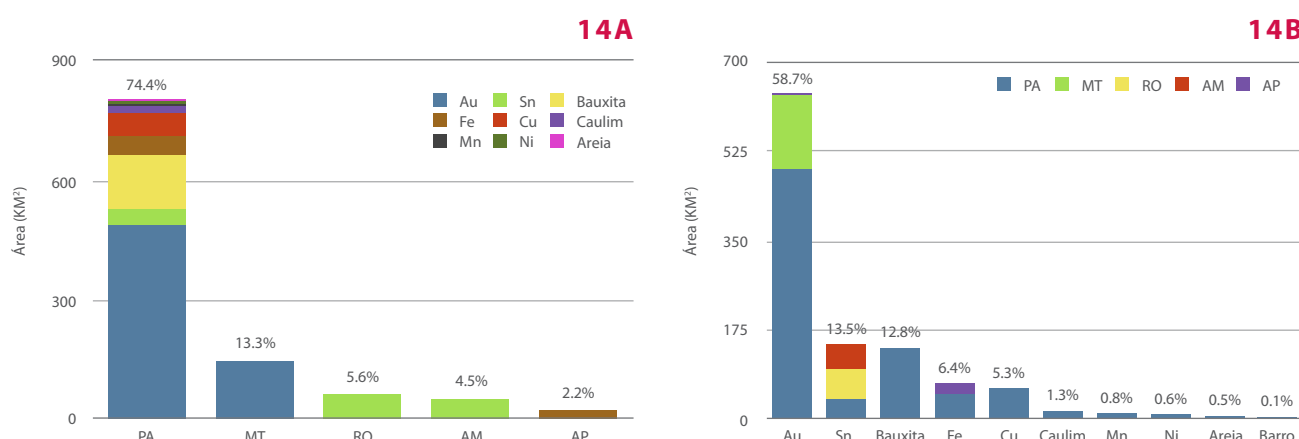


Figura 14: Distribuição da área de mineração (km²) com base nos tipos de minerais (A): Au - ouro; Fe-ferro; Mn - manganês; Sn - estanho; Cu - cobre; Ni - níquel; e nos diferentes estados da Amazônia (B): AM, AP, MT, PA, RO*.

Mudanças do Uso da Terra na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

As mudanças mais acentuadas na cobertura e no uso da terra na Amazônia começaram no início de 1970 (Figura 13), com a implantação da Rodovia Transamazônica. A floresta foi desmatada para a implantação de assentamentos rurais, colonização agrícola e expansão de pastagens. Coincidentemente, o mapeamento e o monitoramento das mudanças na paisagem por meio de imagens de satélite em grande escala foram possíveis a partir de 1972, com o lançamento do primeiro satélite, *ERTS-1*, da série *Landsat*. O ITV aplicou técnicas de classificação automática de imagens de satélite e interpretação visual para uma avaliação quantitativa das mudanças na cobertura e no uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), utilizando dados Landsat de 1973 a 2017. Também foram avaliadas as características espaciais e temporais dessas mudanças no contexto de áreas indígenas, unidades

de conservação (UC) e áreas não protegidas, com o uso de dados de campo e uso de técnicas de processamento de imagem e classificação multi-resolução. Os resultados mostram que, no início da década de 1970, 99% da BHRI era coberta por floresta e 0,3% por savanas, com áreas limitadas de interferência antrópica (ação humana). Atualmente, a floresta tropical cobre apenas 48% da bacia hidrográfica enquanto as pastagens aumentaram para 51% (Figura 15). Nas áreas protegidas por unidades de conservação (UCs), aproximadamente 96% da floresta permanece conservada enquanto nas áreas não protegidas, a cobertura florestal é de apenas 30%**. A conversão de floresta para área de mineração foi de 111 km² enquanto de canga foi de 23 km². Até 2017, a área de canga remanescente era de 78% da cobertura original, o que representa 0,25% da área da BHRI***.

* [dx.doi.org/10.3390/rs10081178](https://doi.org/10.3390/rs10081178)

** [dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039)

*** doi.org/10.3390/rs10111683

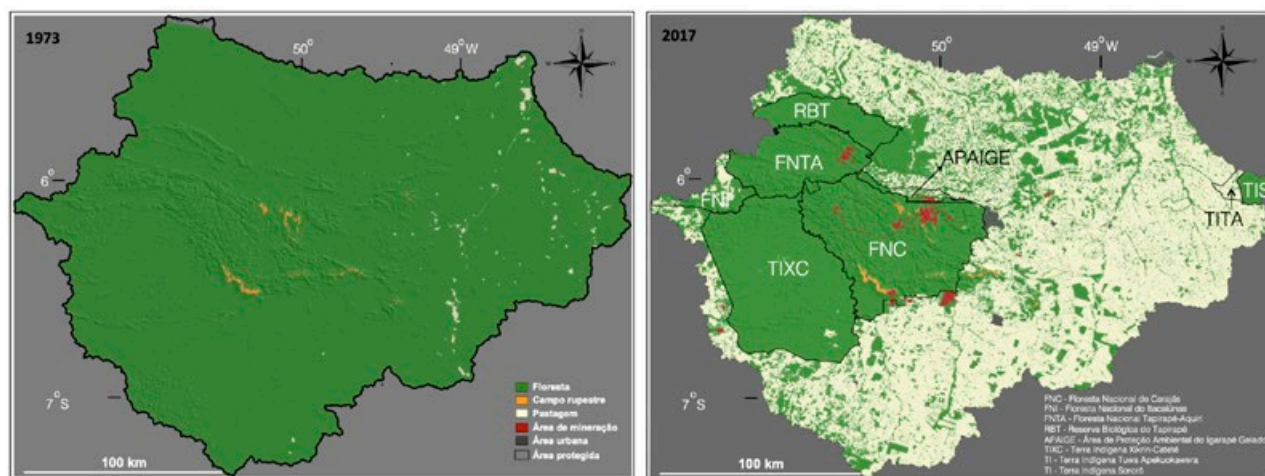


Figura 15: Mudança da cobertura e uso do solo na BHRI em 1973 e 2017*.

Os estudos indicam que a criação do mosaico de UCs na região de Carajás (Figura 15) é um caso bem-sucedido de parceria público-privada entre agências ambientais e empresas para proteger a biodiversidade do bioma amazônico.

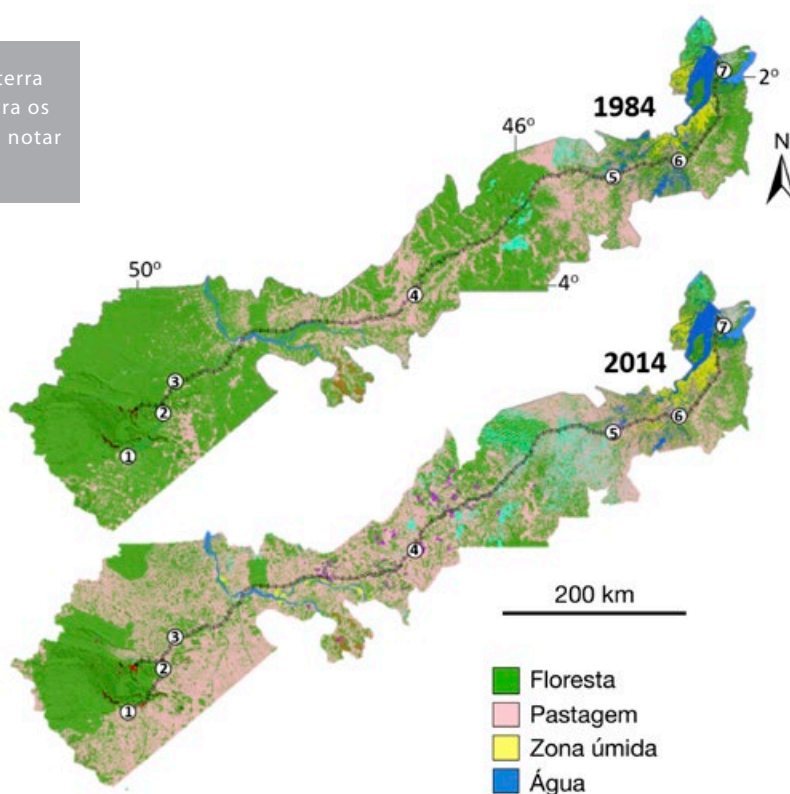
O Corredor da Estrada de Ferro Carajás

As ferrovias são sistemas de transporte considerados de baixo impacto em relação ao meio ambiente. Analisamos as mudanças na cobertura e no uso da terra durante a instalação e o desenvolvimento do Projeto Mineral de Carajás entre os anos de 1984 e 2014, ao longo dos mais de 900 km da Estrada de Ferro Carajás, que abrange os estados do Pará e Maranhão. As imagens dos satélites *Landsat-5* do ano de 1984 e *Landsat-8* de 2014 permitiram reconhecer mudanças na cobertura (água, áreas úmidas, floresta) e uso da terra (pastagem e agricultura, área urbana e mineração) nas áreas de influência da ferrovia. Em 1984, essa área possuía uma cobertura florestal de 69% (77.414 km²) e a classe não-floresta (pastagem e agricultura), 24% (26.980 km²). Em 2014, a cobertura florestal diminuiu para 43% (47.860 km²) enquanto a classe de não-floresta expandiu para 46% (51.640 km²) [Figura 16].

A construção da EFC representou um marco no desenvolvimento econômico da região, pois estabeleceu o início de um novo processo de industrialização da Amazônia Oriental. O modelo de uso da terra ao longo da EFC é caracterizado por assentamentos rurais associados a estradas, áreas de pastagem e de agricultura familiar enquanto as unidades de conservação e áreas indígenas desempenham papel fundamental na preservação da vegetação nativa. É importante enfatizar as vantagens ambientais da EFC quando comparadas com as rodovias, pois as ferrovias limitam as ramificações das estradas secundárias, evitando o padrão de desmatamento "espinha de peixe", observado na Rodovia Transamazônica e em Rondônia, por exemplo.

* doi.org/10.3390/rs10111683

Figura 16: Mapa de cobertura e uso da terra ao longo da Estrada de Ferro Carajás para os anos de 1984 a 2014, no qual é possível notar a redução da área de floresta.



Dinâmica Espaço-Temporal dos Manguezais do Brasil com Ênfase nas Áreas Portuárias da Vale

O ITV tem participado em pesquisas, inclusive fora da área de abrangência da Amazônia. Um exemplo disso são os estudos sobre os manguezais do Brasil.

As florestas de manguezal estão distribuídas na região intermaré das zonas tropicais e subtropicais do planeta. Desempenhando um papel importante na sustentabilidade, essas florestas servem de subsistência para comunidades tradicionais, sendo um dos ecossistemas mais produtivos e biologicamente complexos do mundo. Estudos recentes sugerem que os manguezais sequestram, anualmente, de duas a quatro vezes mais carbono

que florestas tropicais e armazenam de três a quatro vezes mais carbono por área equivalente. Além dessas funções, as florestas de manguezais protegem a zona costeira da ação de ondas, marés, pororocas e tsunamis. Por isso, são considerados os ecossistemas de maior valor para os serviços ecossistêmicos por unidade de área. Devido à grande importância ecológica e social, desde a década de 1980 são realizados mundialmente mapeamentos e detecção de mudanças das áreas de manguezais. A identificação sistemática e continuada de padrões florestais necessita de grande capacidade de armazenamento e de processamento

As áreas de manguezais sequestram anualmente de três a quatro vezes mais carbono que as florestas tropicais por área equivalente.

de dados. Essa dificuldade foi contornada recentemente, com o advento das plataformas computacionais em nuvem, como o Google Earth Engine (GEE). O GEE é uma plataforma que combina vários petabytes de dados orbitais e geoespaciais com recursos de análise estatística em escala planetária. Uma iniciativa denominada MapBiomas (<http://mapbiomas.org>) utilizou a plataforma GEE para analisar a dinâmica do uso e cobertura do solo em todo o país desde 1985 até o presente. O tema transversal zona costeira, que o ITV liderou em parceria com a empresa Solved, Observatório do Clima, *World Resource Institute* (WRI Brasil) e Google, objetivou discriminar, mapear e quantificar as florestas de manguezal ao longo do litoral brasileiro.

Os resultados desse estudo mostram uma redução de 17% dos manguezais do Brasil no período analisado. Regionalmente, a Costa Norte, do Amapá ao Maranhão, compreende 79% da cobertura de manguezais do país. Os estados com maior cobertura de manguezal (em km²) são: Maranhão - 4229 km² (38.4%), Pará - 2293 km² (20.8%) e Amapá - 2216 km² (20%). No contexto das áreas portuárias da Vale, observou-se no Terminal Marítimo da Ponta da Madeira, em São Luís (MA), que grande parte das áreas dos manguezais existentes (1.310 ha) permaneceu estável, havendo uma perda de 37 ha e um ganho de 135 ha. Uma dinâmica semelhante foi observada para o Terminal da Ilha Guaíba na Baía de Sepetiba (RJ) e Porto de Tubarão em Vitória (ES) (Figura 17). Portanto, nos últimos 40 anos, observa-se que as áreas de mangue nas imediações dos terminais marítimos operados pela Vale estão em expansão.

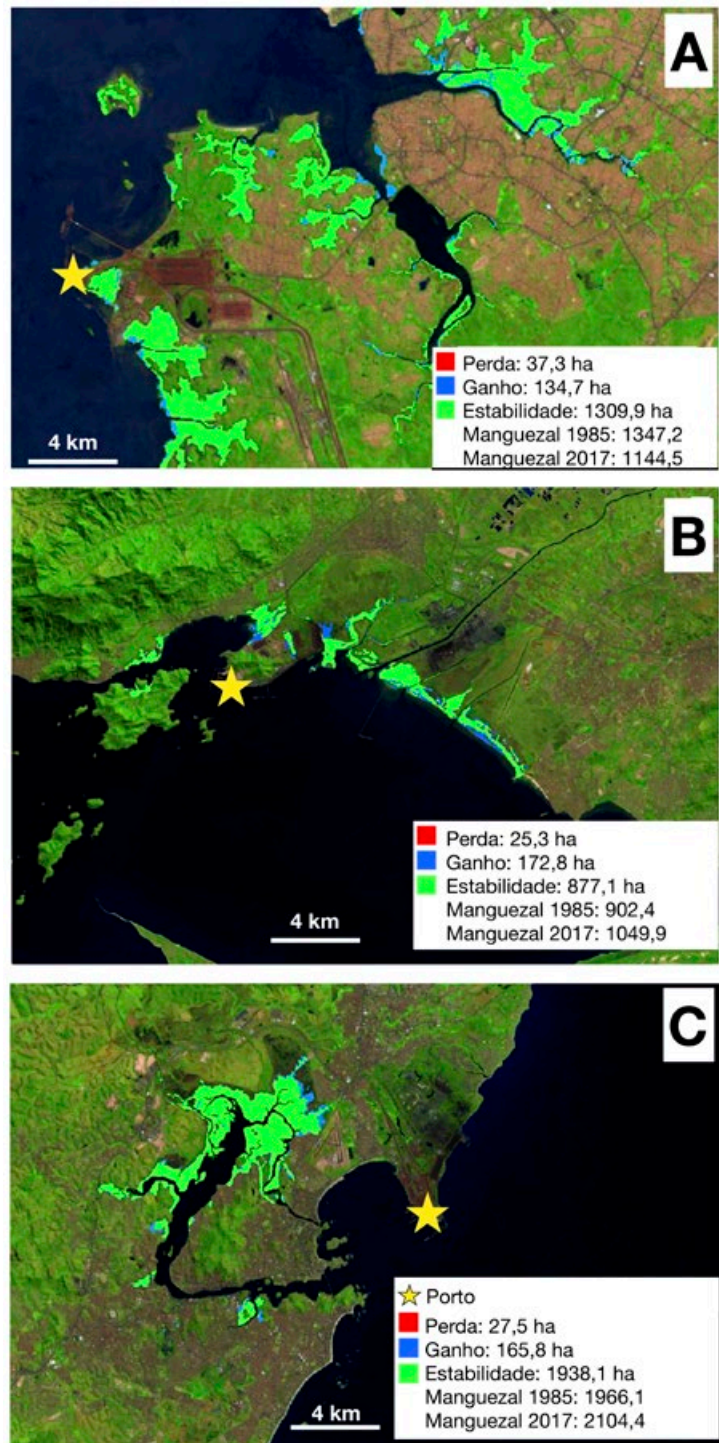


Figura 17: Dinâmica das áreas de manguezais no entorno das áreas portuárias da Ponta da Madeira no Maranhão (A), Terminal do Guaíba no Rio de Janeiro (B), e Porto de Tubarão no Espírito Santo (C).

Recursos Hídricos

Monitoramento Hidrometeorológico na Bacia do Itacaiúnas

A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas abrange uma área de 42 mil km² na porção sudeste do estado do Pará. Desde 2014, o ITV realiza o monitoramento dos recursos hídricos dessa bacia em parceria¹ com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA) e a Agência Nacional de Águas (ANA), por

meio de oito estações hidrometeorológicas para a coleta automática e a transmissão em tempo real, via satélite GOES², de dados de precipitação (chuva), nível dos rios, radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, pressão barométrica, direção, velocidade do vento, umidade, temperatura e salinidade no solo (Figura 18).



Figura 18: Plataforma de monitoramento com transmissão via satélite GOES* para o ITV DS, HidroWeb (ANA) e Hidromet (SEMAS). Barco e equipamentos utilizados nas campanhas de medição de nível e vazão.

1 Acordo de Cooperação Técnica (nº 004/ANA/2014)

2 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) é a nomenclatura de um conjunto de satélites e instalações em terra, operados em conjunto pelo National Environmental Satellite, Data, and Information Service, um departamento da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA- USA).

Os dados das estações são hospedados e disponibilizados no site da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA, sigla em inglês). Além disso, são armazenados continuamente no servidor do ITV e estarão disponíveis para download no sistema HidroWeb³ da ANA e no portal de hidrometeorologia do estado do Pará (Hidromet⁴-SEMAS). As informações hidroclimatológicas estarão acessíveis ao público e servirão para suporte à tomada de decisão pelas autoridades responsáveis pela gestão de secas e inundações. As operações da Vale (Serra Leste e Ferrosos Norte) também utilizam continuamente os dados hidroclimatológicos para suporte à decisão

sobre monitoramento de incêndios florestais e gestão de risco e segurança de obras hidráulicas.

O monitoramento automático (dados transmitidos via satélite) é complementado por quatro campanhas anuais em 16 pontos estratégicos, distribuídos ao longo da bacia (Figura 19) para medição e acompanhamento do comportamento de níveis e vazões dos principais rios e afluentes (Figura 20). O monitoramento permite entender o comportamento do ciclo hidrológico na bacia, acompanhar a ocorrência de eventos críticos (inundações e secas) e planejar ações para mitigar os impactos decorrentes desses eventos.

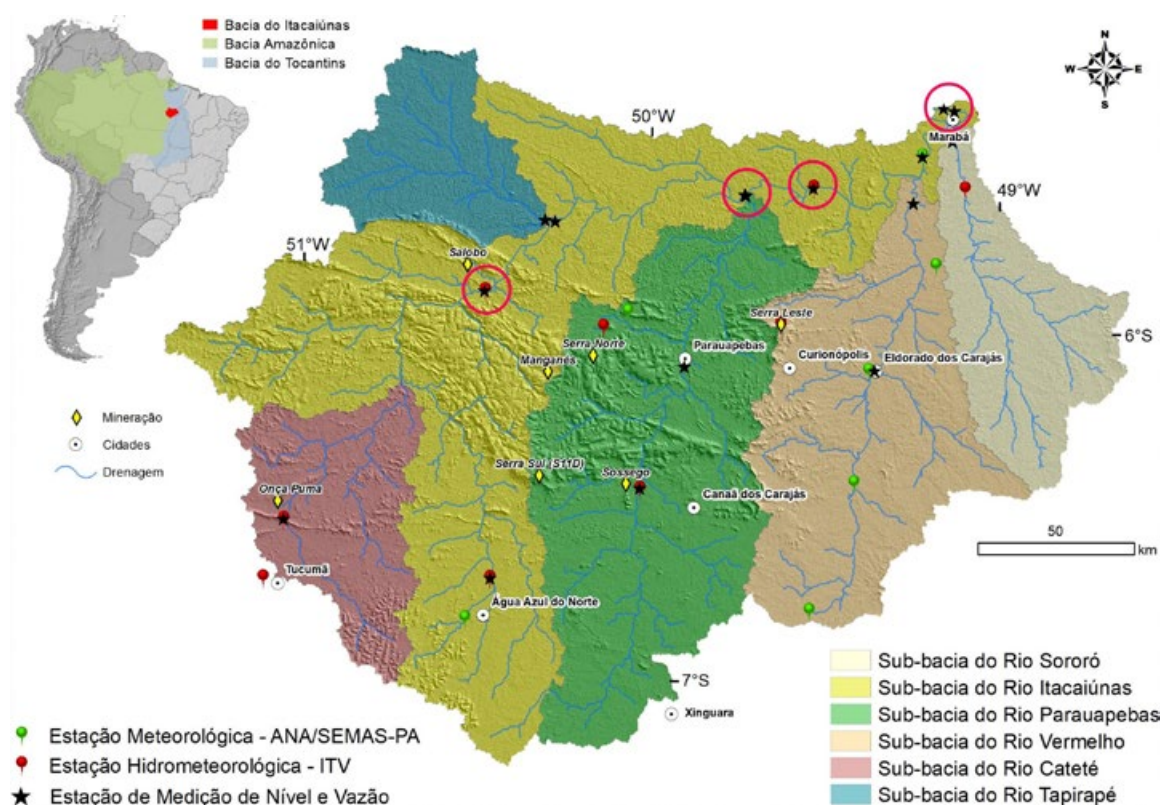


Figura 19: Distribuição e localização das plataformas de coleta de dados meteorológicos e pontos de monitoramento de nível e vazão dos rios na BHRI.

³ <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>

⁴ <https://www.semas.pa.gov.br/hidromet/>

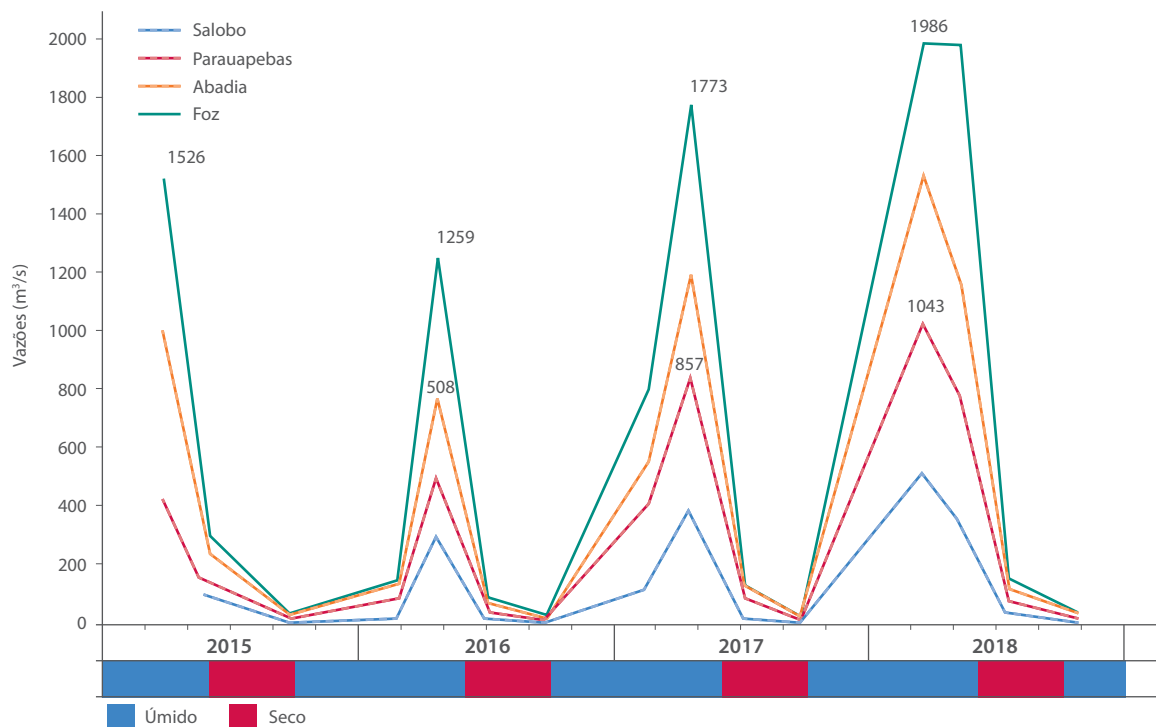


Figura 20: Comportamento sazonal das vazões medidas ao longo do rio Itacaiúnas, nas seções Salobo, Parauapebas, Fazenda Abadia e Foz.

O monitoramento permite entender o comportamento do ciclo hidrológico na bacia e prever a ocorrência de eventos críticos como inundações e secas.

A Figura 21 traduz a sazonalidade marcante da BHRI, cujo período úmido (novembro a abril) aponta para um excedente hídrico. Por sua vez, durante o período considerado seco (maio a outubro), as perdas de água devido à evapotranspiração na bacia são maiores, caracterizando um estado de déficit hídrico.

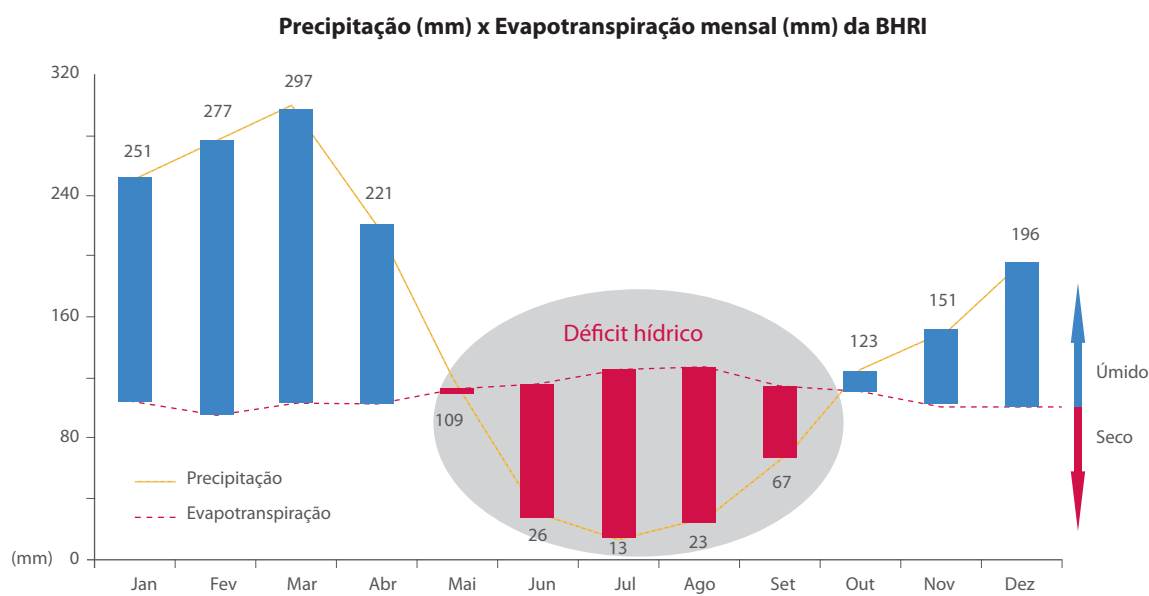


Figura 21: Valores médios mensais de precipitação e evapotranspiração relativos ao período de 1980 a 2013.

A comunidade científica, órgãos públicos, a população local e a Vale têm sido beneficiadas com os resultados do projeto.

- Foram fornecidos subsídios ao diagnóstico de situação dos recursos hídricos da bacia para as comissões pró-comitês da BHRI e da sub-bacia do rio Parauapebas, as quais são formadas por representantes da sociedade civil organizada (ICMBio), instituições de ensino (UFRA, UFPA, EMBRAPA), Secretarias Municipais de Meio Ambiente, representantes dos setores usuários de água e do Ministério Público de Marabá, Parauapebas e Canaã dos Carajás.
- Monitorados nas estações Barragem do Gelado e Serra Leste, os dados meteorológicos (umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação) têm sido utilizados diariamente pelo Programa de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais da Vale na elaboração da tabela Fórmula de Monte Alegre (FMA+), a fim de gerar Índices de Risco de Incêndio Florestal.
- Os dados da estação instalada no campus do Instituto Federal do Pará de Marabá (IFPA Rural – Marabá) subsidiaram outros estudos de interesse econômico e social na região.

*dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170147

- Os resultados obtidos com o monitoramento hidrológico na bacia corroboram com os apontados por outros estudos*, como os que mostram que a conversão da cobertura florestal em pastagens extensas e homogêneas foi acompanhada por modificações

sistemáticas no ciclo hidroclimatológico local. Esse fato foi evidenciado pelas condições ambientais mais secas devido ao aumento da temperatura do ar na região, a diminuição na umidade relativa e o aumento de vazão na descarga do rio.

Modelo Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

Modelos Hidrológicos são ferramentas matemáticas utilizadas para a representação do ciclo da água em uma bacia hidrográfica. Os modelos transformam a precipitação em vazão, calculando o quanto da chuva é interceptada pela vegetação, evapora, infiltra no solo e escoam pelos rios e planícies. Esses processos dependem das características topográficas do terreno, do uso e ocupação do solo e das características do solo da bacia hidrográfica. A modelagem hidrológica possibilita realizar um diagnóstico da bacia, onde se pode analisar como as vazões nos rios foram afetadas por mudanças de cobertura do solo e do clima, assim como elaborar um prognóstico da bacia hidrográfica, com a construção de cenários futuros.

Na BHRI, o ITV implementou o "Modelo Hidrológico de Grandes Bacias" (MGB), que fornece informações importantes

como a precipitação média (1.772 mm/ano), a evapotranspiração média (1.085 mm/ano) e a vazão média no exutório (902 m³/s). Todos os dados foram calculados para o período entre 1998 e 2007. Validado com base nos dados de monitoramento hidroclimatológico, o uso do modelo permite também a análise de cenários de sustentabilidade hídrica, como o impacto do desmatamento no ciclo hidrológico e qual a relação entre demanda pelo uso da água e disponibilidade na bacia.

Os padrões de evapotranspiração, interceptação, umidade do solo, escoamentos na superfície e vazões nos rios foram calculados para as 1.246 minibacias ou trechos de rio entre os quais a bacia foi dividida. A Figura 22, por exemplo, apresenta a vazão média nessas minibacias ou trechos de rio.

Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

Precipitação Média: 1772 mm/ano

Evapotranspiração Média: 1085 mm/ano

Vazão Média no exutório: 902 m³/s

* doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039 dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170147

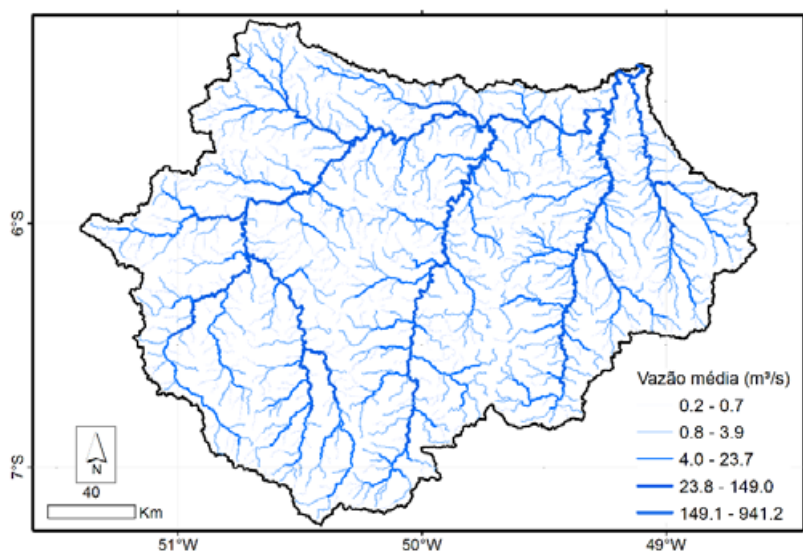


Figura 22: Vazão média em cada trecho de rio da bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas (período entre 1998 e 2007).

A distribuição espacial da precipitação média anual (1998 até 2007), da evapotranspiração e o escoamento superficial (Figura 23) revelam que as áreas preservadas do Mosaico de Carajás têm um papel importante na transferência de água para a atmosfera e na regulação do escoamento superficial.

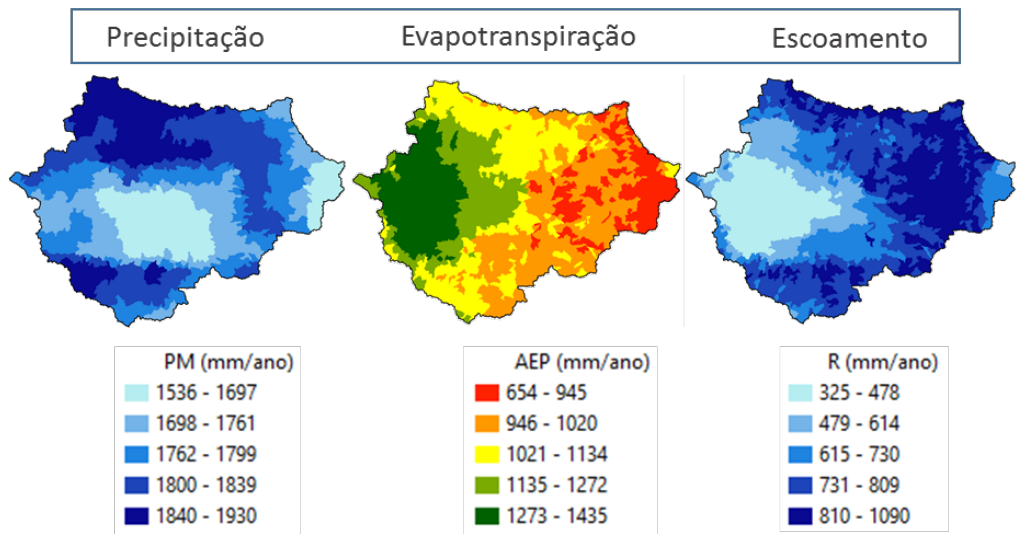


Figura 23: Valores médios anuais (mm/ano) de precipitação (PM), evapotranspiração (AEP) e escoamento superficial (R) nas minibacias da bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas.

As áreas preservadas do Mosaico de Carajás têm um papel importante na transferência de água para a atmosfera e na regulação do escoamento superficial.

As menores taxas médias anuais de evapotranspiração acontecem em áreas desmatadas, por exemplo a leste da bacia, onde a pastagem é o uso e ocupação do solo predominante. Na região do Mosaico de Carajás, onde estão localizadas as principais atividades de mineração da Vale, que ocupam cerca de

0.3% da área da bacia, as taxas médias anuais de evapotranspiração são as mais altas, indicando que a floresta é fundamental na transferência de água para a atmosfera. Cerca de 15 km³/ano são transferidos para a atmosfera por meio de evapotranspiração ocorrida no Mosaico de Carajás. Essa água,

através da chuva, alimenta várias bacias hidrográficas no Sudeste e Sul do Brasil via correntes de circulação do ar, os chamados "rios voadores".

Os resultados do estudo também mostram que as áreas preservadas auxiliam na regulação das vazões nos rios, gerando menor escoamento superficial em comparação com as áreas que sofreram desmatamento.

Dessa forma, a partir da compreensão dos processos hidrológicos, da sua variabilidade espacial e interação com o uso e ocupação do solo, o modelo hidrológico subsidia os usuários (empresas de mineração e outras indústrias, agropecuária e população, entre outros) e os gestores locais com importantes informações sobre a disponibilidade de água e potencializa a gestão integrada ao uso do solo e dos recursos naturais.

Rios Voadores - No Mosaico de Carajás cerca de 15km³/ano de água são transferidos para a atmosfera. Essa água circula via correntes e alimenta os rios do Sul e Sudeste.

A Sustentabilidade Hídrica da Bacia do Itacaiúnas

O monitoramento hidrometeorológico e o modelo hidrológico da BHRI compõem as iniciativas de Sustentabilidade Hídrica da bacia. Para isso, são realizadas pesquisas embasadas em monitoramento e modelagem matemática, como a avaliação do papel

do Mosaico de Carajás nos processos hidrológicos, o balanço hídrico entre consumo de água e disponibilidade hídrica por trecho de rio e a análise do impacto das mudanças climáticas nos processos hidrológicos da bacia, conforme ilustrado na Figura 24.

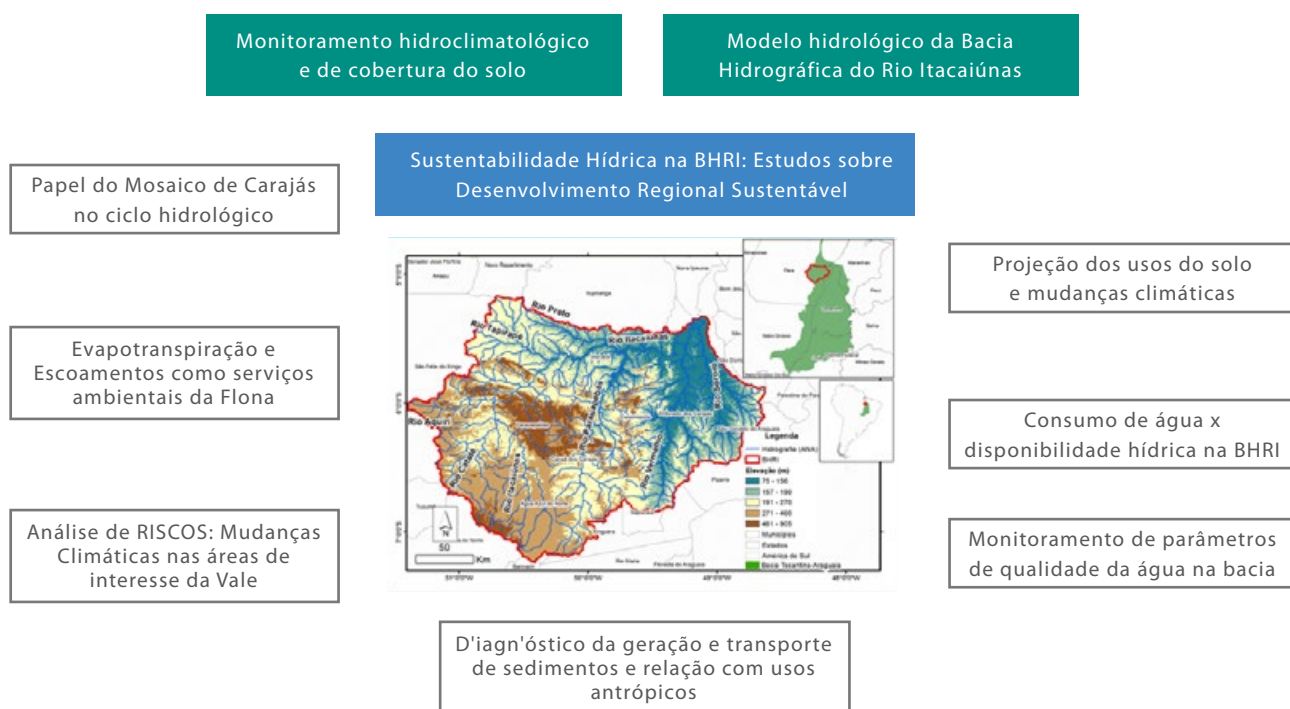
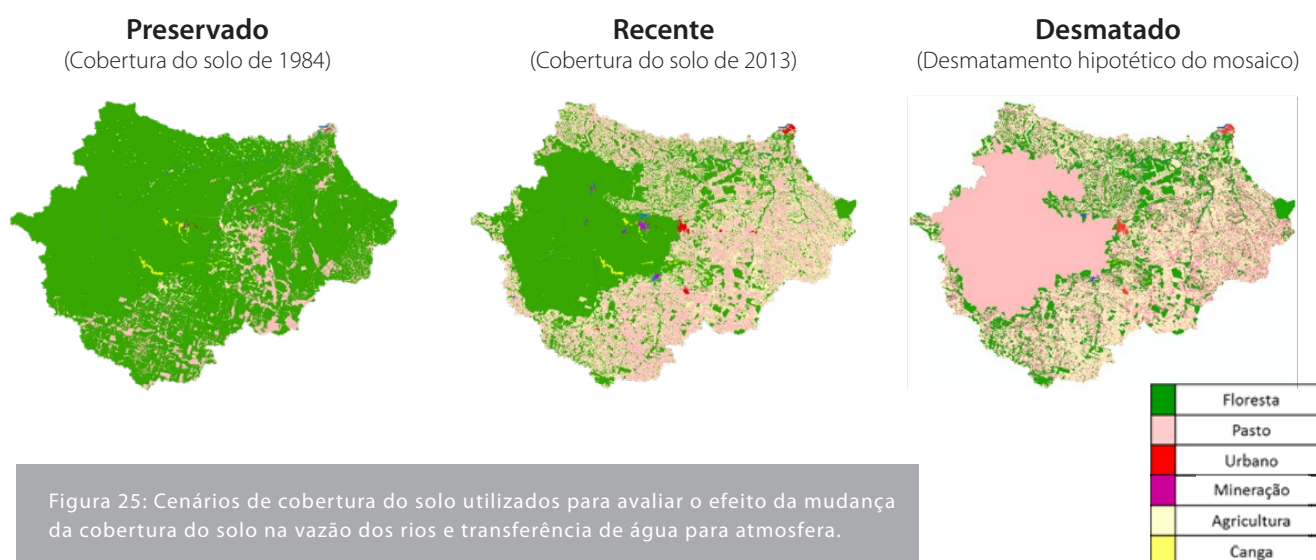


Figura 24: Iniciativas sobre a Sustentabilidade Hídrica da Bacia do Rio Itacaiúnas.

As florestas são muito importantes para a conservação da biodiversidade, a preservação da qualidade das águas, a proteção do solo, a regulação do clima, o controle das vazões nos rios, entre outros serviços ecossistêmicos. O ITV aplicou o modelo hidrológico

para entender também o papel dessas florestas no ciclo hidrológico da bacia do Itacaiúnas*. Para isso, foram avaliados três cenários de cobertura do solo na bacia (Figura 25), estimados a partir de imagens de satélite e técnicas de sensoriamento remoto:



Os resultados da Figura 26 evidenciam a importância da preservação do mosaico para evitar maiores alterações na vazão e da evapotranspiração na bacia. O processo de desmatamento modificou essas variáveis, tanto espacialmente quanto em termos numéricos. No cenário desmatado, por exemplo, estima-se que haveria um aumento de aproximadamente 29% nas vazões médias e de 24% nas vazões máximas na foz da BHRI.

Entre os anos 1973 e 2016, a área desmatada na bacia passou de 5% para aproximadamente 50%, influenciando processos como a vazão e a evapotranspiração médias. O impacto desta modificação na vazão e evapotranspiração é mostrado na Figura 27. Entre os anos 1973 e 1984, período em que se calculava

5% de desmatamento na área, a evapotranspiração e a vazão específica média** na bacia eram de 1.465 mm/ano e 401 mm/ano, respectivamente. Com o avanço do processo de desmatamento na bacia no decorrer dos anos seguintes, os valores dessas variáveis alcançaram 1.282 mm/ano e 514 mm/ano, respectivamente. Nota-se ainda que a evapotranspiração aumentou no período de 2005 a 2016 em relação ao período entre 1995 e 2004. Esse resultado pode estar associado ao aumento de áreas de pasto abandonadas, onde se estabeleceram tanto florestas secundárias quanto capoeiras. Esse tipo de vegetação, apesar de não se igualar às florestas nativas, apresenta características hidrológicas mais similares a uma floresta do que as pastagens.

* doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.090

** Vazão específica é a vazão por unidade de área da bacia hidrográfica. 1000 mm/ano equivale a aproximadamente 31.7 L/s/km² (litros por segundo por quilômetro quadrado de área).

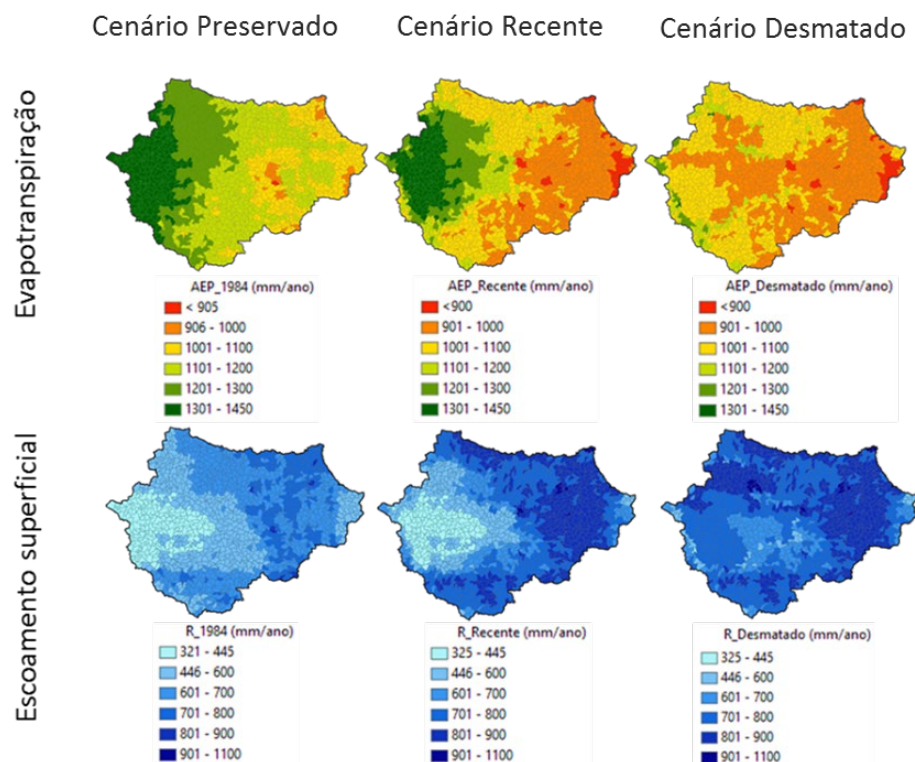


Figura 26: Valores médios anuais (mm/ano) de evapotranspiração (AEP) e escoamento superficial (R) em cada cenário de cobertura do solo analisado.

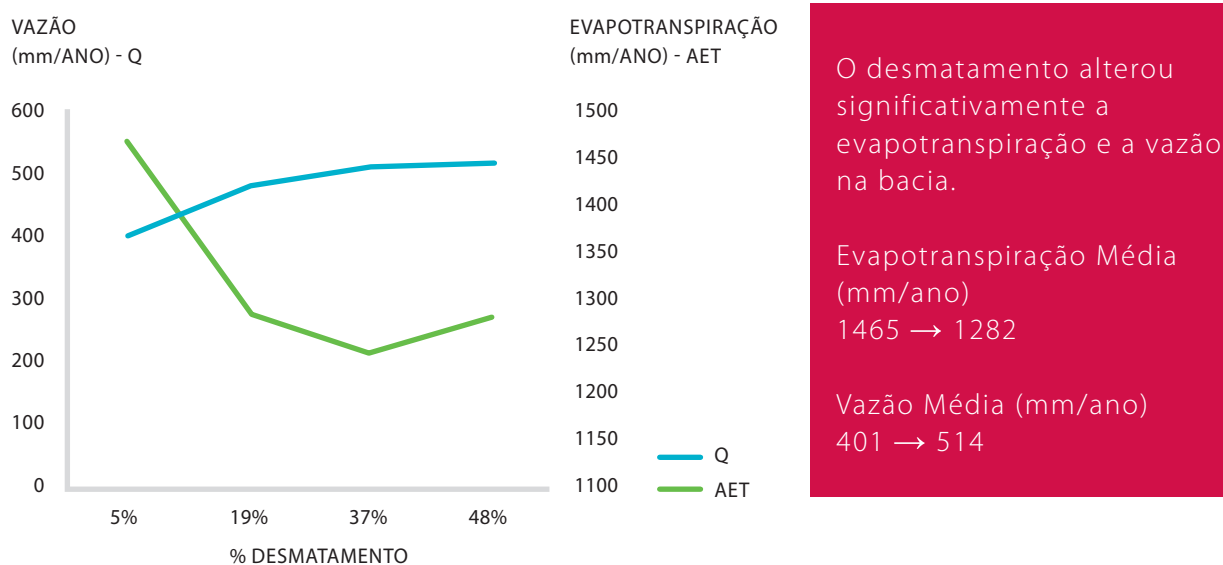


Figura 27: Impacto do desmatamento entre 1973 (5% da área desmatada) e 2016 (aproximadamente 50% da área desmatada) na vazão específica e evapotranspiração média (mm/ano) na BHRI.

As pesquisas realizadas no ITV também analisaram a relação entre o consumo de água existente na bacia e a disponibilidade hídrica superficial, comumente demonstrada pelo índice de estresse hídrico (IEH).

$$IEH(\%) = 1 - \frac{\text{Consumo de água do corpo hídrico}}{\text{Disponibilidade}}$$

As informações de consumo de água em m³/s e por setor são apresentadas na Figura 28 e na Tabela 3. A disponibilidade hídrica foi calculada por trecho de rio

utilizando o modelo hidrológico e é considerada como a vazão Q90 (vazão que é igualada ou superada em média em 90% do tempo em um trecho de rio).

Uso	Irrigação	Animal	Industrial	Rural	Urbano	Total
m³/s	0,27	1,60	3,87	0,14	1,30	7,18
% Total	3,7	22,3	53,8	2,0	18,2	100

Tabela 3: Estimativa do consumo de água superficial por setor usuário na bacia hidrográfica (irrigação, dessedentação animal, uso industrial e abastecimento urbano e rural) na BHRI, obtida a partir de dados da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS) e Agência Nacional de Águas (ANA).

Disponibilidade Hídrica da BHRI

O consumo de água superficial na BHRI corresponde a apenas 0.8% da disponibilidade hídrica da bacia. Desse volume consumido, 53.8% correspondem ao setor industrial.

De uma forma geral, a disponibilidade hídrica na bacia não está comprometida, pois o total consumido é estimado em 7 m³/s, enquanto a vazão média na bacia é de 902 m³/s. Entretanto, é importante analisar o balanço hídrico por trecho de rio, visando à identificação de trechos de consumo elevados.

Dessa forma, com as informações de consumo de água e disponibilidade hídrica para cada trecho de rio, é possível calcular o IEH localmente. Os valores próximos a zero indicam uma situação de alto comprometimento da disponibilidade hídrica enquanto os valores próximos a 100 indicam baixo comprometimento. As análises

indicam que, dos 1.246 trechos de rio onde o IEH foi calculado, apenas quatro, referentes a algumas áreas de mineração e urbanas, possuem a disponibilidade comprometida (Figura 28). Esses pontos correspondem ao consumo humano, com o exemplo da cidade de Parauapebas, e a mineração, incluindo a Mina do Azul, Salobo e Onça Puma, assim como às áreas de consumo animal adjacentes ao Mosaico de Carajás.

Nesse contexto, as medidas de manejo da água realizadas pela Vale, como o uso de água de chuva, podem modificar o IEH.

O IEH é de grande importância para o gerenciamento dos recursos hídricos da bacia hidrográfica, permitindo que não apenas o setor de mineração, mas também outros usuários visualizem como estão sendo utilizados os recursos hídricos, além de permitir definir com maior precisão os locais onde há estresse hídrico.

Apesar da alta disponibilidade hídrica, há pontos de atenção na bacia para escassez sazonal.

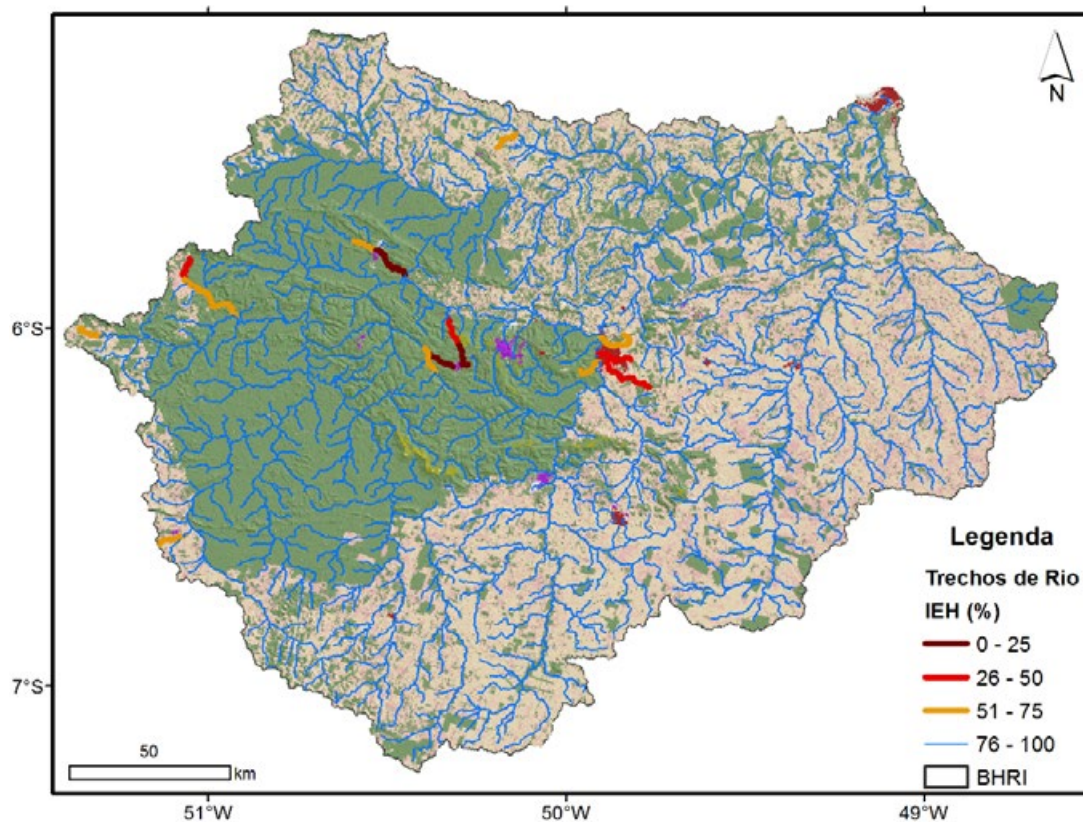


Figura 28: Índice de Estresse Hídrico (IEH) por trecho de rio para a bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas.

Geoquímica Ambiental da Bacia do Rio Itacaiúnas

Diferentes elementos químicos podem se concentrar na superfície da Terra, seja por processos naturais, seja por ações do homem. Conhecer a distribuição dos elementos químicos no ambiente e, particularmente, em bacias hidrográficas, é fundamental para o planejamento ambiental e para orientar ações que podem evitar certos danos ao homem e

ao meio ambiente. Para atingir esse objetivo é importante definir valores de **background** e **baseline geoquímicos** de diferentes elementos, os quais são considerados como representativos de um determinado ambiente, em contraposição a valores anormais, vistos como indicativos de possível contaminação.

Background foi definido originalmente como a concentração normal de um determinado elemento em um material sob investigação, tal como rocha, solo, plantas ou água.

Background ambiental se refere às concentrações observadas em uma região que são resultado de atividades humanas, mas que não estão associadas a uma contaminação específica.

Baseline é a concentração atual de um elemento químico numa amostra ambiental. Pode servir como valor de referência para avaliar futuras mudanças ambientais. Busca definir ou inferir os níveis de contaminação atuais de determinados elementos, de forma que mudanças futuras desses níveis possam ser quantificadas.

A BHRI é uma das regiões mais dinâmicas do estado do Pará em termos econômicos. Ela concentra grandes projetos de mineração (Complexo Mineral de Carajás) e apresenta expressivo crescimento populacional, o que acarreta mudanças de uso e cobertura do solo. Conforme já demonstrado em outros estudos do ITV (item 6) a maior parte da floresta tropical foi substituída por pastagens e, em menor escala, minas e áreas urbanas. Ampliar o conhecimento científico do meio físico e natural desta bacia é de extrema relevância, não só para a Vale, mas também para os órgãos públicos e população local. Em razão disso, o ITV, apoiado pela área de Meio Ambiente de Ferrosos Norte da Vale, estruturou um projeto

de pesquisa para efetuar o mapeamento geoquímico e estimativa de background na bacia do rio Itacaiúnas.

O mapeamento geoquímico define a distribuição espacial de elementos químicos em solos, águas superficiais e sedimentos de leitos de rios. Foram analisados desde elementos mais abundantes, conhecidos como elementos maiores, até aqueles presentes em teores muito baixos, denominados elementos-traço, quantificados em partes por milhão (ppm) ou bilhão (ppb). Os elementos químicos considerados e analisados no projeto podem ser visualizados na Figura 29.

GRUPO

PERÍODO

Número do Grupo IUPAC (1985)

Número do Grupo Químico (1986)

Símbolo

Nome do elemento

Elementos analisados em cada amostra

Água

Sedimentos

Solos

LANTANÍDE

ACTÍNIDE

Copyright © 2012 Kim Generals

Elementos maiores analisados em solos e sedimentos: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , MnO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 .
 Ânions maiores analisados em água: Fluoreto, cloreto, fosfato total, nitrato, sulfeto.

Figura 29: Tabela periódica mostrando os elementos químicos analisados em amostras de solos, água e sedimentos de corrente na bacia do rio Itacaiúnas no Projeto *Background Geoquímico*.

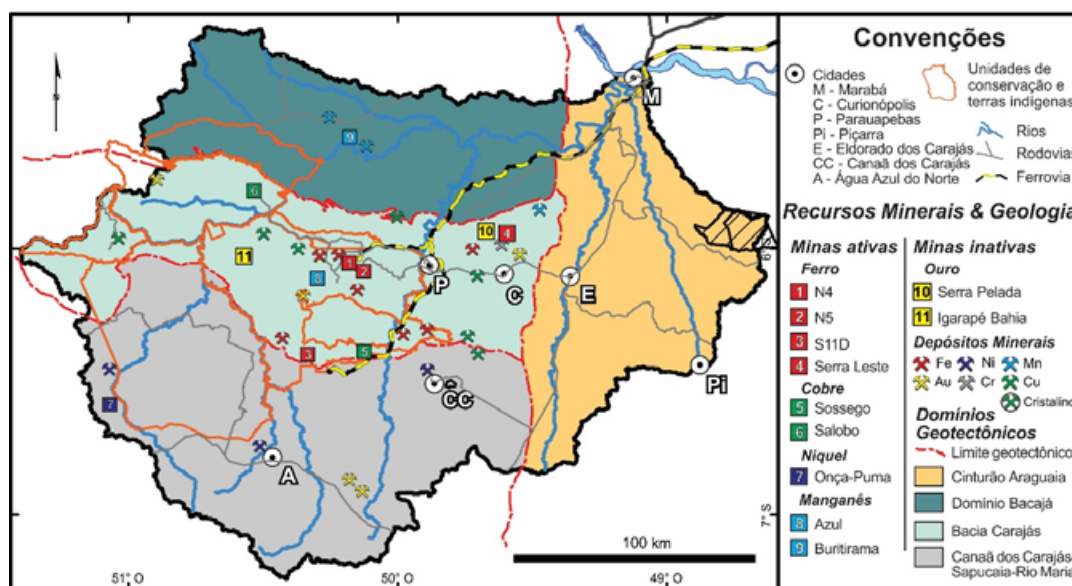


Figura 30: Mapa geológico simplificado da BHRI, mostrando quatro grandes domínios geotectônicos e as minas e depósitos de maior relevância.

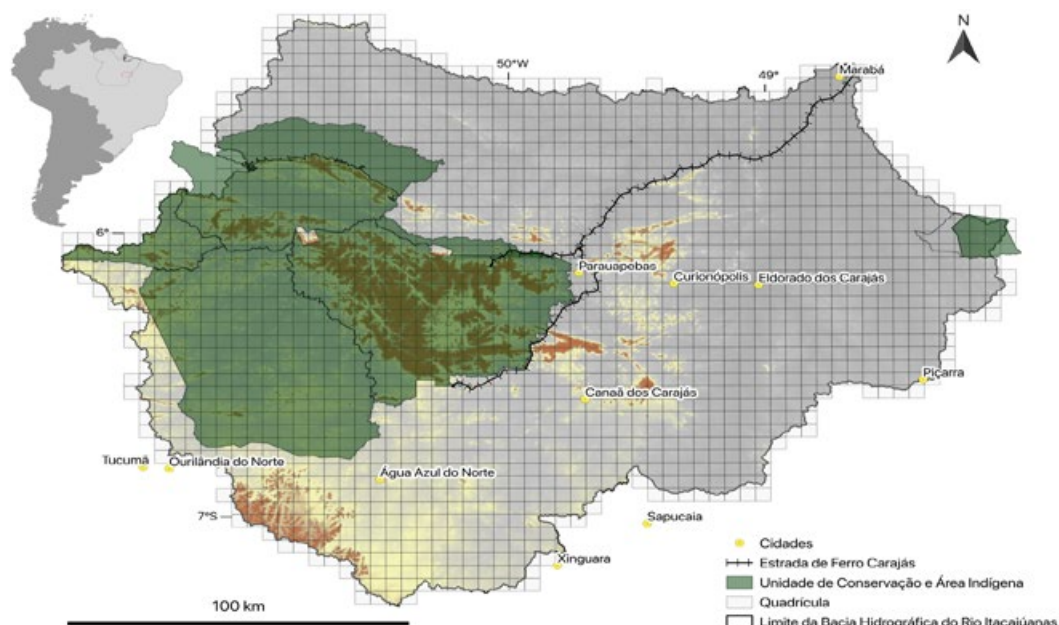


Figura 31: Área de solos amostrada com grid de 5 x 5 km distribuídos ao longo de toda a bacia do rio Itacaiúnas.

Os resultados obtidos permitiram definir valores de **background** e identificar anomalias, em geral devido a causas naturais e associadas à geologia e tipo de

rocha dominante na área em estudo (Figura 30). A amostragem realizada cobriu mais de 80% da BHRI, tendo sido coletado grande número de amostras (Figura 31).

Foram coletadas e analisadas amostras de:

- Solos superficiais (0 a 20 cm de profundidade) e subsuperficiais (30 a 50 cm de profundidade);
- Águas superficiais de drenagens ativas;
- Sedimentos de corrente do leito de drenagens.

Amostras coletadas e analisadas:

- Solos: 3.286
 - Sedimentos de corrente: 849
 - Águas superficiais: 1.565
 - Total: 5.700 amostras
- 325.458 determinações analíticas

Águas Superficiais da Bacia do Rio Itacaiúnas

Estudos de águas das sub-bacias dos rios Vermelho (SBV) e Sororó (SBS), situadas na porção leste da bacia do Itacaiúnas e fora da influência dos grandes projetos de mineração, revelaram que os parâmetros físico-químicos da água superficial não mostram variações acentuadas entre as estações chuvosa e seca. Teores da maior parte dos elementos tendem a ser mais elevados na estação chuvosa. A exceção é o Mn, cuja concentração aumenta durante a estação seca, possivelmente devido a processos biogeoquímicos responsáveis por criar localmente condições redutoras.

Com exceção de Fe e Mn, em geral os demais elementos químicos revelam baixas concentrações na água e apresentam conteúdos inferiores ao limite de detecção do método analítico utilizado. De modo geral, não foram observadas evidências de contaminação nas águas superficiais, pois as concentrações desses elementos químicos situam-se muito abaixo dos valores máximos admitidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama).

Os resultados integrados das análises de água superficial na BHRI constituem o primeiro levantamento detalhado de baseline geoquímico na região, executado com alta densidade de amostragem e criando uma base referencial para o planejamento dos riscos ambientais.

Valores de Baseline	Fe	Mn
Estação Chuvosa	5 a 6 mg/L	0,30 a 0,45 mg/L
Estação Seca	2 a 3 mg/L	0,20 a 0,30 mg/L na SB Vermelho
		1,3 a 1,4 mg/L na SB Sororó

Tabela 4: Valores de Baseline de Ferro e Manganês nas águas das sub-bacias dos rios Vermelho e Sororó.

Os resultados integrados das análises de água superficial na BHRI constituem o primeiro levantamento detalhado de **baseline** geoquímico na região, executado com alta densidade de amostragem. A pesquisa demonstrou que levantamentos hidrogeoquímicos detalhados com definição de baseline são úteis para avaliação da qualidade da água e para planejamento adequado de seu uso.

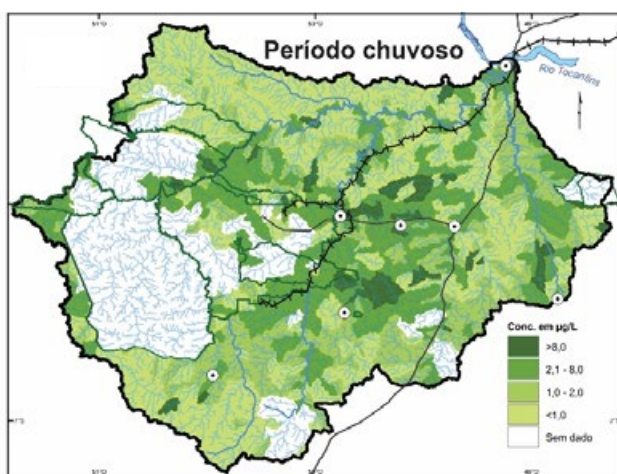
Uma das mais relevantes conclusões da pesquisa é que altas concentrações de ferro (Fe) e manganês (Mn) em águas superficiais são inerentes às condições da Região Amazônica, tendo o aumento de seu conteúdo na água sido favorecido pelo ambiente natural e pelo desmatamento. Evidencia-se também que a distribuição de níquel (Ni), cromo (Cr) e vanádio (V) é fortemente influenciada pelos tipos de rochas presentes em cada área, enquanto que o cobre (Cu) se concentra de modo notável ao longo de duas zonas no centro da bacia (Figura 32), onde ocorrem as principais minas e depósitos deste bem mineral. Os valores de baseline definidos para os elementos químicos se situam abaixo dos limites máximos toleráveis conforme estabelecidos na Resolução 357/2005 do Conama, com exceção do Mn (Tabela 5). O Fe apresenta valores de baseline muito acima dos estipulados pela World Health Organization (WHO) e, na

estação chuvosa, o Al também. Concluiu-se que, quando do período de realização da amostragem, ao longo de 2017, não havia contaminação antropogênica expressiva nas águas superficiais da bacia do rio Itacaiúnas.

Parâmetro	Unid.	I2σ	Q98	Classe
Fe_R	mg/l	3,90	11,82	0,3#
Fe_D	mg/l	2,10	11,22	0,3#
Al_R	mg/l	0,30	1,41	0,2#
Al_D	mg/l	0,10	1,00	0,2#
Mn_R	mg/l	0,20	1,83	0,1
Mn_D	mg/l	0,10	3,80	0,1
Cu_R	µg/l	-	28,63	2000#
Cu_D	µg/l	1,80	8,82	2000#
Ni_R	µg/l	-	10,46	25
Ni_D	µg/l	-	8,10	25
Cr_R	µg/l	-	8,88	50
Cr_D	µg/l	-	4,50	50

Tabela 5: Valores de limiar superior (Threshold) de Baseline geoquímico para elementos químicos em águas superficiais da bacia do rio Itacaiúnas durante as estações chuvosa (R) e seca (D) em 2017, comparados com os limites legais admitidos pelo CONAMA N° 357/2005 Classe-II. '#' Valores de referência para águas potáveis da World Health Organization (WHO).

As altas concentrações de ferro (Fe) e manganês (Mn) em águas superficiais são inerentes às condições da Região Amazônica, tendo o aumento de seu conteúdo na água sido favorecido pelo desmatamento e maior precipitação durante a estação chuvosa.

Ferro**Cobre**

Convenções
 ○ Sedes municipais — Rodovias —+— Ferrovias — Drenagem — Rio Tocantins — Unidades de conservação e terras indígenas
 SISTEMA DE COORDENADA GEOGRÁFICA
 Datum World Geodetic System 1984 (WGS84)

Figura 32: Mapas geoquímicos de distribuição de Ferro e Cobre durante o período chuvoso em águas superficiais da bacia do rio Itacaiúnas.

Índice de Qualidade Química das Águas Superficiais da Bacia do Rio Itacaiúnas

Foi desenvolvido um índice de qualidade química da água (IQQA) da bacia do Itacaiúnas, com base em 15 parâmetros*. O peso relativo (P_i) destes parâmetros foi estabelecido levando em conta sua importância relativa na qualidade da água potável, conforme apresentado abaixo:

Índice

$$IQQA = \sum SI$$

$$SI = P_i \cdot Q_i$$

$$Q_i = C_i / S_i \cdot 100$$

$$P_i = p_i / \sum p_i$$

para pH, OD,

$$Q_i = (C_i - V_i) / (S_i - V_i) \cdot 100$$

Parâmetros

$IQQA$ = Índice de Qualidade da Água

SI = Sub-Índice;

Q_i = indicador de qualidade

P_i = peso relativo; p_i = unidade de peso

S_i = valor padrão (segundo Conama, 2005, Classe II; WHO, 1994)

V_i = valor ideal tal como 7 para pH e 14.6 para OD

15 parâmetros utilizados para cálculo do Índice de Qualidade Química da Água (IQQA):

pH, Condutividade (C),
Total de Sólidos
Dissolvidos (TDS),
Dureza Total (TD),
Oxigênio Dissolvido (DO),

Nitrato (NO_3^-),
Fosfato (PO_4^{3-}),
Bicarbonato (HCO_3^-),
Sulfato (SO_4^{2-}),
Cloreto (Cl^-),

Fluoreto (F^-),
Cálcio (Ca),
Magnésio (Mg),
Sódio (Na) e
Potássio (K)

* doi.org/10.1016/B978-0-08-017005-3.50067-0

Os resultados obtidos para o IQQA mostram (Figura 33) que as 1.565 amostras analisadas de águas superficiais dos rios da bacia do Itacaiúnas apresentam ampla dominância de qualidade excelente ou boa (IQQA < 50; índices obtidos em cerca de 95%

das amostras), em relação às que mostram qualidade ruim (4,2%) e muito ruim ou imprópria (0,8 %), ver tabela abaixo. Em apenas seis microbacias foi observada qualidade ruim ou muito ruim a péssima (Figura 34).

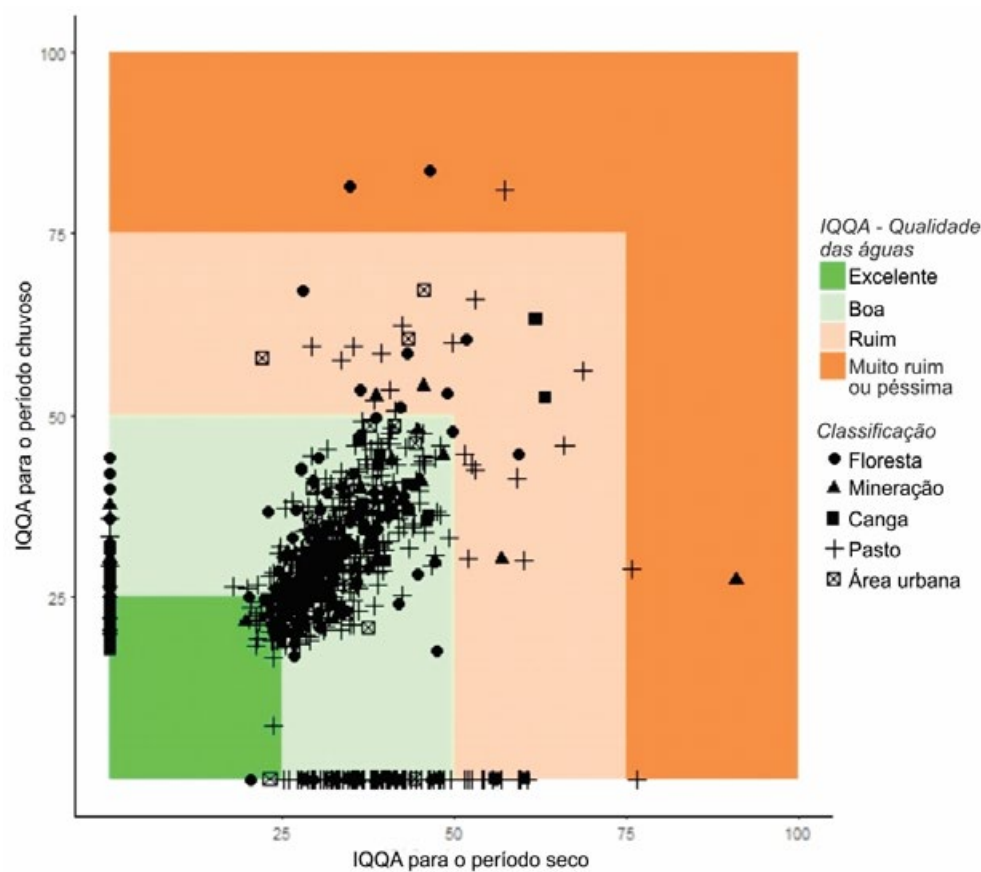


Figura 33: Índice de Qualidade Química da Água (IQQA) específico para a bacia do rio Itacaiúnas. Estão representadas análises de 1.565 amostras. Os pontos que incidem sobre os eixos das abscissas e das ordenadas representam pontos amostrados em apenas uma estação.

ÍNDICE DE QUALIDADE QUÍMICA DA ÁGUA (IQQA) NO PERÍODO CHUVOSO

IQQA	n	%
Excelente	66	9,2
Boa	619	85,8
Ruim	30	4,2
Muito ruim ou Péssima	6	0,8
Somatório	721	100

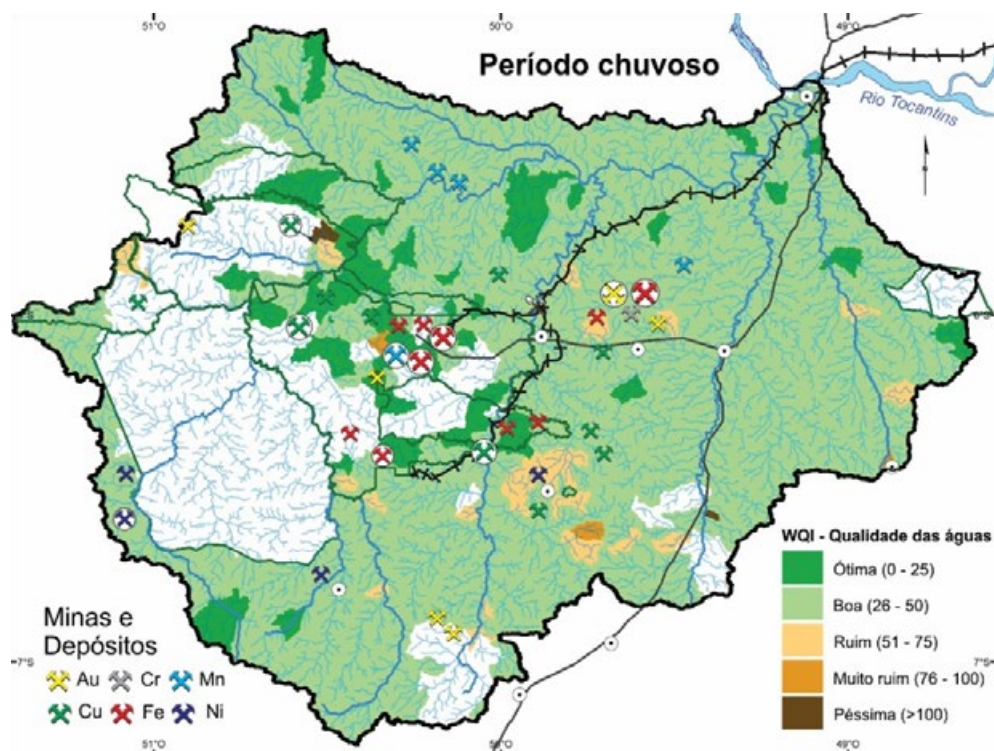


Figura 34. Variação espacial da qualidade da água na bacia do Rio Itacaiúnas com base no IQQA na estação chuvosa.

Sedimentos de Corrente da Bacia do Rio Itacaiúnas

O estudo geoquímico de sedimentos de corrente também revelou importantes aspectos da distribuição dos elementos químicos na bacia. O cobre (Cu) é um dos principais recursos minerais da bacia, na qual se situam as minas do Salobo e Sossego, bem como diversos outros depósitos desse minério. As concentrações de cobre estão geralmente associadas com rochas metavulcânicas máficas intensamente hidrotermalizadas, tendo as mineralizações sido geradas no período Arqueano, entre 2,7 e 2,5 bilhões de

anos atrás. As mineralizações de cobre se distribuem ao longo de duas zonas marcantes denominadas Cinturão Norte e Cinturão Sul do cobre, orientadas na direção leste-oeste no centro da bacia (Figura 34). O enriquecimento em cobre nessas duas zonas da bacia fica muito evidente no perfil AB (Figura 35), de norte a sul, que corta o Domínio Bacajá, a Bacia Carajás e os domínios Canaã dos Carajás, Sapucaia e Rio Maria. Os teores de cobre são muito mais altos nas duas zonas do que nos domínios mencionados.

Estudos indicam que, para a grande maioria dos elementos químicos, não há indícios de contaminação antropogênica.

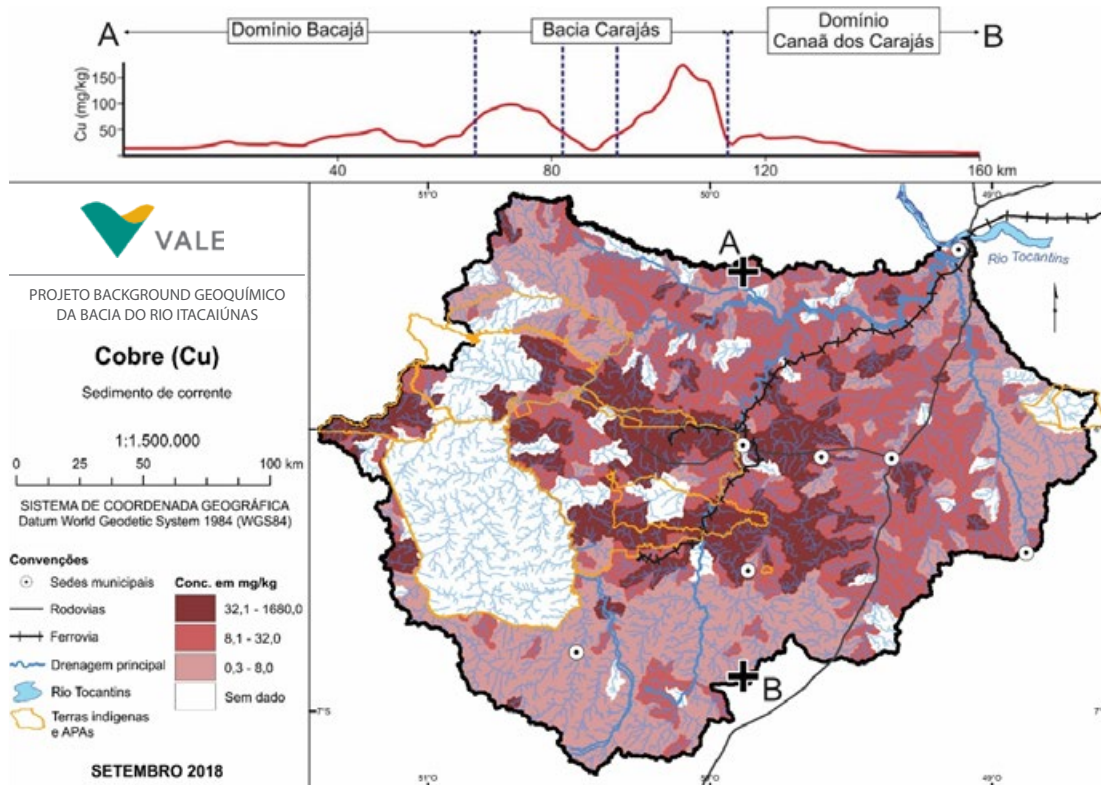


Figura 35: Mapa geoquímico de distribuição de cobre em sedimentos de corrente da bacia do rio Itacaiúnas. A-B – Perfil Norte-Sul mostrando as variações dos conteúdos de cobre e destacando os valores notavelmente mais elevados nos cinturões norte e sul do cobre.

Levantamento de sedimentos de corrente da porção centro-sul da bacia, amostrados e analisados em projeto da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), cujos resultados foram tratados e interpretados por pesquisadores do ITV, revela que, de modo geral, eles não sofreram contaminação antrópica, sendo localmente observados teores anômalos devido à influência de fontes naturais. Não foram encontradas evidências claras de impacto devido às atividades de mineração na assinatura geoquímica dos sedimentos de corrente. Nessa escala do estudo, a variação nas concentrações de background de todos elementos investigados nas amostras de sedimento de corrente é maior que qualquer impacto antropogênico.

Os dados obtidos indicam que, para a grande maioria dos elementos químicos, não há indícios de contaminação antropogênica expressiva e, portanto, os riscos ambientais são limitados. Fe e Mn revelaram concentrações relativamente elevadas, em particular em áreas desmatadas e cobertas

por pastagens, sendo seu comportamento fortemente condicionado pelo clima tropical e pelo fluxo superficial intenso durante o período chuvoso. Tais elementos devem ser monitorados na BHRI. O Hg, elemento que pode ser visto como potencial contaminante na BHRI, não apresentou teores expressivos nos diferentes meios analisados e, embora estudos mais detalhados sejam recomendáveis, não parece constituir ameaça à qualidade ambiental da bacia.

Os dados continuam sob análise para a geração de material que fique disponível em mídias acessíveis aos usuários e interessados. Além disso, a pesquisa no ITV segue com maior detalhamento em algumas sub-bacias de maior interesse.

Solos da Bacia do Rio Itacaiúnas

Os mapas geoquímicos de distribuição dos elementos e a análise de componentes principais (PCA) demonstraram que há notáveis similaridades entre as amostras de solos superficiais e subsuperficiais coletadas em um mesmo ponto, o que atesta a dominância do controle do ambiente geológico sobre possíveis influências antropogênicas. Contrastes mais acentuados entre valores superiores de background geoquímico refletem diferenças no ambiente geológico. Comparados com os valores de referência definidos pelo Conama, os Valores de Qualidade de Referência (VQR) para a

maioria dos elementos potencialmente tóxicos se situam dentro dos limites recomendados, exceto para Cu e Cr. Para estes elementos e, também, para Co, os valores superiores de background determinados por métodos rigorosos são muito elevados. Isso indica que os valores de referência do Conama para esses elementos são irrealistas para as condições da bacia do Itacaiúnas. Concentrações anômalas de elementos potencialmente tóxicos (PTEs) mostram forte correlação com domínios litológicos ou zonas mineralizadas específicas na bacia e isso fortalece a hipótese de sua origem geogênica.

Conclusões do Estudo Geoquímico

Os dados obtidos indicam que, para a grande maioria dos elementos químicos, não há indícios de contaminação antropogênica expressiva e, portanto, os riscos ambientais são muito baixos. Fe e Mn revelaram concentrações relativamente elevadas, em particular em áreas desmatadas e cobertas por pastagens, sendo o seu comportamento fortemente condicionado pelo clima tropical e pelo fluxo superficial intenso de água no período chuvoso. Tais elementos devem ser monitorados na BHRI. O Hg,

elemento que pode ser visto como potencial contaminante na BHRI, não apresentou teores expressivos nos diferentes meios analisados e não há indicação de constituir ameaça à qualidade ambiental da bacia.

Os dados continuam sob análise para geração de material adicional que ficará disponível no banco de dados do projeto e acessível aos usuários e interessados. A pesquisa segue com maior detalhamento em algumas sub-bacias com interesses específicos.

Estudo das Lagoas de Altitude da Flona de Carajás

No platô de Carajás, em áreas cobertas por canga ferruginosa, ocorrem diversas lagoas de pequenas dimensões que guardam o registro da evolução de seu entorno durante os últimos 50 mil anos. As lagoas do Violão, do Amendoim e Três Irmãs se situam no platô Serra Sul (Figura 36), onde se situa a mina de ferro de S11D. Nesse contexto, entender a evolução destas lagoas, por meio da caracterização de seus sedimentos, águas e pólenes, é relevante para a compreensão de como se formaram

as cangas rupestres e seu ecossistema. Estudos detalhados das características físicas, químicas e biológicas das lagoas definiram a idade de sua formação e como se deu o desenvolvimento da flora terrestre ao longo do tempo. Com os dados, foi possível estabelecer comparações entre as lagoas do platô e dessas com lagoas de outros platôs. Essa comparação mostra que ambientes lacustres situados no mesmo platô apresentam elevadas similaridades.



Figura 36: Porções centro-leste (A), leste (B) e oeste (C) do platô S11 na Serra Sul dos Carajás mostrando, respectivamente, as lagoas Amendoim, Violão e Três Irmãs (TI1, TI2 e TI3).

As lagoas do platô S11 podem ser classificadas como corpos de água doce de média altitude com bacias de contribuição pequenas, litologia pouco diversa, hidrologia restrita, profundidades rasas a muito rasas e reduzida movimentação horizontal e vertical de

suas águas (Tabela 6). A Lagoa Três Irmãs é composta por três lagoas menores (TI1, TI2 e TI3), das quais TI2 e TI3 podem apresentar conexão superficial das águas durante o período chuvoso. A bacia de contribuição da Lagoa do Violão apresenta a maior área (1,83 km²).

Lagoas	Altitude (m)	Área da bacia de contribuição (km ²)	Profundidade média (m)	Área superficial (km ²)	Índice de Estado Trófico (IET)
Violão	723,3	1,83	7,42	0,273	53-60
Amendoim	700,5	1,20	5,2	0,126	45-49
Três Irmãs 1	706	0,33	2,11	0,075	54-61
Três Irmãs 2	698	0,51	1,2	0,116	53-60
Três Irmãs 3	695,3	0,77	7,02	0,252	51-52

Tabela 6: Dados morfológicos, morfométricos e estado trófico das lagoas do platô S11.

Com base na análise dos parâmetros físico-químicos, orgânicos e inorgânicos, as águas das lagoas podem ser classificadas como fracamente estratificadas, tipo polimítico com qualidade variando de boa a excelente. Estes parâmetros estão em conformidade com os definidos para águas da classe II na legislação brasileira (Resolução Conama nº 357/05). O índice de estado trófico (IET) indica que as lagoas do Amendoim e TI3 são oligotróficas enquanto que as lagoas do Violão, TI1 e TI2 são mesotróficas (Tabela 6). Isso reflete a influência das características litológicas e geomorfológicas similares das bacias de contribuição destas lagoas.

O preenchimento sedimentar das lagoas apresenta espessuras variadas, porém com uma arquitetura deposicional semelhante. As lagoas do Violão e do Amendoim apresentam uma espessura sedimentar de ~10 m enquanto na Lagoa Três Irmãs 1 é <3 m. Em todas as lagoas, o preenchimento inicial é marcado por transporte de detritos das drenagens das bacias de contribuição até o centro. Essa deposição ocorre sob a forma de lobos deltaicos e pode variar lateralmente de acordo com oscilações no nível da lagoa e mudanças nas taxas de intemperismo das bacias de contribuição relacionadas com mudanças paleoclimáticas.

Os componentes isotópicos e geoquímicos dos sedimentos de fundo das lagoas também são controlados pelas características litológicas, geomorfológicas e geobotânicas de suas bacias. A análise desses dados indica que a lagoa TI2 e o "braço" da Lagoa do Violão são predominantemente orgânicos e empobrecidos em $\delta^{15}\text{N}$ devido às suas menores profundidades. As outras lagoas apresentam similaridades entre si, principalmente as lagoas do Violão (porções mais profundas) e TI1, uma vez que são basicamente detríticas. Os sedimentos das lagoas TI1 e Violão (Figura 37) possuem concentrações mais elevadas de ferro e alumínio, que é reflexo da predominância de contribuições de crostas lateríticas enriquecidas tanto em ferro quanto em

alumínio. O ferro possui elevada mobilidade, e, assim, sua distribuição nos sedimentos de fundo apresenta um comportamento heterogêneo entre as lagoas. O alumínio se particulariza por apresentar concentrações mais elevadas próximas às drenagens que fluem sobre crostas ferro-aluminosas. A distribuição do fósforo é mais homogênea na lagoa do Amendoim, com ponto de influxo localizado em sua margem sudoeste, que conecta a lagoa a um campo brejoso.

Análises de Metagenômica dos sedimentos das lagoas para avaliar a sua microbiota identificaram cerca de 2500 microrganismos. Além disso, a análise funcional realizada para as funções biológicas mais representativas sugere uma alta afinidade funcional nas lagoas estudadas.

A avaliação comparativa das características gerais das lagoas do platô S11 sugere que elas possuem características abióticas e bióticas muito similares.

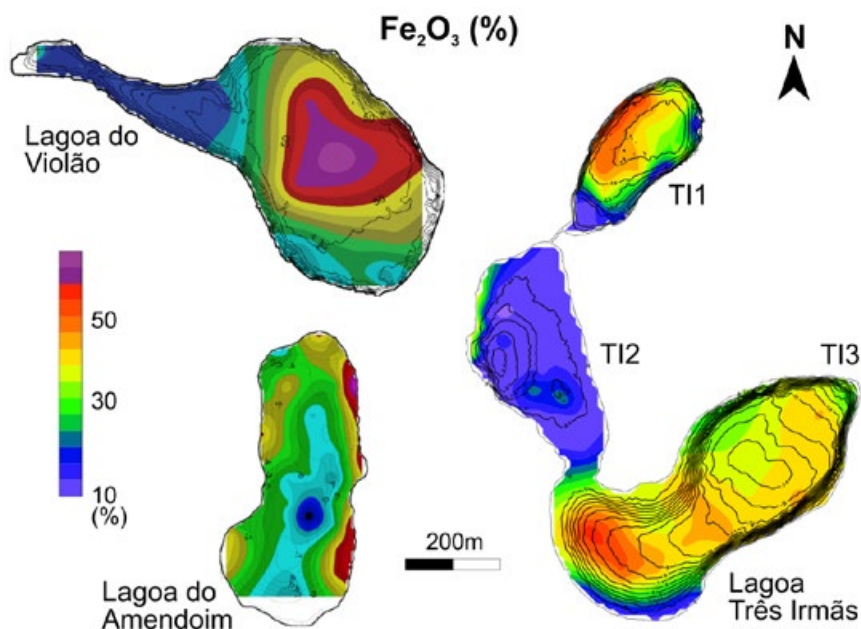


Figura 37: Distribuição espacial de Fe_2O_3 nos sedimentos de fundo das lagoas do platô S11.

Formação das Crostas Ferruginosas em Carajás

Os estudos dos processos de formação da canga ferruginosa (lateritas), que recobre os platôs da Serra dos Carajás, subsidiaram a compreensão da evolução da paisagem e da influência de processos abióticos e bióticos na sua origem. A canga endurecida preserva os platôs dos processos erosivos desde 70 milhões de anos atrás. A canga

ferruginosa atual resultou em boa parte da deposição de detritos (Figuras 38, 39), provenientes da degradação de antigos perfis lateríticos formados sobre as rochas vulcano-sedimentares da região. A crosta laterítica favoreceu a formação do rico minério de ferro de Carajás e a diversidade existente em termos de vegetação e fauna.



Figura 38: Superfície de canga do platô N1 na Serra Norte de Carajás, mostrando seixos de hematita agregados dispostos em camadas endurecidas.

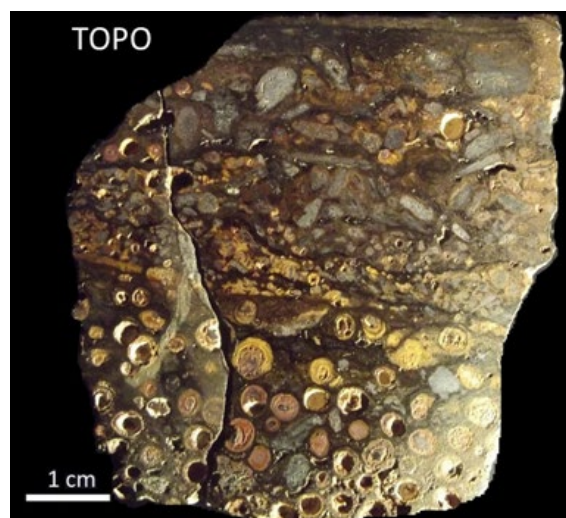


Figura 39: Detalhe textural da crosta laterítica detrítica mostrando intercalação de camadas com material brechado e ricas em pisolitos.

Os estudos realizados de caracterização mineralógica e geoquímica detalhada dessas crostas ferruginosas permitiram a elaboração de um modelo evolutivo da paisagem ao longo do tempo geológico desde 70 milhões de anos até os dias atuais. Este modelo está em desenvolvimento.

Os estudos sobre as crostas ferruginosas permitiram avanços

importantes na compreensão da evolução da paisagem em Carajás e no papel que exerceram na formação do ambiente de canga rupestre em meio à floresta tropical. O novo modelo proposto para a origem das formações lateríticas auxiliou no entendimento da formação e evolução do minério de ferro em Carajás.

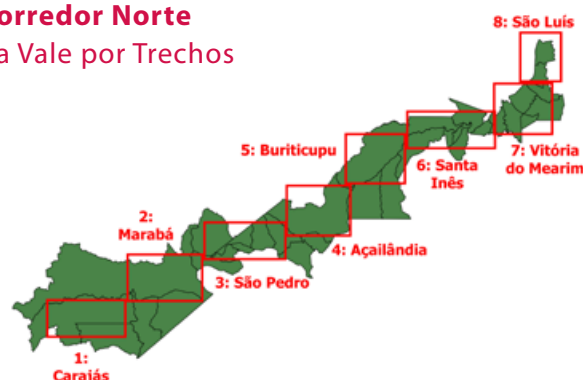
Tempo e Clima Aplicados à Mineração

Modelagem Climática Regional: Cenários de Mudanças do Clima

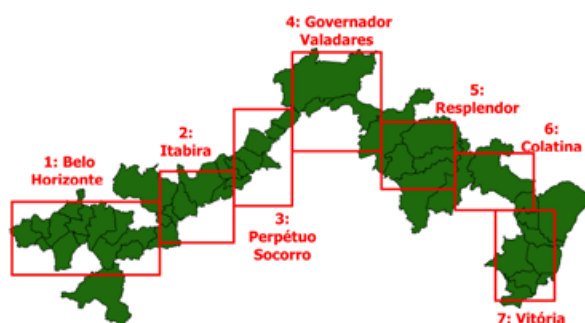
Obter dados e desenvolver modelos climáticos que ajudem a prever e a quantificar alterações são ações necessárias diante da crescente preocupação com os impactos da mudança do clima sobre as diversas atividades humanas e as condições de vida na Terra. Nos últimos anos, o ITV investiu na infraestrutura de monitoramento e modelagem numérica meteorológica nas regiões de atuação da Vale no Brasil, para auxiliar no planejamento e nas decisões com vistas a cenários de curto, médio e longo prazo.

Os efeitos das mudanças climáticas são estudados com o uso de modelos que incorporaram informações de emissões de gases do efeito estufa e geram os cenários futuros (projeções)*. Em cooperação com o Serviço Nacional de Tempo e Clima do Reino Unido (MetOffice) e em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram realizadas simulações por meio do Sistema de modelagem climática, o Providing Regional Climate for Impacts Studies (PRECIS). O objetivo foi o de produzir cenários de mudanças climáticas nas regiões de interesse da Vale no Brasil até 2050. Foram considerados nesses estudos dois cenários do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês): o RCP4.5, que está em consonância com o Acordo de Paris, e o RCP8.5, tomado como o pior cenário de emissão. Os Representative Concentration Pathways** (RCP) consideram diferentes trajetórias de concentração de gases do efeito que são possíveis de ocorrer até o ano de 2100, sendo incorporados nos modelos numéricos climáticos.

Corredor Norte da Vale por Trechos



Corredor Sul/Sudeste da Vale por Trechos



As projeções de mudança do clima, feitas para trechos nos Corredores Norte e Sul/Sudeste da Vale, foram obtidas pela diferença entre o clima futuro (média de 2020 a 2050) e o clima atual (média de 1981 a 2005). Em relação à média observada, os resultados apontam para um considerável aumento da precipitação do quadrimestre chuvoso (janeiro a abril) sobre o porto

* doi.org/10.4236/acs.2014.42018 e doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711

** doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z

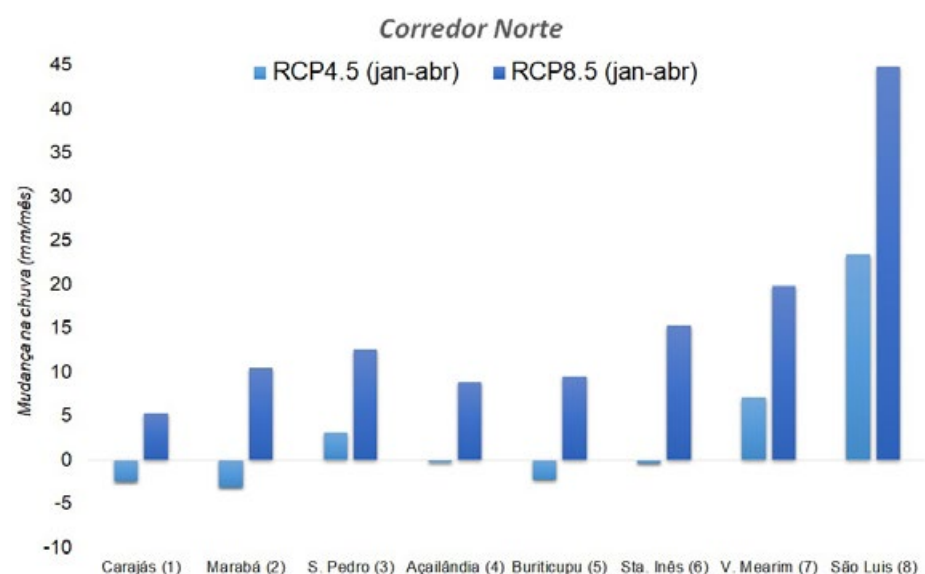


Figura 40: Projeções de mudança na chuva do quadrimestre chuvoso (Janeiro a Abril) em trechos do Corredor Norte da Vale para o período de 2020 a 2050, considerando cenários de emissões do IPCC (RCP4.5 e RCP8.5). Os valores positivos indicam o aumento de chuva no futuro enquanto os valores negativos, a redução de chuva.

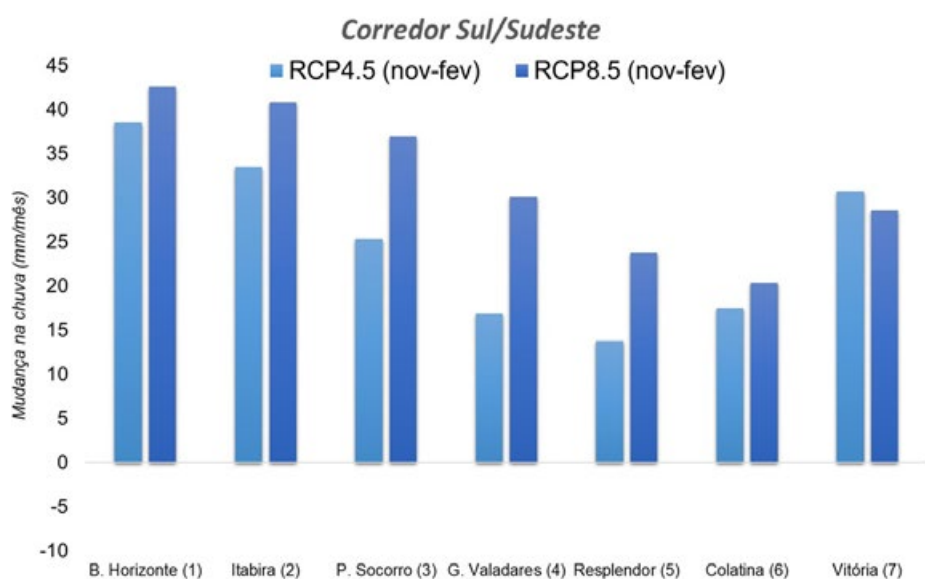


Figura 41: Projeções de mudança nos padrões de chuva do quadrimestre chuvoso (Novembro a Fevereiro) em trechos do Corredor Sul/Sudeste da Vale para o período de 2020 a 2050, considerando cenários de emissões do IPCC (RCP4.5 e RCP8.5). Os valores positivos indicam aumento de chuva no futuro.

Em relação à média observada, os resultados apontam para um considerável aumento da precipitação do quadrimestre chuvoso (janeiro a abril) sobre o porto (Ponta da Madeira-MA) do que sobre as minas (Carajás-PA).

Ponta da Madeira, em São Luís-MA, do que sobre as minas em Carajás (Figura 40). Também foi possível prever a redução das chuvas do quadrimestre seco (julho a outubro), sobretudo nas minas. Por sua vez, sobre o Corredor Sul/Sudeste da Vale, o modelo indica aumento das chuvas do quadrimestre chuvoso (novembro a fevereiro), principalmente sobre as áreas de mineração e sobre o porto de Tubarão, em Vitória-ES (Figura 41), enquanto para o quadrimestre seco (julho a setembro) é esperada uma redução das chuvas, especialmente sobre o porto.

Cálculo da Contribuição das Emissões de Gases de Efeito Estufa na Produção de Minério de Ferro - ITVCM

A produção de Minério de Ferro (MFe) e os processos de fabricação de aço foram responsáveis por cerca de 7% das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE) na última década do século XX. Embora se observe uma tendência de redução dessas emissões, elas ainda representam 6% do que foi emitido à atmosfera na primeira década do século XXI.

No Brasil, devido às características das minas e da matriz energética do país, a emissão de GEE na produção de MFe é menor do que em outros países. A empresa tem o objetivo de reduzir em 5% as emissões diretas de GEE até 2030. Por esse motivo, a Vale tem investido em alta tecnologia na produção mineral, a exemplo da tecnologia *truckless* aplicada na Serra Sul.

Com o intuito de quantificar a contribuição da Vale ao esforço global de mitigação do aquecimento global, o ITV desenvolveu o modelo climático ITV Climate Model (ITVCM, da sigla em inglês), acesso disponível no Instituto. Este modelo fundamenta-se nas correlações existentes entre emissões de gases que intensificam o efeito estufa e as variáveis representativas do clima global, particularmente considerando a temperatura média da superfície da Terra e o nível médio dos mares.

Para a aplicação do ITVCM, foram utilizados dados conhecidos de emissões

de CO₂ e da produção de minério de ferro no complexo de Carajás, no período de 2005 a 2015. Também foram usadas estimativas que consideram as tecnologias empregadas na mina Serra Sul, na produção de mesma quantidade de minério de ferro e no mesmo período. Essa abordagem assegura a comparabilidade entre emissões e respectivas contribuições ao aumento na temperatura média da superfície da Terra.

Segundo os cálculos do modelo ITVCM, as emissões na produção de minério de ferro, no período de 2005 a 2015, pelo Complexo de Carajás, contribuíram para o aumento de 0,00001°C na temperatura da superfície da Terra. Este valor é aproximadamente 50% maior que o valor obtido para o Complexo S11D, onde foi implementada a tecnologia *truckless*, sendo a diferença entre esses valores igual a 0,0000045°C. A contribuição das emissões de GEE do Complexo S11D para a elevação dos níveis dos mares é aproximadamente 60% menor do que a contribuição do Complexo de Carajás. Os valores absolutos são baixos para uma atividade industrial com o porte da mineração em Carajás.

Considerando o contexto das políticas internacionais do clima (Acordo de Paris), que resultaram no estabelecimento da meta de aumento máximo de 1,5°C a 2°C na temperatura média global, a implantação de projetos minerários com novas tecnologias, a exemplo do Complexo S11D, representa uma importante contribuição para o alcance desse objetivo.

Monitoramento Atmosférico e Previsões Meteorológicas de Curto Prazo

Na cadeia de mineração, a produção, o transporte e o embarque de minério, bem como as atividades de manutenção são rotinas operacionais influenciadas pelas condições de tempo. Para otimizar as rotinas operacionais impactadas pelo tempo adverso nessa cadeia, o ITV instalou oito estações meteorológicas, que registram variáveis atmosféricas para o monitoramento e avaliação das previsões numéricas de tempo. As estações estão localizadas desde as minas em Carajás, ao longo da estrada de ferro, até o Porto da Madeira (MA). Os dados das estações servem de base para a avaliação das previsões meteorológicas e podem ser utilizados tanto para melhorar o desempenho dos modelos quanto para investigar o ciclo horário de variáveis meteorológicas na região da cadeia mineral*. Adicionalmente, também são utilizados dados interpolados de precipitação, derivados da combinação de estimativas de satélite e estações meteorológicas.

Como as condições atmosféricas adversas não podem ser evitadas, mas podem ser previstas, o ITV desenvolve modelagem numérica de tempo para a geração de boletins meteorológicos de previsão sob medida para regiões onde a Vale possui atividades. As rotinas de previsão do tempo desenvolvidas no ITV usam modelagem numérica com o modelo regional *Weather Research and Forecasting* (WRF) e previsões semanais com o modelo *Global Forecast System* (GFS) (Figura 42).

O primeiro é rodado por meio do computador de alto desempenho do ITV; e o segundo com previsões obtidas semanalmente junto ao *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Os modelos servem de base para a geração dos boletins meteorológicos que destacam a previsão de chuva para toda a cadeia minero-logística (mina, trechos da ferrovia e porto).

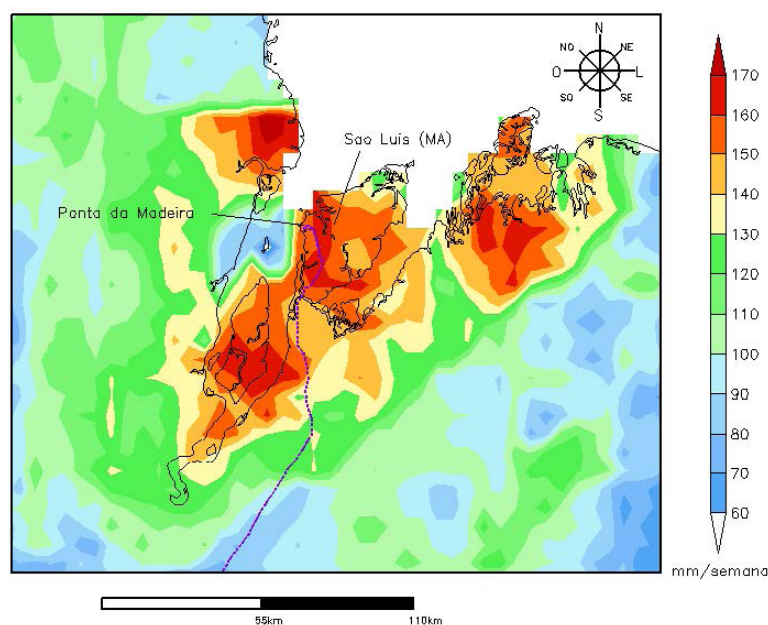


Figura 42: Mapa de previsão meteorológica semanal de precipitação, válido entre 08/01/2018 e 14/01/2018 para a região do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luís (MA). As cores em laranja e vermelho próximas ao porto destacam os altos valores pluviométricos previstos para a região.

* [dx.doi.org/10.5380/abclima.v13i0.34723](https://doi.org/10.5380/abclima.v13i0.34723)

A fim de verificar qual a melhor opção para as previsões meteorológicas, o ITV também realiza estudos com objetivo de avaliar quantitativa e qualitativamente o desempenho dos principais modelos numéricos de tempo para o leste da Amazônia*. A avaliação das previsões meteorológicas é baseada em metodologias

de estimativas de erro, que ajudam a avaliar se o modelo superestima (viés positivo) ou subestima (viés negativo) os valores observados. A avaliação das previsões de chuva mostrou maior precisão para as previsões de 48h, quando o erro médio diminui para valores entre 2 e 3 mm/dia.

Monitoramento Atmosférico e Previsões Meteorológicas de Médio Prazo

A cadeia de mineração também é afetada pelos acumulados de chuva sazonal. Sendo assim, o ITV realiza o monitoramento da chuva que ocorre nessas escalas de tempo em diferentes regiões do Pará e Maranhão, utilizando os dados citados no monitoramento de curto prazo.

A previsão sazonal (previsão do acumulado de chuva para os próximos três meses) é gerada mensalmente, conjuntamente com o monitoramento dos três meses anteriores. Essa previsão é feita através do método estatístico da Regressão Linear, que utiliza séries históricas da precipitação do ponto de interesse e da temperatura da superfície do mar em diferentes regiões dos Oceanos Pacífico e Atlântico. A Figura 43 mostra as precipitações previstas [geradas pelo ITV e recebidas pela Gerência de Meio Ambiente da Vale, produzidas por empresa externa] e observadas em diferentes trimestres do ano de 2018, iniciando em MAM/2018 (março-abril-maio de 2018) e finalizando em

NDJ/2018 (novembro-dezembro de 2018 e janeiro de 2019).

Para essa avaliação, considera-se que o valor previsto foi próximo do observado quando esse valor foi 20% superior ou inferior a ele. Por exemplo, o valor previsto pelo ITV em MAM/2018 (511,8mm) foi 10,24% superior ao valor observado (464,2mm), sendo a previsão considerada dessa forma próxima ao valor observado. Os resultados mostram que as previsões para a Serra Norte em Carajás-PA, realizadas pelo ITV, estiveram próximas do observado em cinco de nove trimestres. Além disso, para três [MJJ/2018, JJA/2018 e SON/2018] dos quatro trimestres restantes, o valor previsto foi mais próximo do observado do que o previsto pela outra fonte. Por fim, entre os nove trimestres analisados, em apenas um a outra fonte teve o resultado próximo ao observado e, entre os oito restantes, também em apenas um [AMJ/2018] esteve mais próximo do observado do que o ITV.

O ITV desenvolve previsão sazonal para a geração de boletins meteorológicos sob medida para regiões do Pará e Maranhão, onde a Vale atua. A avaliação das previsões mostrou que o método estatístico utilizado no ITV teve uma maior acertabilidade para as previsões sazonais do que outros métodos aplicados. Esse é um resultado preliminar ainda em validação.

* doi.org/10.4236/acs.2013.33037

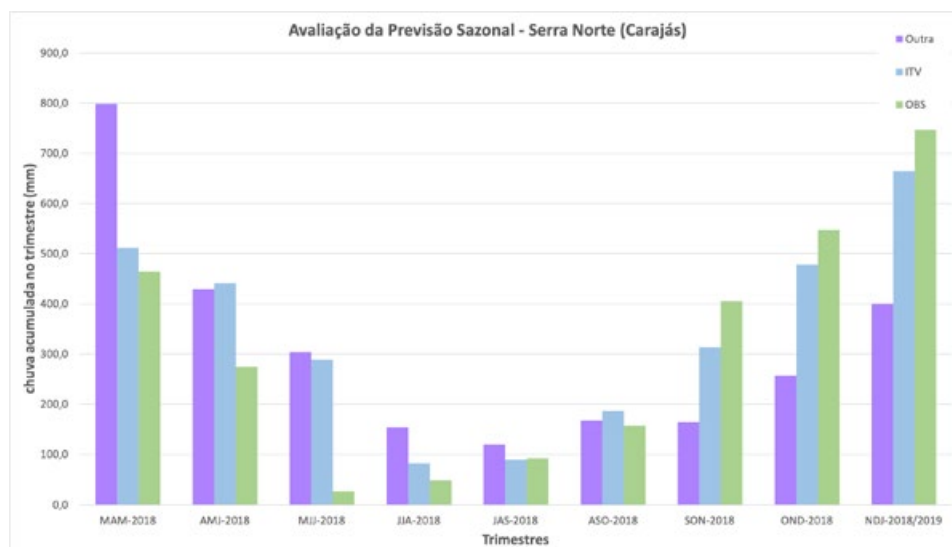


Figura 43: Acumulado de Precipitação sazonal observado (verde) e previsto por diferentes fontes (ITV-azul e Outra-lilás) sobre a Serra Norte em Carajás – PA.

Distribuição Espaço-Temporal de Raios

A incidência de raios caracteriza-se como uma ameaça natural aos empregados de áreas operacionais em minas, ferrovias e portos. Além disso, pode causar danos irreparáveis a equipamentos e infraestrutura, gerando altos prejuízos financeiros. Estudos realizados no ITV analisaram a incidência de raios entre os anos de 2008 a 2017 em áreas do Pará, Maranhão, Espírito Santo e Minas Gerais. Com base em dados obtidos junto ao *Sferics Timing and Ranging Network* (STARNET), que captura pulsos associados à incidência de raios em toda a região tropical do planeta, foram calculadas médias mensais da incidência de raios para áreas de mina, ferrovia e porto.

Os resultados do mapeamento mostram uma sazonalidade bem definida nos valores mínimos e máximos da incidência de raios. A variabilidade de raios está associada aos padrões pluviométricos regionais e à atuação de mecanismos atmosféricos de grande escala. Vale ressaltar que o Sistema Norte da Vale está localizado no leste da Amazônia, onde a

alta umidade do ar e a energia disponível para a formação de nuvens causadoras de tempestades são maiores em relação a outras regiões do Brasil. Desse modo, a quantidade de raios mapeada para o Sistema Norte é considerada elevada. Foi observado nessa região o máximo de incidência de raios: mais de 300 a cada 400 km², entre os meses de fevereiro e abril, nos trechos mais ao norte da ferrovia, incluindo o Porto de Ponta da Madeira (Figura 44A). Por outro lado, os trechos mais próximos a Carajás apresentam o máximo de incidência de raios no mês de dezembro (Figura 44B). Para o Sistema Sul, os meses de verão do Hemisfério Sul (dezembro, janeiro e fevereiro) são aqueles com maior registro da incidência em áreas de mineração (Figura 44C). Os resultados do levantamento histórico da incidência de raios contribuíram para o relatório de risco da Gerência de Tecnologia Ambiental, além de colaborar com o planejamento de atividades operacionais, como a manutenção de ferrovias.

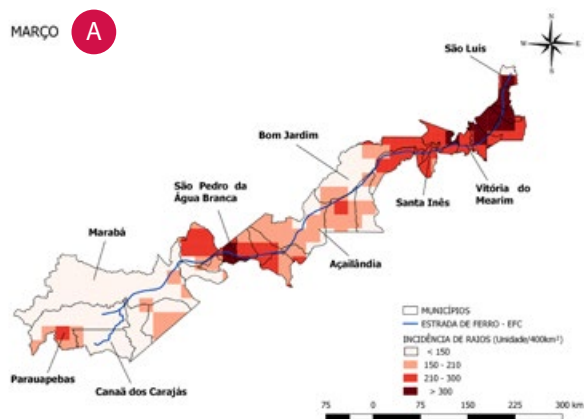


Figura 44A: Média da incidência de raios para o Corredor Norte da Vale, considerando o período de 2008 a 2017 para os meses de março.

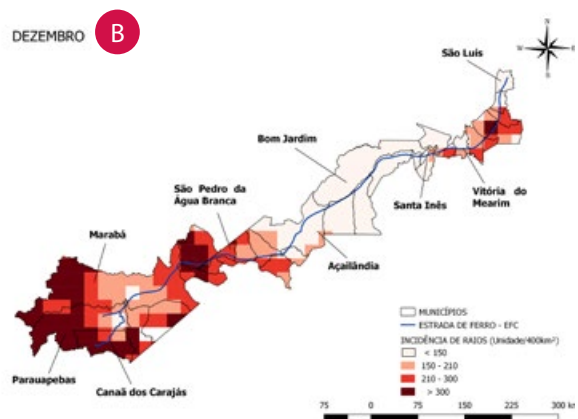


Figura 44B: Média da incidência de raios para o Corredor Sudeste da Vale, considerando o período de 2008 a 2017 para o mês de dezembro.

Além do conhecimento da variabilidade mensal, útil para o planejamento de atividades ao ar livre sujeitas à incidência de raios, o ITV busca investigar a incidência horária de raios, em pontos estratégicos das regiões onde já foi realizado o mapeamento mensal. Assim, é possível indicar qual é o período do dia em que a frequência da incidência de raios é maior. O próximo passo da pesquisa e desenvolvimento na temática raios é ajudar a Vale na implantação do sistema de monitoramento atmosférico e previsões meteorológicas de curtíssimo prazo em Carajás. Tal sistema inclui a instalação de um radar meteorológico e sensores de campo, os quais, em conjunto, são capazes de prever com alto índice de acerto a incidência de raios em escala local.

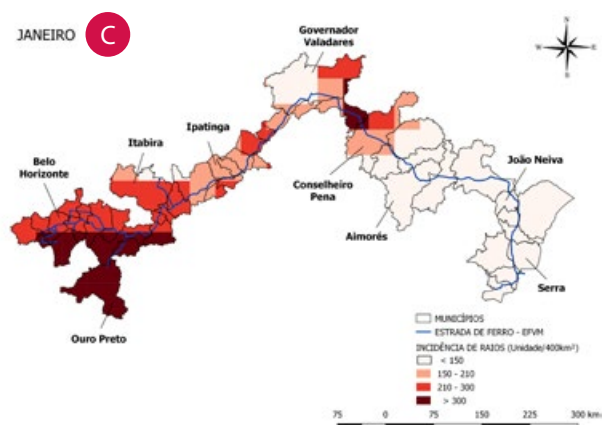


Figura 44C: Média da incidência de raios para o Corredor Sul da Vale, considerando o período de 2008 a 2017 para o mês de janeiro.

Biodiversidade e Serviços de Ecossistemas

A Importância de Estudos sobre a Biodiversidade para a Mineração

Desde a Cúpula dos Povos, realizada em Joanesburgo em 2002, também conhecida como Rio+10, a inclusão do setor empresarial como agente importante para a manutenção da vida na Terra começou a tomar corpo. Desde então, a União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) e, posteriormente, o Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM), entre outras organizações que apoiam o setor empresarial nas suas relações com o meio ambiente, passaram a tratar do impacto das atividades econômicas sobre a biodiversidade e das melhores práticas de manejo da biodiversidade. A ICMM congrega 27 mineradoras e tem sido um importante fórum de discussão sobre o papel da mineração para a sustentabilidade na Terra, tendo produzido indicações importantes para integrar o setor na implantação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, estabelecidos pelas Nações Unidas.

A biodiversidade é essencial para manter o funcionamento dos ecossistemas globais e, quando contribui diretamente ou indiretamente para o bem-estar humano, é considerada como um serviço ecossistêmico. A Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB) definiu a biodiversidade como “a variabilidade entre organismos vivos provenientes de todas as fontes”, o que inclui os ecossistemas terrestres, marinhos e outros de natureza aquática, assim como os complexos ecológicos dos quais esses ecossistemas fazem parte e a diversidade das espécies entre si, entre espécies diferentes e de ecossistemas. Como ilustrado na Figura 45, essa variabilidade pode se referir à a) Taxonomia (número de espécies conhecidas e identificadas); b) Genética (heterogeneidade dos genes presentes nos diferentes indivíduos); c) Filogenia (grau de parentesco existente entre as diferentes espécies); d) Funcional (papel ou função da espécie dentro do ecossistema); e) Interações (interações entre diferentes espécies que são a base para vários processos e funções de ecossistema).

**Biodiversidade =
variabilidade dos
organismos vivos**

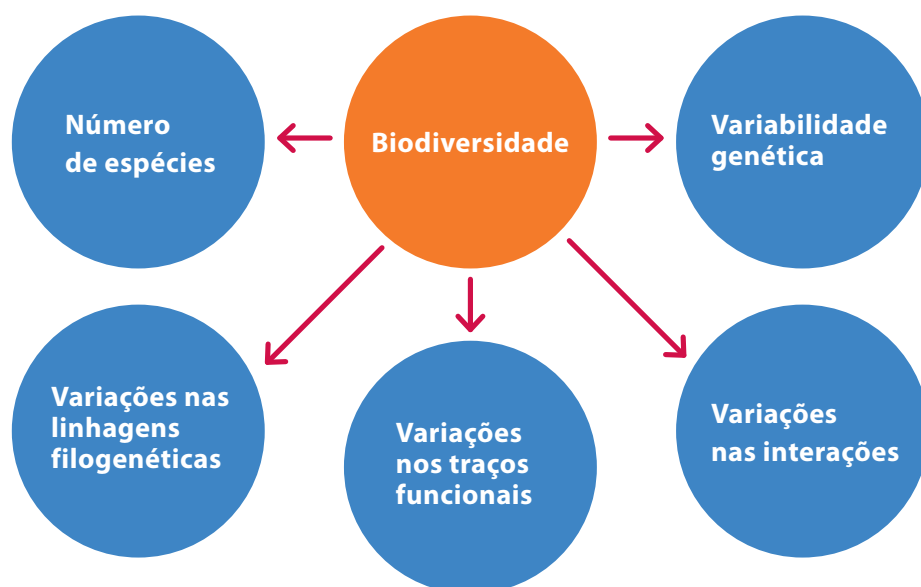
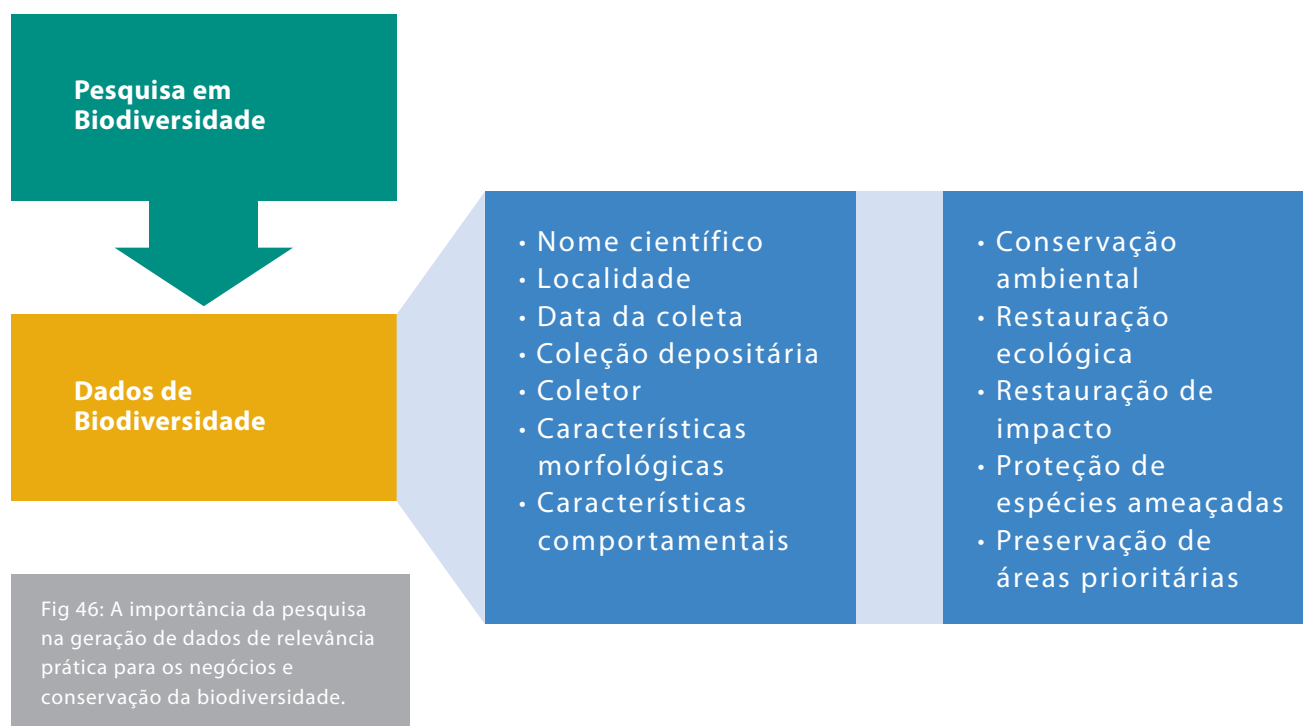


Figura 45: Biodiversidade e suas abordagens.

As pesquisas sobre a biodiversidade de áreas de mineração são fundamentais para assegurar as estratégias efetivas de conservação de espécies e redução de impactos. A adoção de tais estratégias requer uma ampla integração de conhecimentos, colocando-se em destaque a capacidade de gerar, analisar, interpretar e apresentar informações que representam um ecossistema. A qualidade dos dados e informações são essenciais para entender as diversas relações entre os indivíduos e o ecossistema, a integridade do sistema e como

ele funciona. A estruturação, a organização e a validação de bancos de dados da biodiversidade são importantes para a oferta de informações necessárias tanto para agilizar quanto para garantir segurança nas respostas às demandas de órgãos públicos no processo de licenciamento ambiental, no monitoramento de áreas em recuperação, nas análises de impacto e desenvolvimento de estratégias efetivas de conservação de espécies. Existe uma forte relação entre a mineração e a pesquisa em biodiversidade (Figura 46).



Da compilação de dados prévios sobre a fauna e flora de Carajás, a partir de relatórios de estudos realizados para fins de licenciamento e estudos recentes desenvolvidos no ITV, foram identificadas: 1.094 espécies de plantas que ocorrem nas áreas de canga em Carajás, 83 espécies de morcegos, 570 espécies de aves e 219 espécies de abelhas. A partir

da identificação das espécies e registros de ocorrência, foi possível trabalhar com modelos de distribuição atual e futura.

O foco inicial de pesquisa no ITV foi sobre ecologia de cangas, as interações entre fauna e flora, mais especificamente a polinização e a dispersão de sementes.

Como cerca de 90% das plantas com flores se beneficiam de polinização, um estudo procurou levantar quais seriam os polinizadores mais importantes. A análise dos atributos das flores, a partir da sua forma, cor, disposição dos órgãos reprodutores, permite estimar quais as síndromes de polinização, isto é, quais seriam os polinizadores daquelas plantas.

Os resultados apontam que a maior parte das plantas de canga são polinizadas por abelhas (Figura 47). Essa é uma informação importante, pois a polinização implica na produção de frutos e sementes nas plantas, servindo de base para a manutenção das áreas naturais e para as estratégias de recuperação de áreas degradadas.

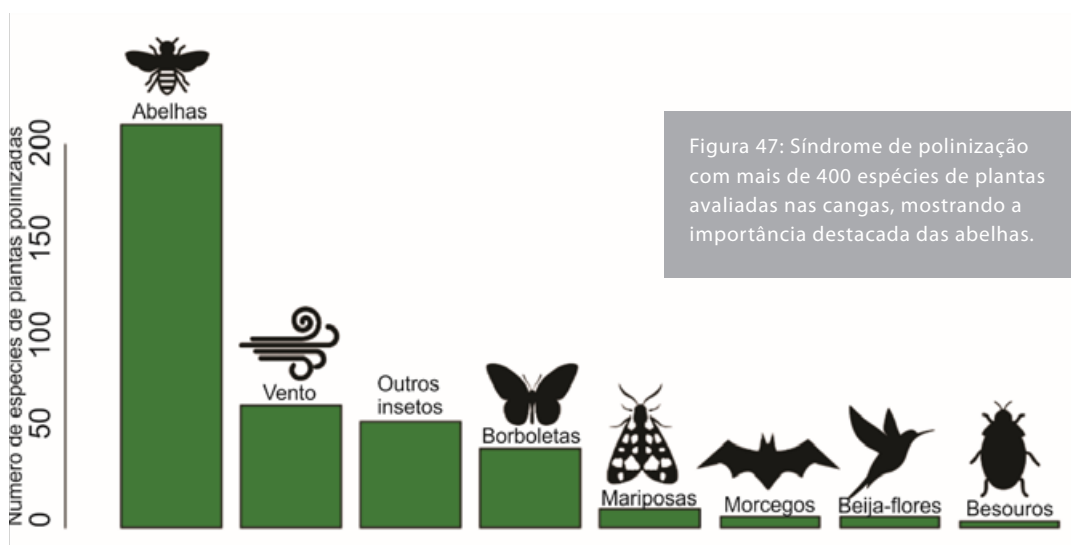


Figura 47: Síndrome de polinização com mais de 400 espécies de plantas avaliadas nas cangas, mostrando a importância destacada das abelhas.

Os estudos da Flora de Carajás, com seus desdobramentos e aplicações, têm subsidiado estratégias de conservação de recursos naturais na área. O projeto da Flora das Cangas foi essencial para a determinação das plantas endêmicas, raras e ameaçadas de Carajás. As espécies invasoras na área da Serra Sul de Carajás foram avaliadas e isso resultou na proposição de bases para o estudo de plantas recomendadas para a recuperação de áreas degradadas*. Essas contribuições são importantes não somente para Carajás mas para áreas do Pará de um modo geral.

É certo que as mudanças de clima em andamento irão impactar a flora, a fauna e os ambientes naturais nas próximas

décadas. A partir dos bancos de dados das espécies que ocorrem em Carajás, a distribuição futura de espécies tem sido modelada. Outros estudos em desenvolvimento são a proposta de corredores ecológicos, baseados em ecologia da paisagem, visando ao aumento da conectividade da Floresta Nacional (Flona) com outras áreas protegidas.

Desde o início dos trabalhos com a Flora de Carajás, coletas especiais de material certificado por especialistas para a formação de um banco de DNA barcode foram uma das prioridades do grupo do ITV, conforme apresentado em outro tópico desse relatório.

* doi.org/10.1111/aec.12470

Flora das Cangas de Carajás

Na Serra dos Carajás, depósitos de ferro descobertos há 50 anos despontam no topo de algumas serras, constituindo uma vegetação típica, conhecida como Canga, que divide o espaço com uma vegetação circundante de floresta (Figura 48). O projeto de exploração mineral representou um novo modelo de uso sustentável dos recursos naturais alinhado à preservação ambiental,

levando à criação da Floresta Nacional (Flona) de Carajás em 1998. Seguindo a mesma lógica de proteger a diversidade biológica e a manutenção dos serviços ecossistêmicos em áreas de canga das Serras do Tarzan e da Bocaina, foi decretada em junho de 2017 a criação do Parque Nacional dos Campos Ferruginosos (PNCF), de maneira a propiciar estabilidade ambiental na região.



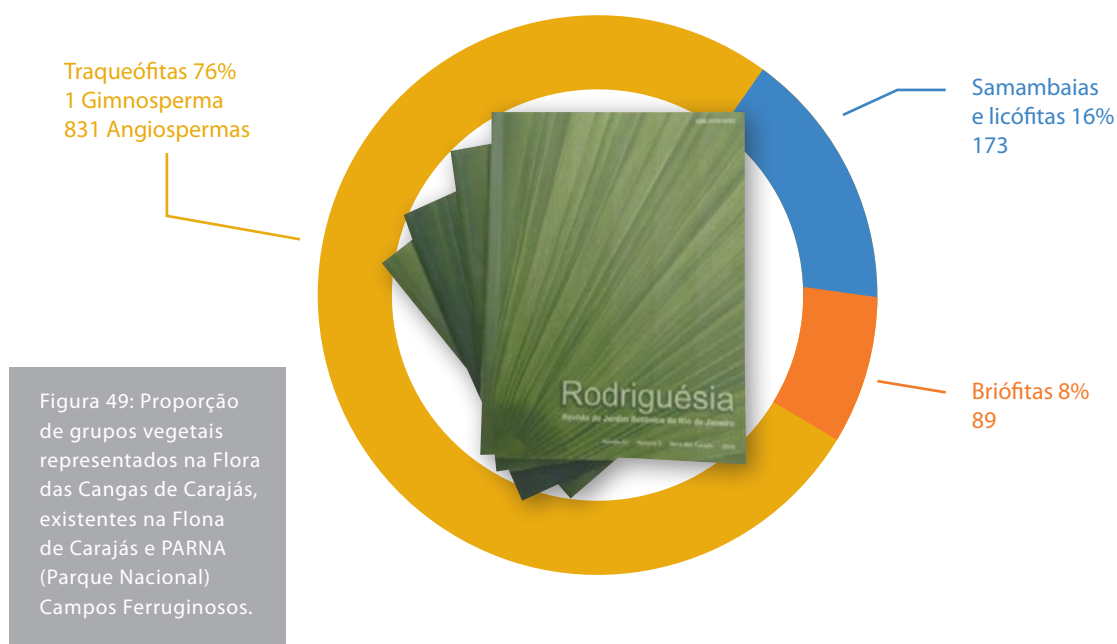
Figura 48: Paisagem de canga na Serra dos Carajás circundada pela floresta.

No projeto da Flora das Cangas de Carajás foram estudadas 1094 espécies, representando 15% das espécies conhecidas do estado do Pará.

Pesquisas sobre a flora das cangas de Carajás iniciaram em 1969, mas ganham impulso com a criação do ITV. Até 2014, período anterior ao projeto, acreditava-se existir entre 250 e 600 espécies nas cangas de Carajás. Com a conclusão do projeto, foram contabilizadas 1.094 espécies para essas áreas, representando aproximadamente 15% das espécies conhecidas no estado do Pará. Essa pesquisa contou com uma equipe de botânicos do ITV, em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), num projeto que integrou 145 botânicos de mais de 30 instituições do Brasil e do

exterior. A flora foi publicada sob a forma de monografias botânicas organizadas por família, publicadas na importante revista "Rodriguésia", do Jardim Botânico do Rio de Janeiro (<http://rodriguesia.jbrj.gov.br/>) (ver Figura 48). Ao todo, foram publicados quatro fascículos totalizando 164 monografias de famílias de briófitas, samambaias e licófitas e plantas com sementes (Figura 49). Este projeto, alavancou a pesquisa botânica na região, gerando publicações importantes que contribuíram para aprovação, pela CAPES, do curso de doutoramento em Botânica no MPEG, iniciado em 2018.

A Flora de Carajás possibilita a formação de uma base de dados única para empreendedores do setor mineral. Por sua importância na relação entre biodiversidade e negócios, uma plataforma digital sobre essa flora se encontra em desenvolvimento no ITV.



As plantas coletadas no projeto foram incorporadas em coleções botânicas de referência para a Flora de Carajás, destacando-se os herbários do MPEG, da Universidade Federal de Minas Gerais, do Jardim Botânico do Rio de Janeiro e da

Vale em Carajás (Figura 50). Mais de quatro mil exemplares foram coletados, 30% dos quais incluíam amostras para o banco de DNA do ITV, abrindo possibilidades para novos rumos na pesquisa botânica e ecológica na região.



Figura 50: Herbário de Carajás (HCJS): Ana Maria Giulietti, ex-pesquisadora do ITV, e empregado da VALE, verificando materiais provenientes da região.

Ocorrência de Espécies Endêmicas

A lista de espécies botânicas das cangas de Carajás, anterior ao projeto, indicava a ocorrência de 58 espécies, potencialmente descritas como exclusivas da Flona de Carajás. A modelagem espacial de distribuição de espécies tornou possível evidenciar áreas em que havia maior probabilidade de novos registros dessas plantas*.



Censo de Plantas Consideradas Raras

Espécies que possuem baixa abundância, nicho ecológico restrito ou pequena distribuição geográfica são reconhecidas como raras e classificadas em diferentes tipos. O estudo realizado pela equipe do ITV foi o primeiro a avaliar espécies consideradas raras para o Brasil presentes nas cangas amazônicas.

Foram contabilizados mais de 35.000 espécimes para avaliação da densidade, distribuição e correlação com variáveis ambientais. Espécies herbáceas de ciclo de vida curto apresentaram os maiores valores de densidade, como foi o caso de *Borreria semiamplexicaulis* (Figura 52). Todas as espécies estudadas mostraram-se

* doi.org/10.1590/2175-7860201667405

abundantes dentro das áreas da Flona de Carajás. Isso indica que elas não são objetos de ações especiais no local de acordo com a legislação vigente, por não se enquadrarem em outras categorias, como as endêmicas e ameaçadas. Os resultados desse estudo fornecem informações essenciais à conservação dessas espécies.

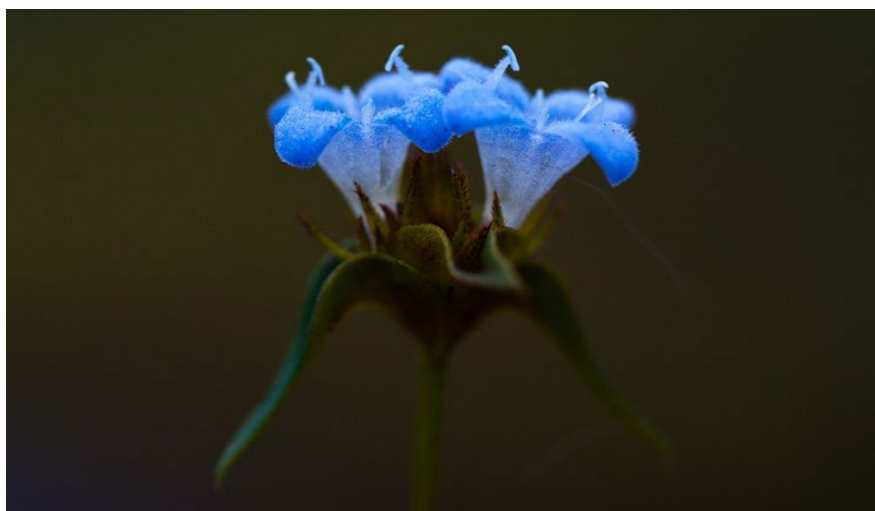


Figura 52: *Borreria semiamplexicaulis*, considerada planta rara do Brasil, mas não exclusiva de Carajás.

Espécies de Plantas Ameaçadas de Carajás

O status das espécies ameaçadas de Carajás foi estudado conforme a portaria 443-MMA. Para endossar a reavaliação, foram necessários intensos trabalhos de buscas dessas espécies, o que envolveu a realização de expedições ao longo da Serra dos Carajás e áreas adjacentes. Como resultado, após a consolidação dos dados, foram sugeridas alterações de categorias de ameaça para duas espécies antes consideradas como criticamente ameaçadas. A primeira, *Monogereion carajensis*, passou para a categoria ameaçada, uma situação menos severa do que a anterior, em virtude da descoberta da ampliação da área de distribuição dessa espécie, enquanto a segunda, *Mimosa skinneri* var. *carajarum*, passou para a categoria de vulnerável. Entretanto, a espécie *Ipomoea cavalcantei*, antes considerada ameaçada, entrou para a categoria de criticamente ameaçada.

Essas reavaliações evidenciam que as espécies precisam ser melhor estudadas para um enquadramento mais preciso nas categorias. Para conhecer o status genético de algumas das espécies de plantas ameaçadas de Carajás, são utilizadas ferramentas avançadas de genômica de paisagem. Um primeiro trabalho focado na flor de Carajás (*Ipomoea cavalcantei*) revelou que, ao contrário do que se esperava, a espécie possui uma população única com alta diversidade genética*. Também foram encontrados genes associados às condições ambientais das savanas amazônicas, que poderão auxiliar futuros programas de conservação e restauração dessa espécie. Outro trabalho recente avaliou como a perda de habitats naturais, impulsionada pela mineração, influencia a composição genética em duas espécies de plantas endêmicas das áreas de Cangas da Serra dos Carajás.

* doi.org/10.3389/fpls.2018.00532

Surpreendentemente, a perda de habitat não resultou em nenhuma consequência genética detectável, de modo que ambas as espécies parecem se desenvolver bem em ambientes de mineração*. Esses resultados sugerem que futuros esforços de conservação precisam considerar as espécies individualmente, já que nem todas as espécies ameaçadas possuem uma baixa diversidade genética nem são igualmente influenciadas pela perda de habitats naturais.

A **Genômica da paisagem** é um novo campo interdisciplinar que integra abordagens de ecologia da paisagem, genômica e genética de populações. Seu objetivo é entender como mudanças na paisagem influenciam a dinâmica das populações silvestres e a sua capacidade para se adaptar a esses novos ambientes. Tal abordagem permite identificar elementos da paisagem que reduzem a diversidade e o fluxo genético, e estimar os efeitos a longo prazo de desenhos alternativos de reservas ou corredores ecológicos sobre a variação genética e conectividade entre populações. Portanto, esse conhecimento é fundamental para garantir a conservação de espécies ameaçadas. Abordagens de genômica da paisagem podem ser utilizadas também para identificar e mapear adaptações a condições ambientais locais. Elas são relevantes para subsidiar programas de recuperação de áreas degradadas com informações sobre populações naturais mais propensas a persistirem em ambientes degradados.

O ITV tem se dedicado de maneira especial ao estudo de algumas espécies de interesse crítico para a mineração em Carajás. Dentre elas se destacam: a ***Ipomoea cavalcantei*** (Figura 53) e ***Isoetes cangae*** (Figura 57). Nos dois casos, o suporte da genética molecular, com o uso de várias técnicas e abordagens, e os estudos de multiplicação em laboratório e de avaliação do ciclo de vida no campo são contribuições relevantes e úteis que esta unidade tem desenvolvido.



Figura 53: As três espécies de *Ipomoea* mais estudadas de Carajás. *I. carajasensis*, antes considerada vulnerável, foi reclassificada como *I. murandioides*, amplamente distribuída.

* doi.org/10.1101/528430

Estudos de filogenia molecular aplicados à flor de Carajás mostraram que ela é próxima de outras espécies como *I. marabaensis* e *I. murandioides* (antes chamada de *I. carajasensis*) e que há a produção de híbridos *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* (Figura 54*).

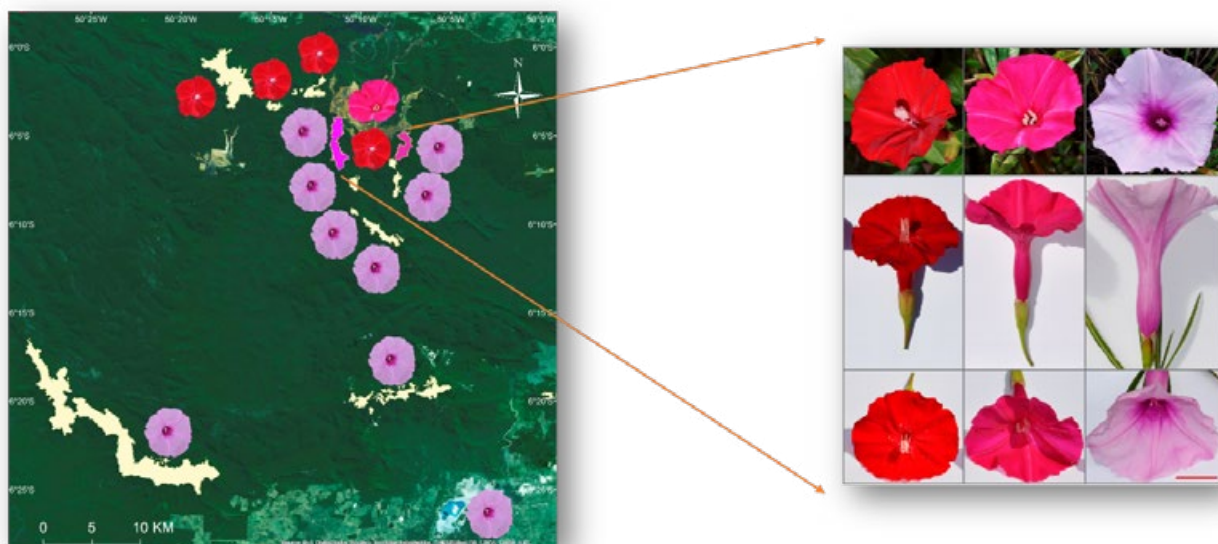


Figura 54: Distribuição de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* na Flona de Carajás: Cinco Cangas, N1, N2, N3, N4 e N5 são povoadas por *I. cavalcantei*, a qual hibridiza com *I. marabaensis* quando em simpatria (imagem à direita). Os híbridos são férteis, com grande variação de cores e formas (doi:10.1038/s41598-017-07398-z).

Os estudos com a morfometria da variação fenotípica mostram híbridos férteis e diversos, com cores, formas e tamanhos distintos, além de diferenças nas características de flor e forma das folhas entre populações de *I. cavalcantei* e híbridos, limitados por local na Canga. A fertilidade dos híbridos indica intenso fluxo gênico entre duas espécies durante a história evolutiva da Canga. A *I. cavalcantei* é uma espécie anual e

autoincompatível. Precisa receber o pólen de outra planta para fecundação das flores (Figura 55). Por isso, os animais polinizadores são importantes para a produção de sementes férteis e, assim, garantir a sobrevivência da espécie. Mais de 30 espécies de visitantes florais já foram identificadas. Esses visitantes, entre os quais se destacam as aves e abelhas, são atraídos pelo fluxo de néctar oferecido como recompensa floral aos polinizadores.

* doi.org/10.1038/s41598-017-07398-z

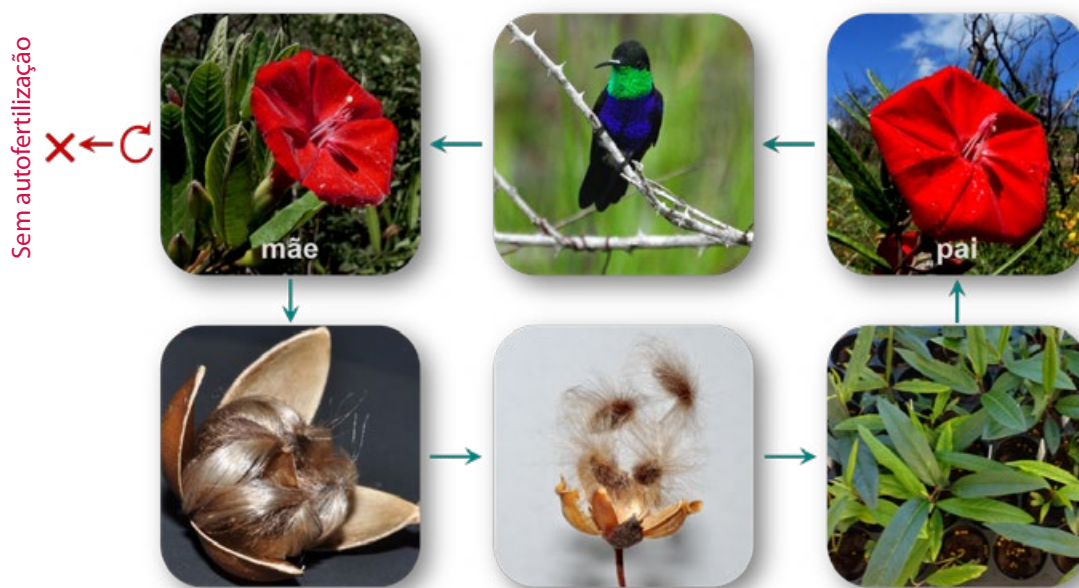


Figura 55: Ciclo de vida de *I. cavalcantei*. Cada flor tem quatro óvulos que, após a fertilização, se desenvolvem em quatro sementes. As sementes germinam no mesmo ano, compondo a população com novos indivíduos e indivíduos das gerações anteriores.

Isoetes em Carajás

A descrição recente de *Isoetes cangae* e *Isoetes serracarajensis* evidenciou a necessidade de se conhecer melhor esse grupo antigo de Pteridófitas aquáticas que ocorrem em lagoas na Flona de Carajás. As espécies são de difícil distinção morfológica e genética. Para distingui-las geneticamente, foram sequenciados os genomas dos cloroplastos. No total, o tamanho dos genomas foi similar, com 143.687 pares de base para *I. cangae* e 143.415 para *I. serracarajensis* (ver Figura 56). Estruturalmente, os genomas são idênticos e os genes e suas posições podem ser observados na representação circular do genoma do cloroplasto de *I. cangae*. Apenas 44 bases foram distintas entre os genomas, representadas pela sequência de cores nas bases divergentes. Enquanto *I. serracarajensis* é uma espécie

com distribuição mais ampla, ocorrendo em vários corpos de canga (e fora dela também), *I. cangae* até o momento apresenta uma distribuição restrita. Estudos conduzidos no ITV abordaram aspectos da morfologia, fisiologia e genética dessas duas espécies*. Os resultados apontaram que elementos do megásporo são fundamentais para a correta identificação dessas plantas. Dados moleculares, como **DNA barcode** e genoma do cloroplasto, apresentam características diagnósticas para diferenciação entre essas espécies, que mostram tratar-se de espécies distintas (Figura 56). Para melhor compreender a evolução, ampliar o conhecimento biogeográfico e interpretar os resultados da biologia molecular desse grupo especial de plantas, foram realizadas sete expedições de campo, em regiões distintas no Brasil, para a busca de

* doi.org/10.1371/journal.pone.0201417

exemplares de *Isoetes*. Como resultado dessas coletas, ao todo foram encontradas mais sete espécies de *Isoetes*, destacando-se a redescoberta de duas até então conhecidas somente por uma única coleção e que já eram consideradas como extintas: *I. gardneriana* e *I. amazonica*. Ambas foram originalmente coletadas há mais de 150 anos e reencontradas em áreas do Pantanal, no Mato Grosso do Sul, e em Santarém (PA), respectivamente.

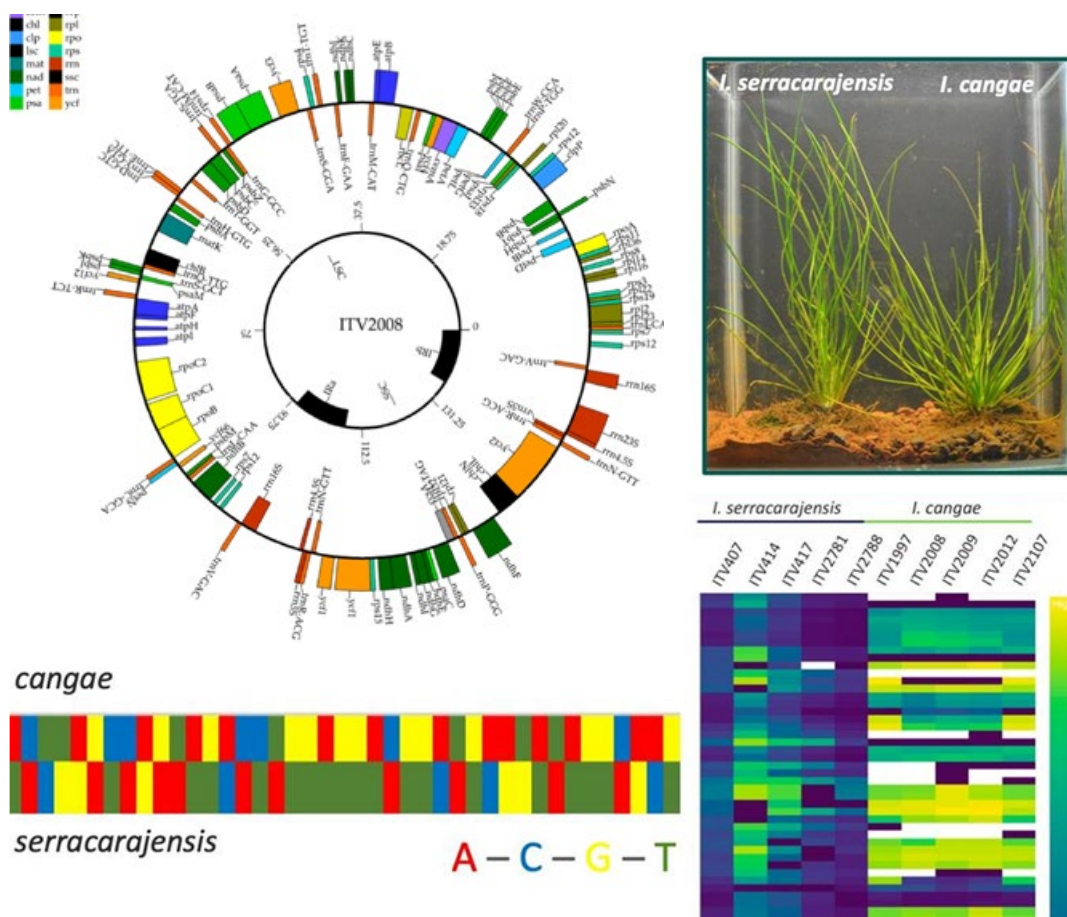


Figura 56. Representação gráfica do genoma de cloroplasto de *I. cangae* e *I. serracarajensis*, evidenciando diferenças entre as espécies (extraído 10.1371/journal.pone.0201417).

Há uma dificuldade inerente na delimitação das espécies em *Isoetes*, muitas vezes atribuída à falta de caracteres morfológicos importantes para a separação das espécies. Pesquisas no ITV, valendo-se do emprego de técnicas de citogenética e citometria, evidenciaram uma fonte alternativa direta para acessar informações básicas sobre o cariótipo dessas plantas, um caráter relevante na resolução de incertezas

taxonômicas e evolutivas. Estudos de filogenia fomentaram a hipótese de que, para *Isoetes*, não há uma relação entre o número de cromossomos e a amplitude de distribuição das espécies.

A especificidade de local de *I. cangae* requer atenção especial e ações visando à conservação dessa espécie estão sendo realizadas. Uma delas foi o desenvolvimento

de um protocolo de multiplicação de *Isoetes ex situ* (Figura 57). Os estudos mostram que a *I. cangae* é uma espécie resiliente e capaz de colonizar e se estabelecer em ambientes oligotróficos. Valendo-se desse protocolo, mais de 2.000 plantas já foram produzidas em laboratório e estão prontas para serem restabelecidas no campo. Experimentos de translocação da espécie para outros locais estão sendo conduzidos em parceria entre a Vale, o Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Sócio-Ambiental de Macaé - NUPEM/UFRJ e o ITV.

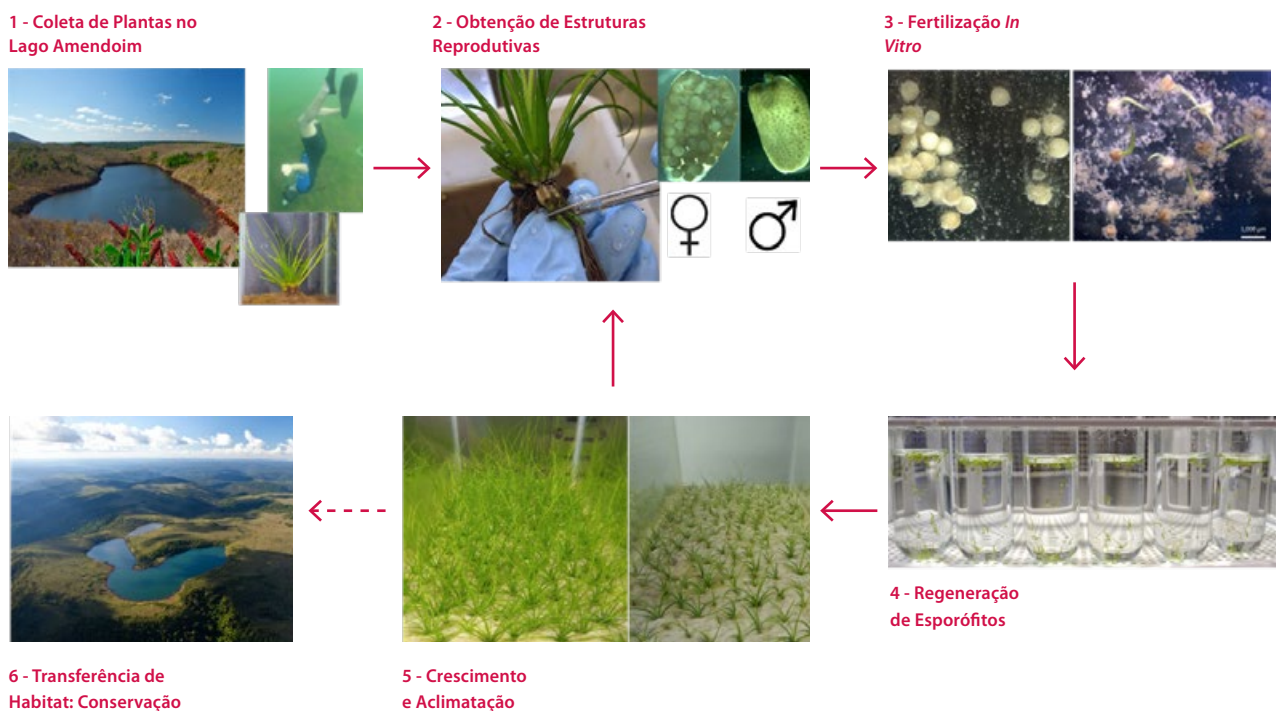


Figura 57. Propagação e crescimento de *I. cangae* em laboratório.

Guia de Plantas Invasoras na Serra Sul

Espécies invasoras representam uma ameaça para a perda da biodiversidade e seu reconhecimento é crucial para iniciar medidas de prevenção, controle e erradicação. Um guia contendo a metodologia de pesquisa

adotada e descrições de 50 espécies categorizadas como invasoras, nativas-problema e pioneiras da Serra Sul (S11D), foi elaborado e publicado para suprir demandas de conhecimento da área operacional (Figura 58).

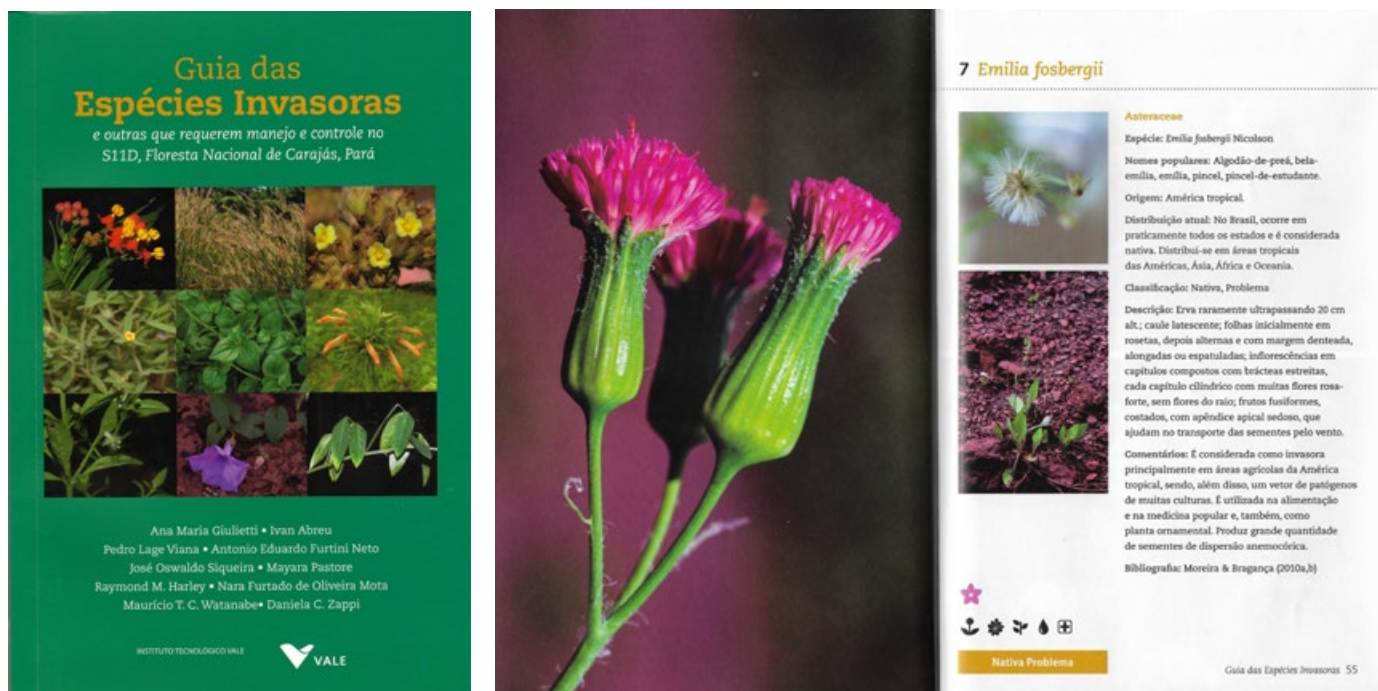


Figura 58. Guia das espécies de plantas invasoras no projeto S11D.

Plantas Nativas para Recuperação de Áreas Mineradas

Um outro aspecto prático dos estudos da Flora das cangas é a indicação de espécies nativas para ações de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD). Avaliando os traços de funcionalidade das espécies e considerando a potencialidade para ações de recuperação ambiental, 53 espécies de plantas de Carajás foram indicadas na restauração de áreas degradadas*. Para essa análise, foram considerados dez critérios para priorizar plantas com múltiplos atributos para RAD (Figura 59).

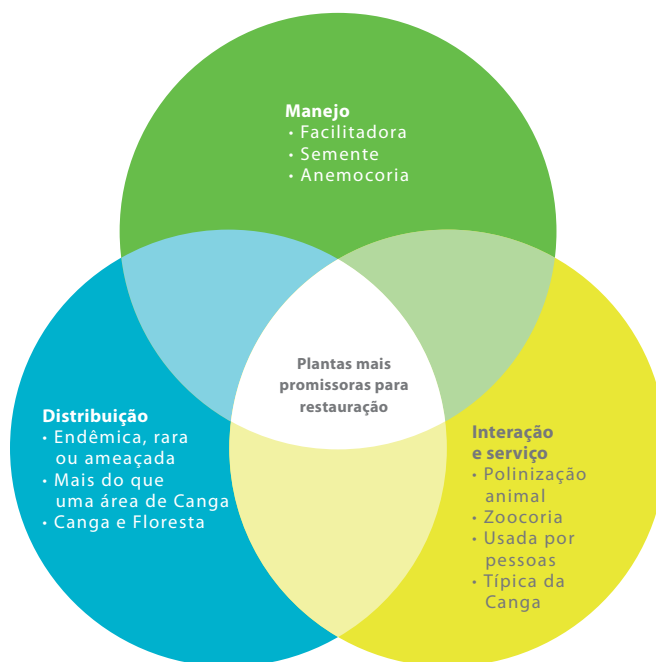


Figura 59. Lista de 10 atributos utilizados para priorizar espécies de plantas para ações de RAD.

* doi.org/10.1111/aec.12470

Em outra análise mais ampla, considerando aspectos como a persistência das espécies em áreas mineradas, facilidade de propagação, importância nas comunidades de canga e papel facilitador de estabelecimento de outras plantas, foi elaborada uma publicação sobre a caracterização botânica e adequação para a recuperação de áreas de mineração em Carajás. O estudo indicou 100 espécies de plantas com essas características

multifuncionais para RAD. Essa publicação oferece informações técnicas cruciais para os PRADs (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas), tanto na Flona de Carajás como nos arredores (Figura 60). Foi elaborado também um guia de plantas para recuperação de áreas degradadas no Quadrilátero Ferrífero, visando às ações de RAD naquele ambiente. Outras informações sobre RAD são encontradas no tópico específico deste relatório.

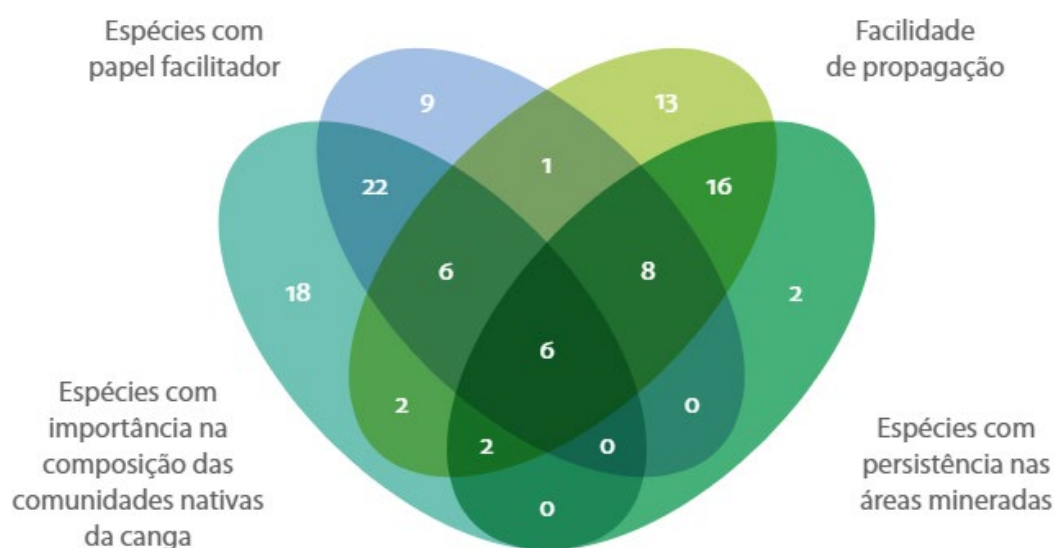


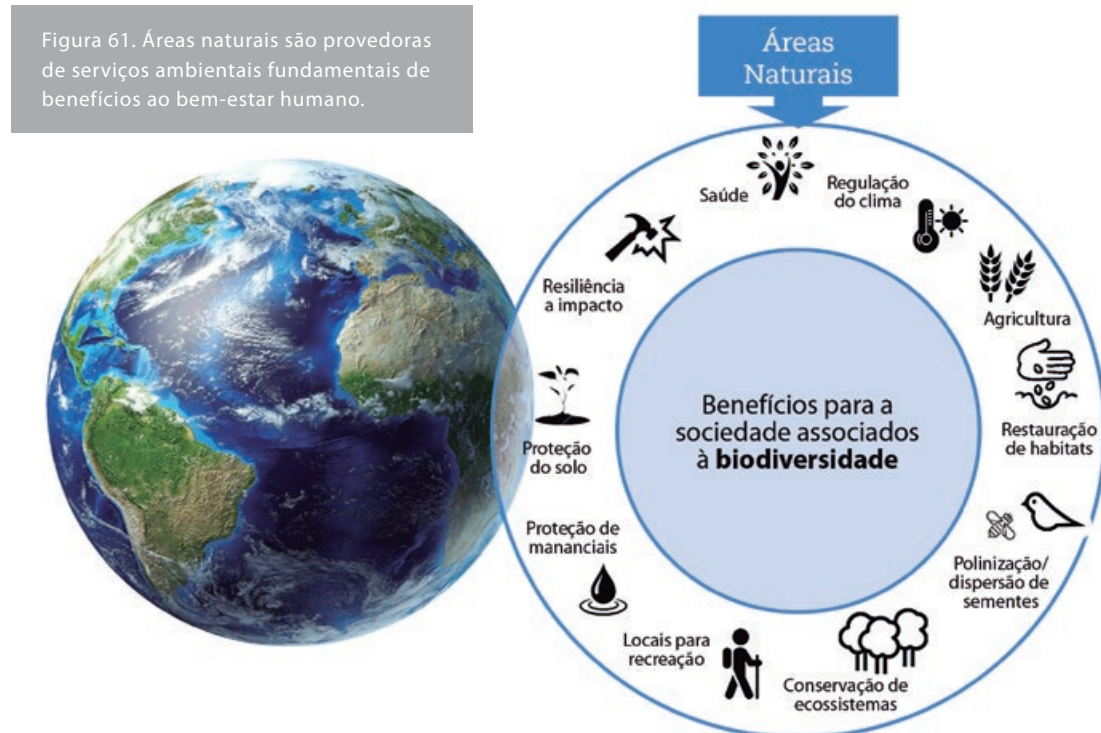
Figura 60. Número de espécies contempladas no guia de RAD em relação às quatro características funcionais importantes para a restauração. O centro da figura indica que seis espécies apresentam todas as quatro características funcionais analisadas, tornando-as particularmente relevantes para estratégias de restauração.

Valoração de Serviços de Ecossistemas

A Vale, além de participar das ações de conservação de diversas áreas como a Floresta Nacional de Carajás, viabiliza a criação de outras áreas de proteção como o Parque Nacional de Campos Ferruginosos e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN). Os estudos de valoração econômica dos serviços prestados pela biodiversidade

das áreas naturais preservadas constituem uma maneira de mostrar a importância e o valor desses ativos ambientais. A Figura 61 representa os serviços que podem ser avaliados. No entanto, dois serviços têm sido priorizados por estarem diretamente associados à biodiversidade, à polinização e à dispersão de sementes (Figura 62).

Figura 61. Áreas naturais são provedoras de serviços ambientais fundamentais de benefícios ao bem-estar humano.



Polinização



Dispersão de sementes

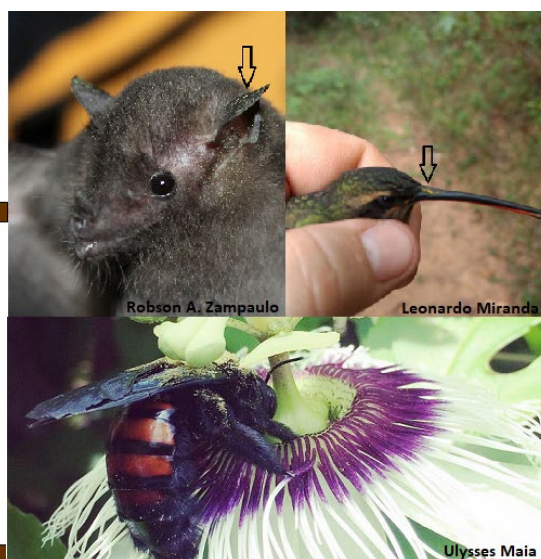


Figura 62. Polinizadores e dispersores de sementes têm uma importância especial no contexto de valoração de serviços. Do lado direito, estão exemplos de espécies de morcegos, aves e abelhas que atuam como polinizadores (as setas indicam os grãos de pólen).

Estudos de valoração econômica dos serviços prestados pela biodiversidade das áreas naturais preservadas constituem uma maneira de mostrar a importância e o valor desses ativos ambientais. Para as principais culturas do Pará esses serviços têm um valor estimado em 1 bilhão de dólares por ano.

Para avaliar os serviços de polinização em duas Áreas Protegidas (APs), foram combinadas duas metodologias de valoração, uma monetária e outra não monetária. As APs estudadas estão localizadas no Norte (Serra da Bocaina do Parque Campos Ferruginosos, Pará) e Sudeste (Reserva Particular de Patrimônio Natural Mata do Jambreiro, Minas Gerais), em áreas naturais, respectivamente na Floresta Amazônica e na Mata Atlântica. Para a valoração monetária, foram consideradas as particularidades das espécies agrícolas cultivadas na região e a sua dependência por polinização. Para a valoração não monetária,

foi utilizado um programa chamado InVEST, que considera o contexto geográfico dos locais de ocorrência dos polinizadores e das plantações agrícolas (Fig. 62). Para a Serra da Bocaina, o valor monetário dos serviços de polinização para a agricultura dos municípios de entorno, executado pelas espécies de abelhas, foi estimado em, aproximadamente, R\$2 milhões no ano de 2016. Para Mata do Jambreiro, esse valor equivalia a R\$1 milhão. Já a valoração não monetária mostrou a importância de certas áreas, especialmente as com cobertura florestal, que podem abrigar os polinizadores das culturas agrícolas no entorno.

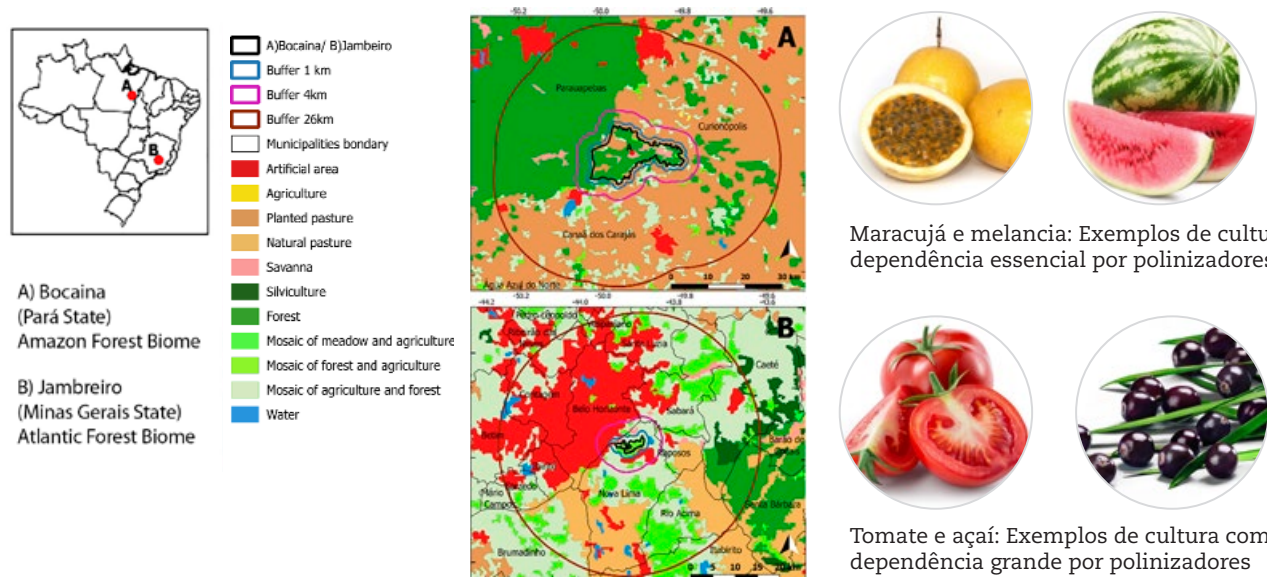


Figura 63. Localização das duas áreas protegidas, A) Serra da Bocaina e B) Mata do Jambreiro, e algumas das culturas agrícolas produzidas que dependem de polinizadores.

Culturas de interesse econômico como castanha-do-pará e açaí possuem alta dependência por polinizadores animais (Fig. 63). Para o açaí, um estudo recente* evidencia que a produção de frutos dessa planta depende de 40-90% de polinizadores, principalmente abelhas de pequeno porte nativas da Amazônia. A castanheira também tem

alta dependência de polinização por abelhas, com possível incremento de 90-100% na produção com polinizadores eficientes**. O valor total do serviço de polinização para as culturas do Pará atinge 1 bilhão de dólares por ano. Fica evidente a importância do serviço de polinização nas florestas e comunidades no entorno das áreas de mineração.

* doi.org/10.1111/1365-2664.13086

** doi.org/10.1093/jee/tov093



Figura 64: Cultura amazônica que depende de polinizadores para garantir a produção.

Ademais, tanto a polinização quanto a dispersão de sementes são importantes para programas de recuperação de áreas degradadas, já que participam no processo de reprodução das plantas. Estudos conduzidos no ITV buscam identificar aves que dispersam sementes em áreas em processo de restauração em Carajás, onde

novamente abelhas têm papel fundamental. Os estudos também indicam plantas importantes que podem servir de alimento para esses grupos de animais e que, ao serem inseridas em projetos de restauração, podem acelerar a recomposição das cadeias tróficas nessas áreas, contribuindo para eficácia do processo de recuperação ambiental.

Impacto da mudança de clima na biodiversidade

A mudança climática relacionada às ações antrópicas é uma das principais ameaças atuais à biodiversidade. Isso porque os regimes de chuvas e as temperaturas, que são fatores determinantes da distribuição geográfica das espécies, têm mudado com uma velocidade muito maior do que a maioria das espécies consegue se adaptar. As mudanças climáticas sobre a biodiversidade podem acarretar contrações, expansões ou deslocamentos de áreas de ocorrência. Isso afeta a

estrutura das comunidades de animais e plantas, assim como as suas interações, alterando, principalmente, a capacidade das espécies em proverem os serviços de ecossistemas.

Estudos realizados no ITV avaliaram os efeitos dessas mudanças climáticas na distribuição de morcegos, aves, abelhas e da flora em Carajás. Foram consideradas as projeções de clima para diferentes cenários futuros

As mudanças climáticas exercerão enorme impacto negativo sobre os componentes da biodiversidade da região de Carajás.

* doi.org/10.1016/j.biocon.2017.12.034; doi.org/10.1371/journal.pone.0215229.pone.0215229

buscando responder: (I) Quais espécies são mais sensíveis às mudanças climáticas e poderão não encontrar áreas adequadas em Carajás no futuro? e (II) Quais são as áreas prioritárias no estado do Pará que protegem o maior número de espécies das mudanças climáticas? Um conjunto de 393 espécies de aves, 201 de abelhas e 83 de morcegos foram analisadas*.

Os resultados mostraram que, potencialmente, 67% das espécies de abelhas, 56% de morcegos

e 36% de aves não encontrarão habitats adequados em Carajás em 2050 (Tabela 7). Estudos semelhantes estão sendo conduzidos para a flora das cangas de Carajás (613 espécies), que também sofrerão os impactos das mudanças de clima. Uma atenção especial está sendo dada para as espécies endêmicas da flora. Os estudos mostram que pelo menos seis espécies provavelmente não encontrarão habitats climaticamente adequados no futuro em Carajás.

	Total de espécies analisadas	Total de espécies que não encontrarão habitats adequados	Espécies que não encontrarão habitats adequados (%total analisado)
Abelhas	201	136	67%
Morcegos	83	47	56%
Aves	393	143	36%

Tabela 7: Impacto potencial da mudança de clima na biodiversidade em Carajás, em 2050.

A Figura 65 mostra os resultados projetados para morcegos no estado do Pará, indicando as áreas potenciais prioritárias de refúgio climático futuro para essas espécies. As cores avermelhadas indicam áreas mais importantes, onde a maioria das espécies encontrará locais adequados, do ponto de vista climático, para a sua sobrevivência. Já as cores próximas do azul indicam áreas onde as espécies estudadas não encontrarão ambientes adequados. No futuro, Carajás será potencialmente um local pouco adequado climaticamente para as abelhas e morcegos. No entanto,

para as aves, mesmo havendo perda de cerca de um terço das espécies, será um local importante para a conservação de sua maioria.

Outra pesquisa em desenvolvimento no ITV trata dos corredores ecológicos para conectar o Mosaico de Carajás com outras áreas protegidas na região, especialmente com áreas protegidas a oeste. A conectividade entre áreas protegidas é fundamental para integrar paisagens e facilitar o fluxo das espécies em busca de recursos, parceiros ou mesmo no caso de dispersão forçada por mudanças climáticas*.

* doi.org/10.1371/journal.pone.0129225

Adequabilidade climática para as espécies de morcegos que ocorrem na Flona de Carajás

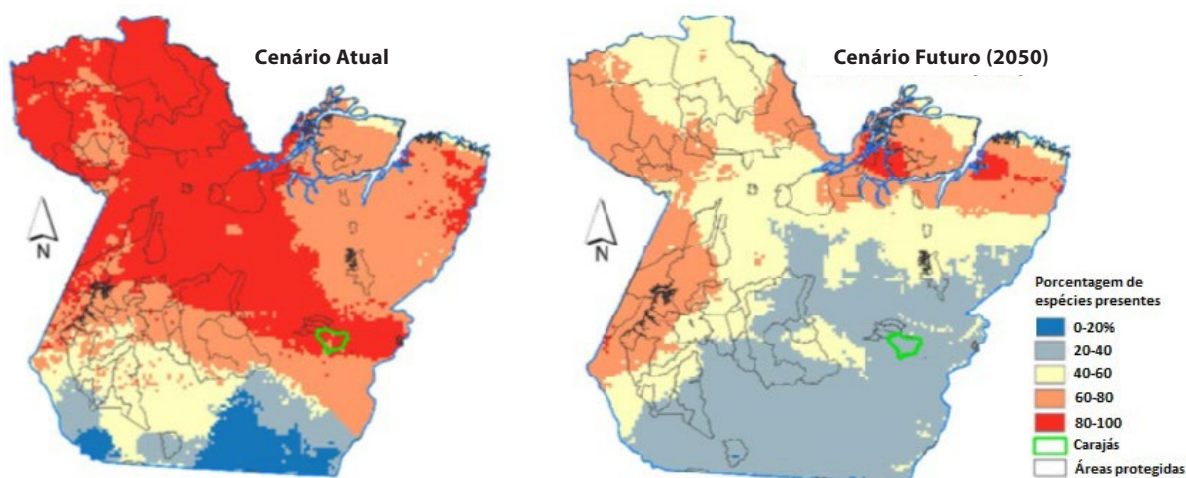


Figura 65: Modelo de impacto da mudança climática nas espécies de morcegos de Carajás (83 espécies foram analisadas). Áreas vermelhas indicam locais com maior adequabilidade climática para a maioria das espécies.

Abelhas como Bioindicadoras de Qualidade Ambiental

As abelhas são importantes componentes da biodiversidade e, por isso, podem indicar alterações ambientais. Como já mencionado, são abundantes e desempenham papel importante nos ecossistemas. Pesquisadores do ITV, junto com outros cientistas da *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), realizaram uma análise da atividade externa de abelhas campeiras monitorando-as com etiquetas eletrônicas com identificação por rádio frequência (RFID). As abelhas marcadas com

as etiquetas podem ser monitoradas por meio de um sistema de leitura acoplado às entradas das colmeias (Fig. 66). Desse modo, a movimentação das abelhas fica registrada, de forma automatizada*. O estudo foi realizado com as abelhas sociais nativas *Melipona seminigra* e *Melipona fasciculata*, em Carajás** (Figura 66), e mostrou que, ao longo de um ano, não houve diferença entre a atividade de voo entre colônias alocadas na borda de mina e em área de floresta sem atividade de mineração (Figura 67).

O estudo com abelhas melíponas mostrou que, ao longo de um ano, não há diferença entre colônias alocadas na borda de mina e em floresta sem atividade minerária.

* doi.org/0.1109/IJCNN.2018.8489608; doi.org/10.1109/ ACCESS.2018.2844181; doi.org/10.1007/978-3-319-68612-7_59

** doi.org/10.1007/s00040-018-660-5



Figura 66: *Melipona seminigra* e *Apis mellifera*, respectivamente, marcadas com etiquetas RFID para estudos ambientais.

Em outro estudo, foi executado um experimento de captura e soltura das abelhas em diferentes distâncias com o objetivo de estimar o raio de voo destas duas espécies nativas do Pará. A *M. seminigra* apresentou um raio de voo de 1km, sendo que estas abelhas conseguem voltar para o ninho se liberadas em uma área de até 5 km de distância (Figura 67). Para *M. fasciculata*, o raio de ação é de 2km e voltam de até 10km, revelando uma alta capacidade de orientação e reconhecimento da paisagem. Os experimentos mostram que mesmo perdendo cerca de metade de seu habitat (raio de voo), a *M. seminigra* encontra recursos florais na vegetação restante no entorno da mina para manter sua população em nível estável, próximo ao ideal. Estas espécies não foram afetadas pela mineração nas condições de Carajás.

A partir dos estudos foi elaborado um protocolo padronizado, Abelhas para Biomonitoramento de Impacto Ambiental (ABIA) utilizando-se abelhas nativas como bioindicadoras de monitoramento de fauna em áreas mineradas.

Com intuito de avaliar as plantas visitadas pelas abelhas em Carajás, amostras de mel e pólen das colônias de abelhas sem ferrão foram estudadas (Figura 69). O resultado apontou a busca pelas mesmas fontes florais, independentemente do local onde as abelhas foram instaladas, junto à mina ou na floresta mostrando que a perda de habitat não causou restrições ao desenvolvimento das colônias.

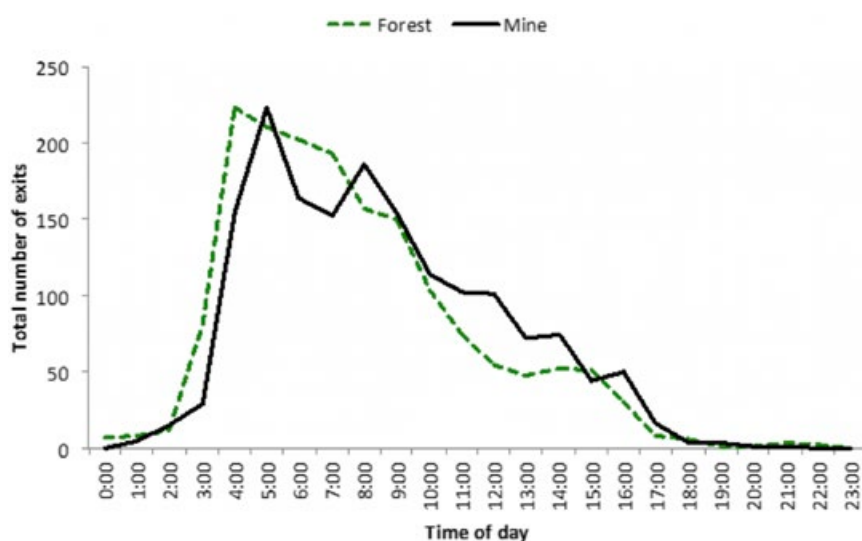


Figura 67. Padrões de voo de abelhas *M. seminigra* instaladas em floresta e mina.

Foi elaborado o protocolo Abelhas para Biomonitoramento de Impacto Ambiental (ABIA) utilizando abelhas como bioindicadores de fauna em áreas mineradas.



Figura 68: Resultado do estudo sobre a capacidade de voo de *M. seminigra* e *M. fasciculata*.

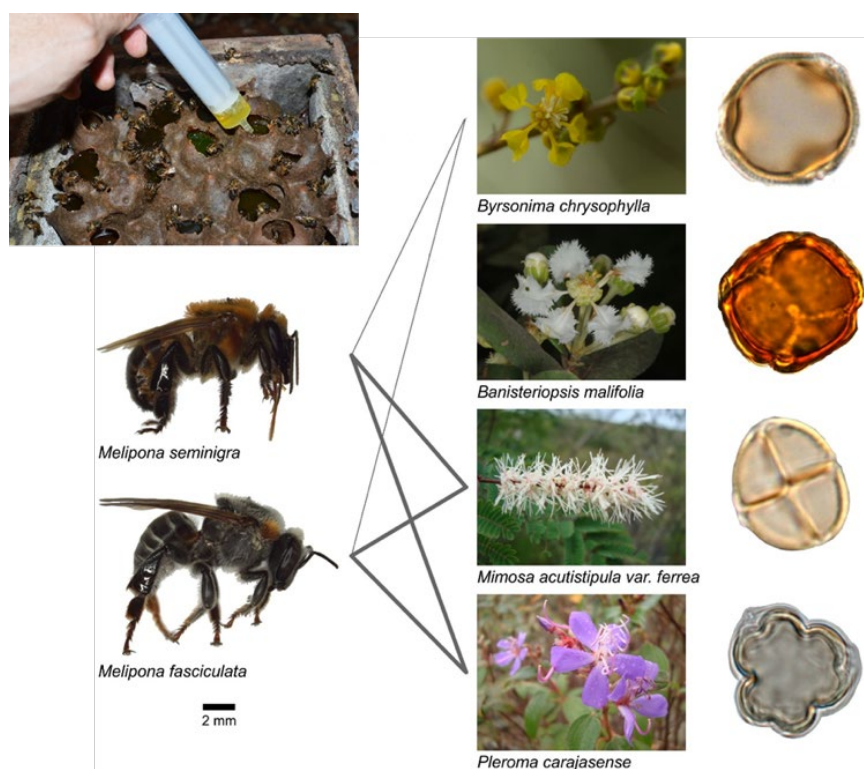
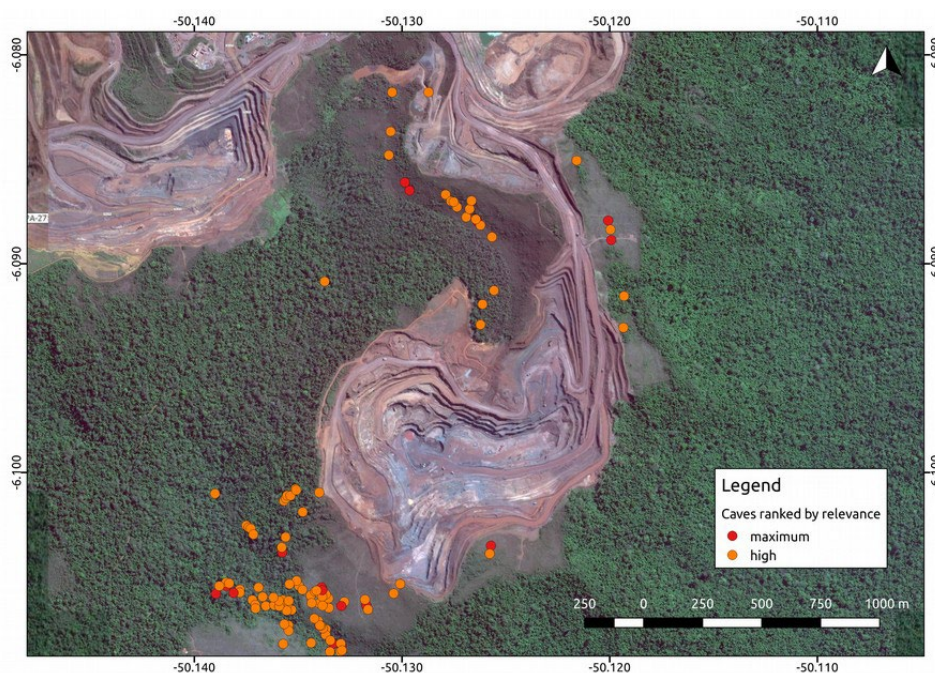


Figura 69: O estudo de melissopalínologia revela os recursos florais explorados pelas abelhas.

Biodiversidade e relevância das cavernas

As cavernas representam desafios significativos para projetos de mineração, já que elas abrigam muitas espécies endêmicas e ameaçadas e, frequentemente, ocorrem em regiões ricas em recursos minerais. Discussões recentes entre pesquisadores, representantes dos órgãos de proteção ambiental e da indústria destacam aspectos da atual legislação brasileira para a proteção de cavernas, que impactam diretamente o licenciamento e planejamento das minas. De fato, o regime jurídico de proteção de cavidades

subterrâneas influencia diretamente o planejamento das minas, como pode ser observado na Figura 70. Os critérios utilizados para priorizar a conservação das cavidades são ainda subjetivos. A relevância dessas é determinada principalmente pela presença de organismos obrigatoriamente cavernícolas (troglóbios) e a sua presumida raridade. No entanto, a raridade desses organismos é questionável, uma vez que a maioria permanece não identificada até nível de espécie e as suas áreas de distribuição ainda são pouco conhecidas.



A relevância das cavidades é determinada principalmente pela presença de espécies cavernícolas e a sua presumida raridade.

Figura 70: A mina de ferro N5 (Carajás-PA) contorna cavernas com grau de relevância máxima (vermelho) e alta (laranja) – preservadas (<https://doi.org/10.7717/peerj.4531>).

Em parceria com a equipe de Espeleologia da Vale, o ITV desenvolve pesquisas em ecologia e genômica de cavidades ferríferas, no intuito de gerar conhecimentos para subsidiar processos de licenciamento e garantir a segurança operacional. Uma síntese das principais iniciativas de pesquisa

e suas contribuições para a conservação das cavernas em ambientes de mineração encontra-se no Quadro 8. Um desses estudos integrou dados de 844 cavernas de ferro, recuperados de relatórios espeleológicos de cavernas de Carajás. A relação de diferentes características das cavernas com indicadores

de biodiversidade foi avaliada. O estudo mostra que existem cavernas de grandes dimensões e com alta riqueza de espécies que não são consideradas de máxima relevância, portanto sem prioridade para conservação. Por outro lado, existem cavernas pequenas e com baixa riqueza

de biodiversidade que são de preservação obrigatória, já que se encontram classificadas como de máxima relevância, conforme a Figura 71, que mostra que cavernas maiores são importantes reservatórios de biodiversidade.

Iniciativa de pesquisa	Contribuição do conhecimento gerado
Estudos de biodiversidade cavernícola e proposta alternativa de classificação de relevância.	Aprimorar o regime legal de proteção de cavidades e facilitar o processo de licenciamento ambiental.
Definição de método para identificar cavernas de “dimensões notáveis”.	Definir um método robusto e padronizado para definir “dimensões notáveis” e de relevância das cavidades.
Identificação molecular de espécies de troglóbios.	Definir grau de relevância das cavidades por meio da resolução de grupos taxonômicos indefinidos.
Prospecção de grupos indicadores de biodiversidade de espécies troglóbias.	Identificar grupos indicadores que possam facilitar as campanhas espeleológicas e a classificação de relevância das cavidades.
Uso de códigos de barra de DNA para identificar raízes em cavernas.	Identificar plantas associadas a cavernas e ajudar na definição da área de influência das cavidades.
Estudos de ecologia da paisagem em comunidades de troglóbios de cavernas ferríferas.	Aprimorar o regime legal de proteção de cavidades. Indica que a conservação de grupos de cavernas ou áreas subterrâneas devem ser priorizados sobre a preservação de cavernas isoladas.
Identificação molecular de espécies e censo de morcegos.	Identificar populações residentes de morcegos e resolução de grupos taxonômicos indefinidos.
Identificação da dieta dos morcegos por meio de prospecção molecular de guano.	Conhecer a cadeia trófica e definir a área de influência das cavidades.

Quadro 8: Aplicações do conhecimento gerado no manuseio e conservação de cavidades subterrâneas, segundo iniciativas de pesquisa desenvolvidas pelo ITV em parceria com a equipe de Espeleologia da Vale.

Os estudos revelam que, ao priorizar a conservação de troglóbios raros, o atual sistema de classificação de relevância desconsidera a biodiversidade total da caverna. O uso desse parâmetro pode deixar cavernas ecologicamente importantes, desprotegidas. Com base nesses resultados, foi proposta uma nova classificação de relevância baseada em indicadores de biodiversidade. Essa classificação poderia simplificar o processo de avaliação e garantir maior proteção da biodiversidade total das cavernas*.

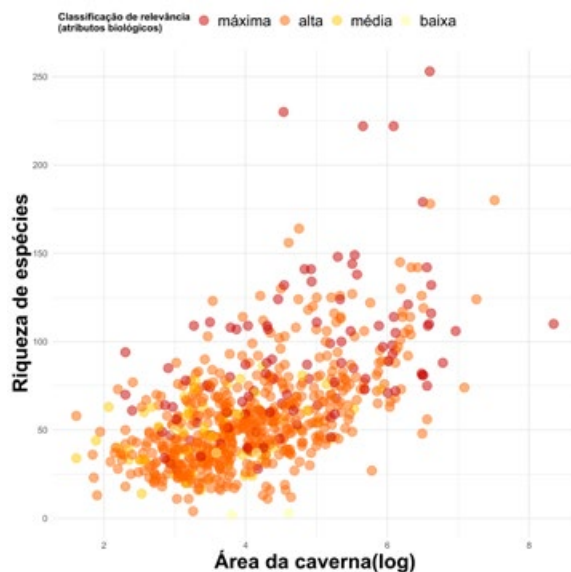


Figura 71: Relação entre o número de espécies cavernícolas (riqueza) e o tamanho das cavernas (área)**.

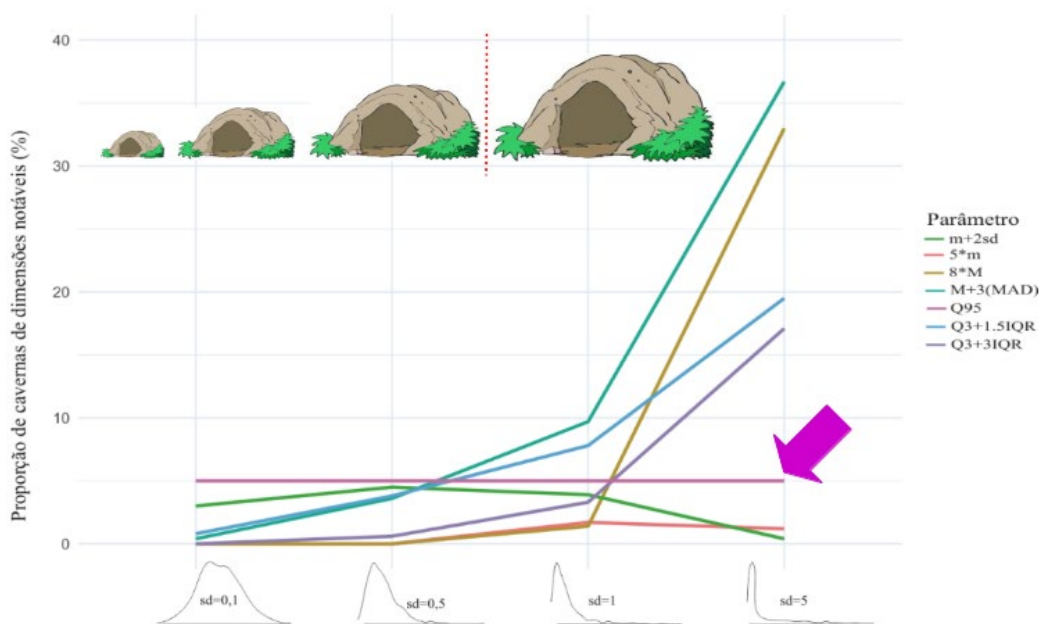


Figura 72: Comparação de métodos estatísticos para determinar excepcionais dimensionais em cavernas. O gráfico mostra como a proporção de cavernas com dimensões notáveis muda com variabilidade no tamanho das mesmas (http://www.icmbio.gov.br/revistaeletronica/index.php/RBEsp/article/view/706/pdf_19).

Para identificação das espécies cavernícolas o ITV desenvolveu um banco de marcadores genéticos permitindo maior agilidade e precisão na definição das mesmas.

* doi.org/10.1371/journal.pone.0168348

** doi.org/10.1371/journal.pone.0168348

Em outro estudo abordando a importância do tamanho das cavernas, foram realizadas simulações estatísticas para determinar a melhor metodologia para definir cavernas com dimensões notáveis. Uma vez que esse é um critério utilizado para definir a relevância das cavernas, essas simulações mostraram que o método de quartis (Q95) é o mais indicado para estabelecer dimensões notáveis, já que ele foi o único não influenciado pela variabilidade no tamanho das cavidades*. O estudo identifica uma metodologia robusta para definir cavernas com “dimensões notáveis” (Quadro 8 e Figura 72).

Um dos grandes desafios dos estudos sobre a biodiversidade das cavernas é a identificação das espécies, tarefa difícil de ser realizada pela taxonomia convencional. Para enfrentar esta questão, o ITV desenvolveu um banco de marcadores genéticos para as principais espécies de troglóbios da região de Carajás. Essa abordagem permite uma identificação mais rápida e precisa das espécies, além

de permitir a determinação de espécies jovens, o que não é possível por métodos de taxonomia tradicionais, baseados em características fenotípicas.

Por meio de estudo molecular, foi realizada a identificação de material vegetal, como rizotemas e outros fragmentos de plantas encontrados em cavernas. A presença dessas plantas também se correlaciona com a diversidade de troglóbios. Na ausência de material reprodutivo das plantas, não é possível fazer a sua identificação. Por isso, a equipe do ITV emprega técnicas moleculares de códigos de barra de DNA para identificar essas plantas. Foi possível identificar oito espécies diferentes de plantas com estruturas nas cavidades (Figura 73). Essas estruturas pertencem a oito famílias botânicas distintas. Além de importante para compreender a ecologia das cavidades, o estudo contribui para uma visão mais ampla da sua área de influência**.

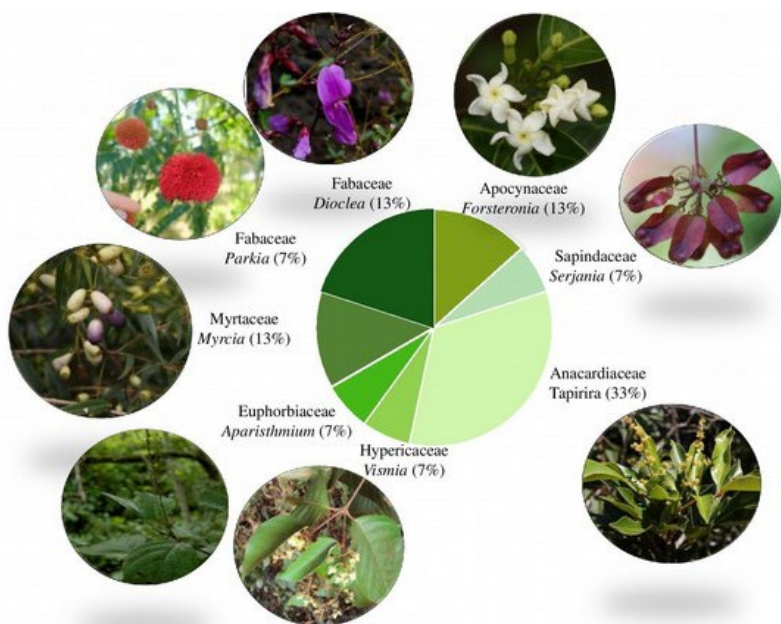


Figura 73: Composição das famílias de plantas encontradas dentro de cavidades ferríferas de Carajás***.

* icmbio.gov.br/revistaelectronica/index.php/RBEsp/article/view/706/pdf_19

** doi.org/10.3389/fpls.2018.01052

*** doi.org/10.3389/fpls.2018.01052

Embora a degradação dos habitats cavernícolas represente uma ameaça importante para a conservação de espécies troglóbias, a influência da paisagem circundante nas comunidades de troglóbios é pouco conhecida. Com o uso de ferramentas de estatística espacial para analisar o maior banco de dados disponível para cavernas tropicais, da Espeleologia da Vale, avaliamos a influência das características das cavernas e da paisagem nas comunidades de troglóbios em Carajás. Adicionalmente, foi possível determinar o padrão espacial da composição das comunidades de troglóbios, a riqueza de

espécies, a diversidade filogenética e a ocorrência das espécies frequentes*.

A influência das características da paisagem sobre os padrões de conectividade subterrânea entre as cavernas também foi avaliada. Os resultados revelam que o tamanho das cavidades e a presença de guano são fatores determinantes da diversidade de espécies troglóbias, indicando também que as cavernas vizinhas possivelmente estão interconectadas (Figura 75).

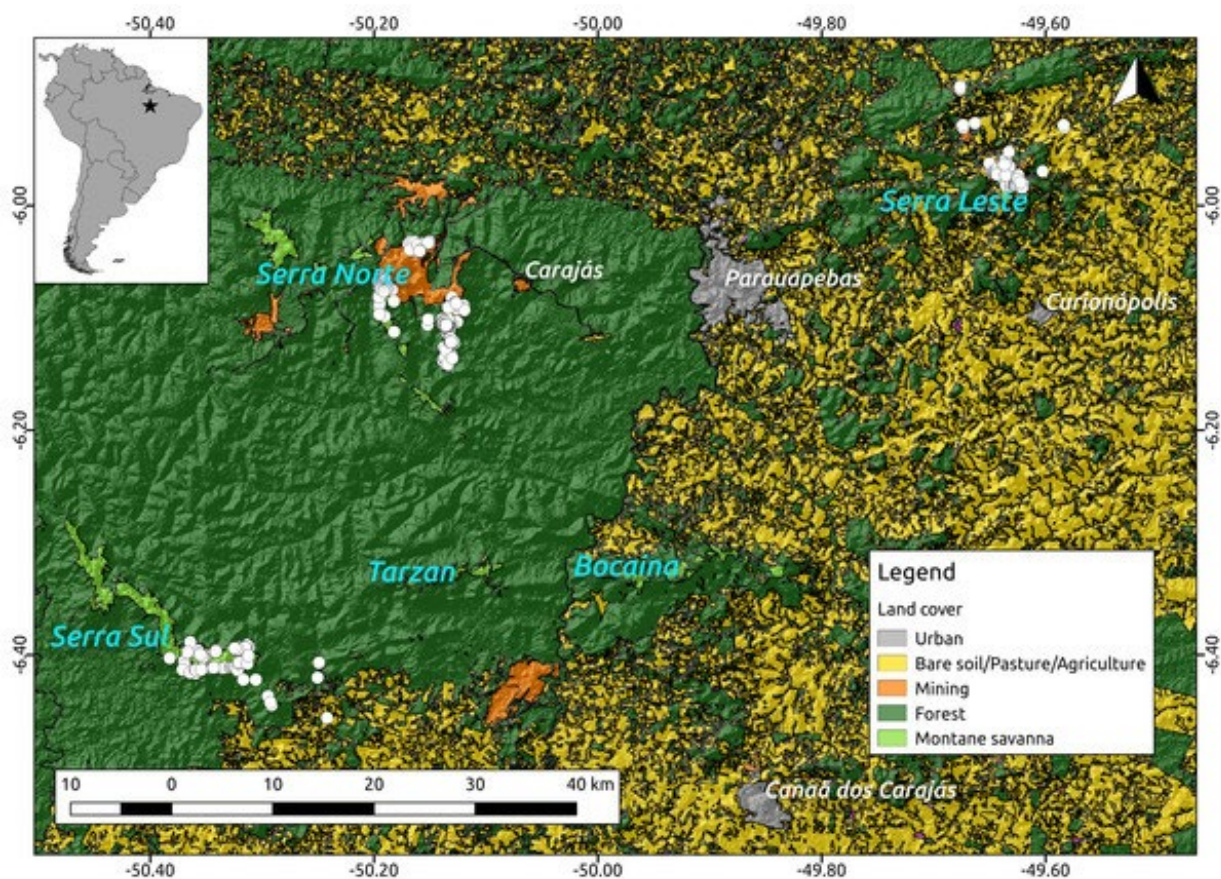


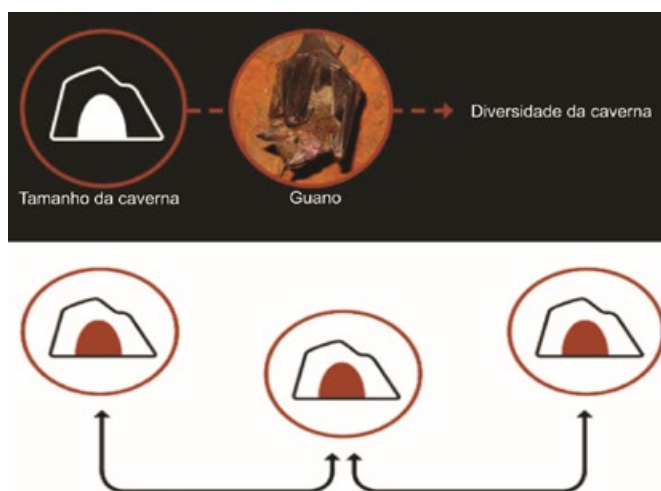
Figura 74: Mapa da região de estudo mostrando a localização das cavernas estudadas (pontos brancos) e o tipo de uso da terra**.

* doi.org/10.7717/peerj.4531

** doi.org/10.7717/peerj.4531

Resultados das pesquisas também mostram que atividades de mineração localizadas a 250 metros das cavernas influenciam a composição de espécies, mas não a sua diversidade. A composição de espécies, a riqueza, a diversidade filogenética e a ocorrência de troglóbios frequentes apresentaram um forte padrão de agregação espacial. A distância geográfica foi o principal fator que determinou a conectividade entre cavernas. Esses resultados

têm implicações importantes para a conservação da biodiversidade cavernícola. Em primeiro lugar, podem ajudar a orientar levantamentos espeleológicos, pois foram identificadas as características mais relevantes que determinam padrões de composição e diversidade de espécies troglóbias. Adicionalmente, o estudo sugere que a conservação de grupos de cavernas ou áreas subterrâneas deve ser priorizada em relação à preservação de cavernas isoladas*.



A parceria entre a área de Espeleologia da Vale e o ITV resultou no levantamento ágil de informações que subsidiaram a estratégia de conservação da biodiversidade cavernícola.

Figura 75: Ilustração dos principais resultados do estudo da influência da paisagem nas comunidades de troglóbios em Carajás. O tamanho das cavernas e a presença de guano são fatores determinantes da diversidade de espécies troglóbias, sendo que essas cavernas possivelmente estão interconectadas***.

A partir do mesmo banco de dados de ocorrências de invertebrados troglóbios nas cavernas de Carajás, verificamos que alguns grupos taxonômicos podem ser indicadores da diversidade nas cavidades. Os resultados sugerem que a combinação das classes *Entognatha* e *Arachnida* (colêmbolos e aranhas, Figura 76) representa bem a diversidade total de troglóbios das cavernas. O estudo revela ainda que colêmbolos e aranhas são grupos promissores para o monitoramento da diversidade cavernícola, um aspecto relevante para a conservação e o manejo das cavidades em áreas de mineração**.



Figura 76: Aranha troglóbia endêmica da Província Mineral de Carajás (foto de Robson Zampaulo).

* doi.org/10.7717/peerj.4531

** doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.086

*** doi.org/10.7717/peerj.4531

Morcegos são também importantes componentes da biodiversidade das cavernas e, por isso, têm sido objeto de atenção (Fig. 77). Esses animais são provedores de serviços ecossistêmicos, sendo importantes na polinização, controle da população de insetos, dispersão de plantas, entre outros aspectos. Eles contribuem com aporte de energia para cavernas, por meio do guano, possibilitando a sobrevivência de outras espécies nesse ambiente.

A pesquisa do ITV tem contribuído na identificação de espécies de morcegos por meio de ferramentas moleculares.

Marcadores genéticos para as principais espécies que habitam as cavidades de Carajás foram desenvolvidos. Isso facilita e torna mais objetiva a classificação taxonômica em nível de espécie. Nos estudos de ecologia, a contagem de morcegos é feita de maneira automatizada com câmeras de calor e software especializado, facilitando a estimativa do número preciso de morcegos nas cavernas. Além disso, foram captados sons das espécies locais para a identificação via som emitido, que é particular para cada espécie de morcego, podendo auxiliar a identificação desses animais.



Figura 77: *Anoura geoffroyi* Gray. Foto de Robson de Almeida Zampaulo.

O hábito alimentar dos morcegos foi estudado por meio do rastro de DNA nas fezes desses mamíferos (guano).

Um outro aspecto estudado é o hábito alimentar dessas espécies. Essas informações são importantes para a determinação da área a ser protegida no entorno das cavidades. A fonte de alimentos de morcegos insetívoros foi determinada através do estudo do rastro de DNA que fica no guano. Certos morcegos se alimentam

de uma diversa gama de espécies de insetos, incluindo pragas agrícolas, vetores de doenças humanas e outros que se alimentam de sangue. No conjunto, os estudos mostram um panorama do papel ecológico, além de contribuir com estratégias de conservação desses importantes animais em ambientes de mineração.

Genômica Ambiental e Bioinformática

Estudos moleculares contribuem para o avanço na identificação de componentes da biodiversidade

Chamada de Indústria 4.0, a nova revolução industrial envolve tecnologias de sensoriamento e avanços na captação e análise computacional de grandes volumes de dados para o auxílio na tomada de decisões. Esta nova revolução vem promovendo profundas mudanças na busca de maior eficiência, que reflete na melhoria operacional e gestão ambiental. Os estudos moleculares se somam à tecnologia de ponta capaz de produzir quantidades massivas de dados, a partir do sensoriamento molecular aplicado ao meio ambiente.

O ITV está instrumentalizado com as últimas tecnologias para a geração em massa de dados moleculares. Na sede do Instituto, em Belém (PA), está o único laboratório na América Latina com todas as tecnologias de sequenciamento de DNA disponíveis, além de equipamentos para a pesquisa de proteômica e acesso a computadores de alto desempenho para análises de dados biológicos por técnicas de bioinformática (Figura 78). Esse conjunto de plataformas fornece agilidade e a possibilidade de investigar do ponto de vista molecular a biodiversidade, desde bactérias a árvores e animais. Tal abordagem contribui

para a digitalização do diagnóstico e monitoramento ambiental, processo antes analógico.

As pesquisas na área de genômica ambiental no ITV dão suporte aos estudos da biodiversidade da flora, fauna e microbiana. A técnica de uso mais amplo envolve os códigos de barra de DNA, que permitem a rápida e precisa identificação de espécies por sequenciamento de pequenos fragmentos de DNA (Figura 79). Outras abordagens mais avançadas em nível genômico permitem o levantamento com maior profundidade da genética, promovendo o mapeamento detalhado das relações filogenéticas entre espécies. O conhecimento gerado em estudos genômicos possibilita preencher lacunas na compreensão da biodiversidade dos ecossistemas nas áreas de mineração, assim como nas reservas naturais destinadas à conservação da natureza.

A base de todo o processo de tomada de decisão no planejamento de operações tem início nos estudos de caracterização da biota da área de interesse. Os estudos envolvendo técnicas moleculares dão uma contribuição relevante para o processo.

Utilizando as tecnologias mais avançadas do mercado para a geração em massa de dados moleculares, o ITV levou o estudo ambiental dos meios analógicos para a era digital, desenvolvendo códigos de barras de DNA que carregam todas as informações dos espécimes, diminuindo o tempo investido na identificação e gerando ainda mais conhecimento.

O processamento de grande quantidade de informações requer sistemas de computação de alto desempenho. O ITV possui servidores de alto desempenho de última geração para aplicações de bioinformática e inteligência artificial*.



Figura 78: Tecnologias de última geração para a pesquisa molecular. O ITV está preparado para a realização de pesquisas moleculares com as últimas tecnologias disponíveis.

Códigos de barra de DNA, uma ferramenta para o mapeamento amplo da biodiversidade

O código de barra de DNA mostra a variação genética intraespecífica, como uma impressão digital (Figura 79). Utilizando essa ferramenta, o ITV gerou, desde 2014, mais de 10.000 códigos de barra de DNA, com aproximadamente 4.300 amostras da biodiversidade de plantas e animais que ocorrem nas cangas de Carajás. O uso de código de barra de DNA, juntamente com os dados apurados por biólogos e taxonomistas, permitiu identificar mais de 800 espécies de plantas e 200 espécies da fauna. Esses dados alimentam uma plataforma online que permite a visualização e análise de dados da biodiversidade (Figura 79). Dessa forma, o código de barras de DNA pode

ser usado para diferenciar espécies de plantas e animais. Para plantas são usados principalmente marcadores genéticos presentes no cloroplasto (Figura 79) enquanto para animais (vertebrados e invertebrados) emprega-se um marcador mitocondrial (Figura 79).

O banco de dados da biodiversidade do ITV foi criado para a gestão dos dados genéticos de códigos de barra de DNA gerados no Instituto. Ele está instalado nos servidores do ITV contendo: informações do sequenciamento de DNA das amostras; dados das coletas realizadas por botânicos, zoólogos e taxonomistas; localização das amostras e registros fotográficos.

* doi.org/10.1093/bib/bby072

A informação genética é tratada automaticamente com o uso de programas de bioinformática, desenvolvidos no ITV e referidos como Pipebar e *OverlaPER**. Após a análise dos dados de sequenciamento de DNA, esses são automaticamente carregados no banco de dados e associados às informações para cada espécime. Além das informações com conteúdo genético, todos os dados de pesquisas de campo são carregados no banco, chamado ITVBioBase, uma plataforma digital de interesse acadêmico e técnico para o negócio da mineração. A iniciativa é também de grande utilidade

para a conservação da biodiversidade. Uma camada analítica pode gerar análises com referência geográfica, relatórios e avaliações em tempo real sobre todo o seu conteúdo, possibilitando pesquisas aprofundadas e grande domínio da informação sobre a biodiversidade das áreas de estudo. Além disso, esse banco de dados pode receber informações de sistemas de informática comumente utilizados por coleções externas e também exportar os dados em diversos formatos para outros bancos. O intercâmbio de dados facilita o estudo da biodiversidade e a gestão do conhecimento de maneira mais robusta e amigável.

Códigos de barra de DNA

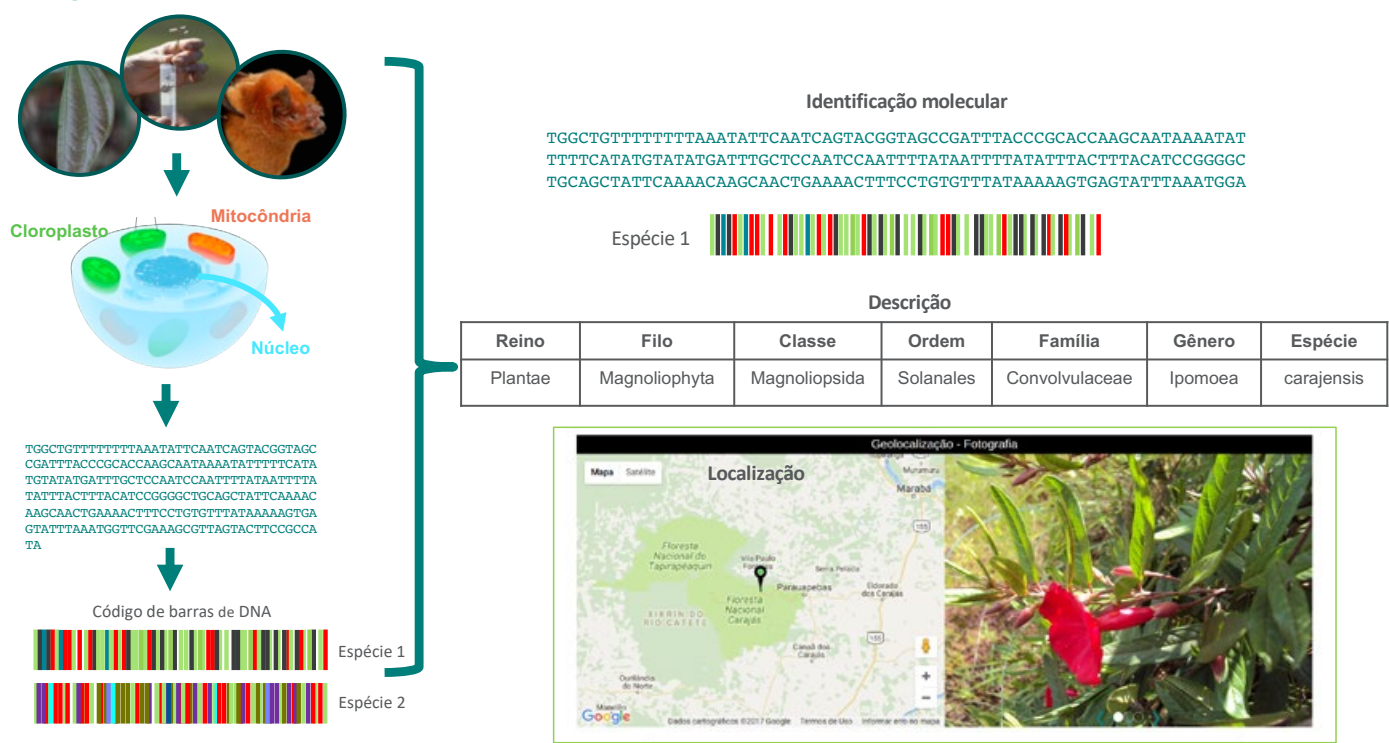


Figura 79: Códigos de barra de DNA, uma ferramenta de amplo uso para a descrição genética da biodiversidade.

Amostras de DNA de plantas ou animais são obtidas. Marcadores do genoma nuclear ou cloroplasto são utilizados para a geração de códigos de barra para plantas e de mitocôndrias para animais. O sequenciamento do DNA produz os códigos de barra, representados por barras coloridas, que diferenciam espécies. Os dados são carregados

* doi.org/10.1186/s12859-018-2307-y

automaticamente no ITVBioBase, um banco de dados online do ITV que contém dados de biodiversidade (Figura 79). Os códigos de barra de DNA, associados a espécimes caracterizados por um taxonomista e a metadados captados pelo coletor, formam uma biblioteca de referência bastante completa e avançada. A existência dessa biblioteca viabiliza o uso de códigos de barra de DNA como uma ferramenta para a identificação automatizada de espécies, aumentando consideravelmente a velocidade

na descrição e no levantamento da biodiversidade (Figura 80)*. A digitalização do dado permite a comparação imediata com bancos de dados globais, aumentando o alcance e robustez das análises. A biblioteca de referência permite também o desenvolvimento de novas abordagens a partir da coleta do DNA das espécies presentes no ambiente. Um exemplo relevante do uso de ferramenta genômica em estudos de flora foi a identificação de plantas que emitem raízes para dentro das cavernas (Figura 80)**.

Estrutura Filogenética de Plantas da Canga de Carajás

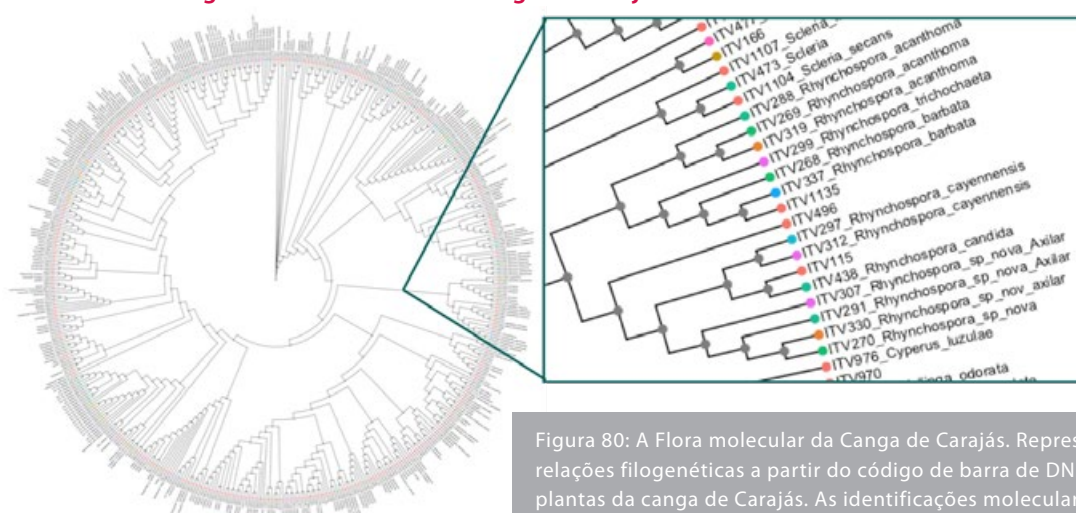


Figura 80: A Flora molecular da Canga de Carajás. Representação das relações filogenéticas a partir do código de barra de DNA de mais de 550 plantas da canga de Carajás. As identificações moleculares realizadas pelo ITV são inéditas.

A canga de Carajás constitui hoje o ambiente com a mais completa base molecular no Brasil.

Outro exemplo de sucesso da aplicação dessas ferramentas moleculares tem sido o estudo que visa à identificação de invertebrados de caverna, com produção de códigos de barra de DNA, baseados na sequência do marcador mitocondrial COI para 589 espécimes coletados nas cavernas de interesse da mineração. Um destaque está na descrição da diversidade genética de grupos importantes para o licenciamento ambiental com condicionantes, como a diferenciação de espécies dos gêneros *Circoniscus* e *Glomeridesmus****, conforme ilustrado na Figura 81. A presença de espécimes do gênero *Circoniscus* é importante na categorização da relevância das cavidades.

* doi.org/10.1016/j.ympev.2018.05.017, DOI:10.1038/s41598-017-07398-z

** doi.org/10.3389/fpls.2018.01052

** doi.org/10.1101/228882

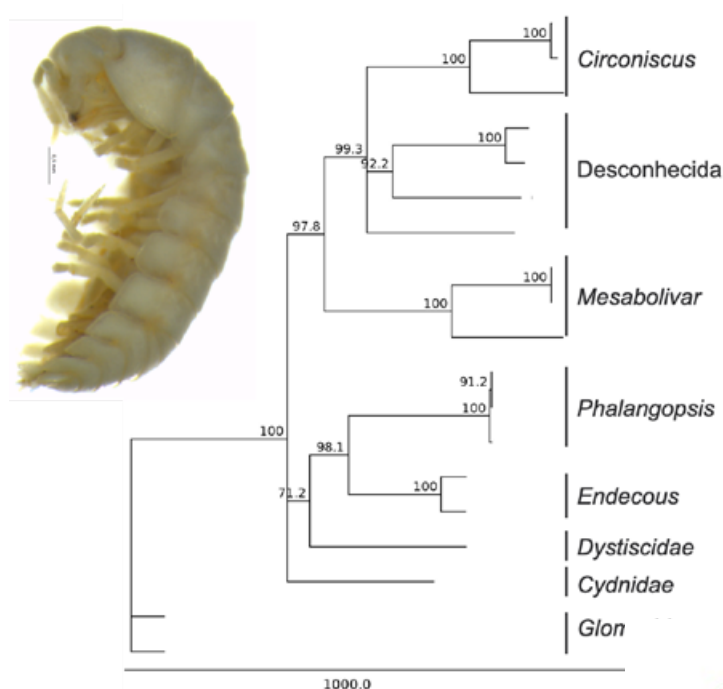


Figura 81: Códigos de barra de DNA para invertebrados troglóbios como o *Circoniscus* e outros gêneros, permitindo a sua rápida identificação.

Os estudos de genômica permitem maior conhecimento da biodiversidade

Os códigos de barra de DNA mostraram-se versáteis e de ampla utilização na identificação de espécies. Porém, os códigos de barra não ultrapassam sequências de DNA com 1.000 pares de bases, sendo assim limitados pela resolução genética alcançada. Para expandir os limites dos códigos de barra de DNA, estudamos também os genomas das organelas mitocôndria e cloroplasto e o genoma nuclear com abordagens de baixa e alta cobertura. Desta forma, cobrimos todo o gradiente de resolução possível permitindo abordar questões distintas sobre a desconhecida biodiversidade. Estudos dos genomas de cloroplasto já foram realizados, por exemplo, para verificar a identidade genética de espécies de Isoetes* e para a descrição

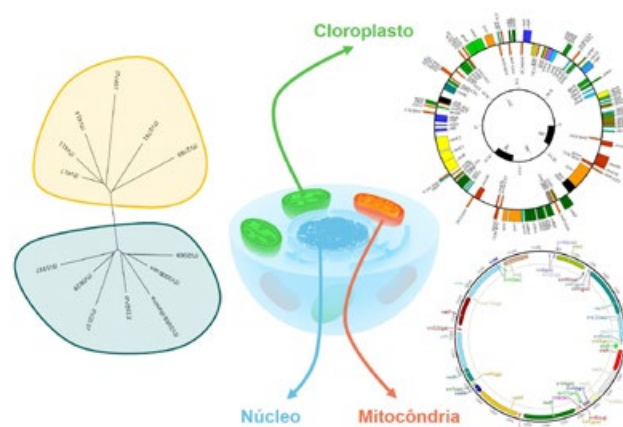


Figura 82: A análise genômica de espécies pode ser realizada em diferentes graus de resolução. À direita estão representados os genomas acessórios do cloroplasto (acima) e mitocôndria (abaixo).

genética de espécies de invertebrados de cavernas**. A Figura 82 ilustra os diferentes graus de resolução obtidos pelo sequenciamento de mitocôndrias ou cloroplastos e também pela resolução definitiva de espécies com análises em nível genômico.

Os genomas contêm informação que permite a identificação quase inequívoca de espécies. Porém, em casos mais complexos ou em que maior resolução é necessária, como na parte esquerda da

* doi.org/10.1371/journal.pone.0201417

** doi.org/10.1080/23802359.2018.1547153 e doi.org/10.1080/23802359.2018.1547139

*** doi.org/10.1371/journal.pone.0201417

Figura 82, dados do genoma nuclear são utilizados, gerando resultados robustos da relação entre as espécies, destacadas com cores distintas. Espécies de Isoetes foram separadas com base em milhares

de pontos de dados derivados do sequenciamento genômico com baixa cobertura das duas espécies de Carajás, que foram separadas de maneira clara e robusta***.

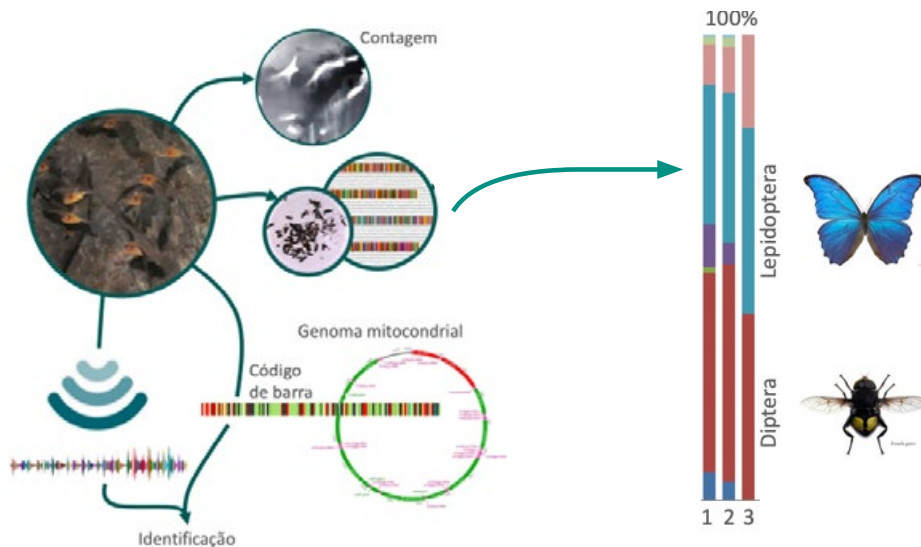


Figura 83: Técnicas avançadas para o estudo da biologia de morcegos. O uso de ferramentas moleculares (código de barras de DNA e genoma mitocondrial) permite a identificação de espécies de morcegos. Por sua vez, a análise metagenômica das fezes dos morcegos (guano) permite a determinação das fontes alimentares dos morcegos. A contagem de morcegos que habitam uma caverna é feita por meio de câmeras térmicas e sons, que também auxiliam na determinação da espécie.

Além das aplicações em plantas e microrganismos, as técnicas moleculares podem responder a perguntas sobre a biologia da fauna, como no caso dos morcegos. Os morcegos produzem o principal aporte energético para cavidades via produção de guano (fezes). Para viabilizar a identificação desses vertebrados, foi construído um banco de códigos de barra de DNA que cobrirá todas as espécies de morcegos de Carajás. Além disso, foi produzido o genoma de mitocôndria e dados do genoma nuclear em baixa cobertura para algumas espécies mais raras. Esses esforços contribuem para o aumento do conhecimento da biodiversidade local e, conseqüentemente, para as estratégias de conservação de espécies. Outras metodologias são utilizadas na identificação, como

a assinatura sonora e a contagem de morcegos com o uso de câmeras térmicas (Figura 83). A caracterização da fonte de alimento dos morcegos é importante para a compreensão da composição da biota cavernícola e fluxo energético, assim como da área de proteção das populações. Uma das descobertas mais interessantes foi o conhecimento da dieta dos morcegos feita por geração de códigos de barra de DNA em massa, a partir do sequenciamento do DNA de guano dos morcegos, uma abordagem chamada de **metabarcoding** (Figura 83). Os códigos de barra gerados em massa são comparados com informações de banco de dados globais dos códigos de barra de DNA, permitindo a identificação do que foi ingerido pelos morcegos (Figura 83). Esse estudo, além de caracterizar o papel ecológico dos morcegos, vincula os

*** doi.org/10.1371/journal.pone.0201417

serviços prestados por eles. Por exemplo, o controle de populações de insetos vetores de doenças e pragas agrícolas, ajudando também na determinação da área de influência de uma caverna, informação importante para os planos de conservação e manejo da biodiversidade das cavernas.

No conjunto, as abordagens auxiliam na compreensão do papel dos morcegos na manutenção da biota cavernícola e na determinação da área de proteção para a espécie. A integração de diferentes métodos contribui para uma compreensão mais abrangente da biologia dos morcegos de Carajás.

Potencial da Genômica para o Monitoramento Ambiental

Um outro aspecto promissor da genômica é sua aplicação no monitoramento ambiental. Os estudos ambientais, normalmente, os elementos mais mensuráveis da biodiversidade são desenvolvidos por abordagens convencionais. Porém, microrganismos são um importante componente da biodiversidade, além de serem a sua base de suporte. Estão presentes no ambiente moléculas derivadas de todos os níveis de vida e elas refletem a biodiversidade do ecossistema. Essas moléculas podem ser analisadas a partir de amostras ambientais como água e solo.

O estudo de microrganismos é feito a partir da obtenção do DNA do ambiente, permitindo o levantamento da diversidade taxonômica e funcional dos locais amostrados*. Além do DNA dos microrganismos, técnicas avançadas de proteômica permitem detalhar as proteínas presentes no ambiente. No ITV, é possível analisar dados moleculares para a geração de assinaturas moleculares ambientais. A definição de assinaturas moleculares viabiliza uma nova ferramenta de avaliação

molecular ambiental, o que é útil para o levantamento e monitoramento de áreas conservadas ou em processo de revegetação.

Como exemplo, um estudo avaliando o solo de diferentes fitofisionomias nas cangas de Carajás, através da análise de DNA e proteínas, demonstrou que cada ambiente possui uma comunidade microbiana específica e esta é diretamente relacionada à funcionalidade do solo, possibilitando o estabelecimento de vegetações específicas (Figura 85). Outro exemplo do uso de metagenômica foi o estudo comparativo das lagoas do platô da Serra Sul, por meio de amostras de sedimento das lagoas (Amendoim, Três Irmãs e Violão). A avaliação do metagenoma indica que o componente biótico possui uma base comum de microrganismos. Pequenas oscilações nas populações são causadas por diferenças na geoquímica da água das lagoas e isso pode ser detectado por essas análises. O uso de assinaturas moleculares foi também testado para a avaliação do status do processo de RAD. O monitoramento molecular de

Assinaturas moleculares de solos em áreas de RAD empregando técnicas avançadas de proteômica podem ajudar no monitoramento do status de recuperação de áreas mineradas.

* doi.org/10.1007/s00248-016-0785-x

áreas em revegetação por meio dessa metodologia é inovador. Os dados serão gerados de forma rápida e em grande quantidade, permitindo uma avaliação mais objetiva do status ambiental da área. As abordagens moleculares de metagenômica e metaproteômica também permitem acessar a funcionalidade do solo, como os componentes ligados aos ciclos de carbono, fósforo, enxofre e nitrogênio, importantes para a sua saúde. Na Figura 84 está ilustrado que o estudo dos microrganismos que habitam os sedimentos das lagoas revelou que há o compartilhamento das espécies

e das funções metabólicas, indicando uma base biológica muito similar entre as lagoas. O dendrograma indica a formação de três grupos, um que caracteriza regiões das lagoas do Violão e do Amendoim (roxo), outro da lagoa Três Irmãs (azul) e um que mostra uma composição mais similar entre uma região da lagoa Três Irmãs e do Amendoim (vermelho). As variações são decorrentes de mudanças na geoquímica da água nestas áreas (Figura 85). Essas informações representam a base da sustentabilidade do processo de recuperação ambiental.

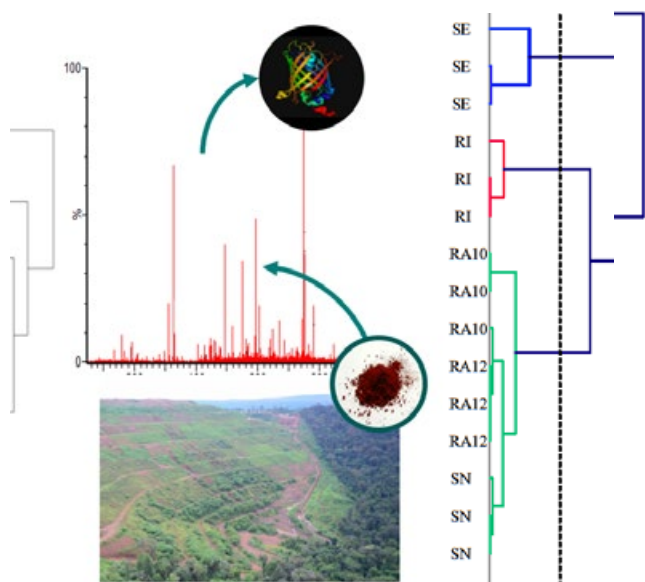


Figura 84: Microbioma do solo da canga de Carajás para monitoramento ambiental de fitofisionomias da canga.

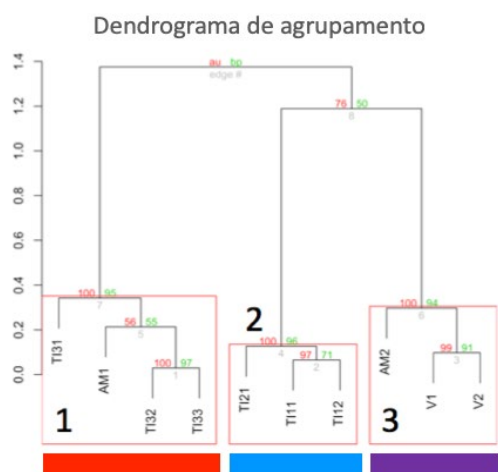


Figura 85: Metagenômica das lagoas da Serra Sul de Carajás, Amendoim, Violão e Três Irmãs.

As amostras de solos em diferentes estágios de restauração (solo exposto, 2 anos, 10 anos e 12 anos após o início da recuperação) foram submetidas a análises metagenômica, metaproteômica e comparadas com uma área de floresta nativa. Análises de DNA mostraram toda a diversidade microbiana e seu potencial funcional, a proteômica, por sua vez, verificou quais processos bioquímicos e rotas metabólicas estão efetivamente ativos no solo. A categorização funcional em processos biológicos demonstrou maior similaridade entre as áreas de recuperação avançada e solo nativo, indicando o sucesso da reabilitação, ao menos do ponto bioquímico do solo. Na Figura 86, amostras de solo de áreas em estágios mais avançados de

recuperação (RA10, RA12) são agrupadas junto da área referência (SN). A área com 2 anos de recuperação (RI2) também se destaca da área de solo exposto (SE). Esses resultados confirmam o sucesso da reabilitação do ponto de vista bioquímico do solo e demonstram o potencial da proteômica como ferramenta robusta para o monitoramento ambiental. Assinaturas moleculares ambientais devem ganhar espaço como uma nova ferramenta para avaliação e monitoramento ambiental. Uma vez que todos os dados estão disponíveis no banco de dados do ITV, novos resultados (diferentes áreas) poderão ser incorporados ao modelo, permitindo comparações bioquímicas e moleculares, o que acrescenta maior robustez às avaliações ambientais.

Monitoramento ambiental de fitofisionomias da Canga

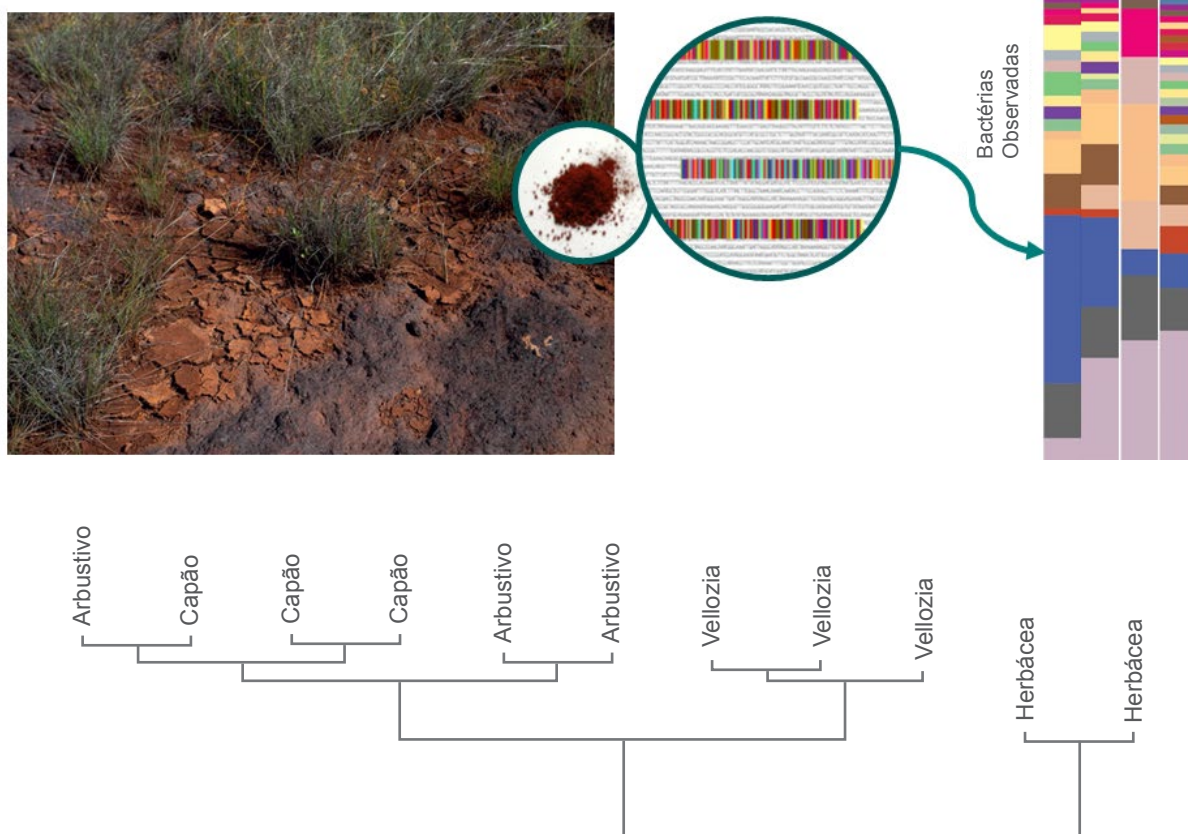


Figura 86: Árvore filogenética baseada na análise de proteínas de solos em diferentes estágios de recuperação. O agrupamento mostra que o solo das fitofisionomias contém um perfil característico de espécies de bactérias associadas.

Remediação e recuperação de cobre em drenagem de mina

Diversos microrganismos colonizam rochas metálicas, comumente encontradas em minas de cobre, ferro, níquel e outros minerais. Dentre esses microrganismos, algumas bactérias são capazes de produzir drenagem ácida de mina (DAM), que ocorre principalmente nas minas de cobre a partir da ação do metabolismo microbiano sobre os componentes das rochas. A DAM é uma solução aquosa ácida gerada quando minerais sulfetados de resíduos de mineração são oxidados em presença de água, gerando níveis elevados de metais e pH baixo. O tratamento tradicional de DAM consiste na neutralização do pH, promovendo a precipitação do metal.

Um dos projetos do ITV, em parceria com o Instituto SENAI de Inovação (ISI-TM), gerou um protótipo para a biorremediação da DAM*. Nesse protótipo, bactérias acidófilas capazes de desenvolverem-se em

condições de baixo pH foram colocadas em um biorreator onde produzem gás sulfídrico (H_2S) que é borbulhado na DAM, ocasionando a precipitação do sulfeto de cobre (CuS)**. O CuS é um produto comercializável. Microalgas isoladas de bacia de rejeitos da mina de Sossego e cultivadas na própria DAM são usadas para alimentar as bactérias acidófilas (Figura 87). Os resultados da pesquisa mostram a viabilidade de tratamento da DAM com a recuperação do cobre do resíduo da barragem e a remediação ambiental do efluente da drenagem. Foram isolados diversos microrganismos de DAM que têm potencial para uso em processos de remediação. Um dos microrganismos isolados é o ITV01, que foi testado com sucesso no processo de recuperação de cobre em DAM (Figura 87). O protótipo está pronto para ser testado em maior escala no campo.

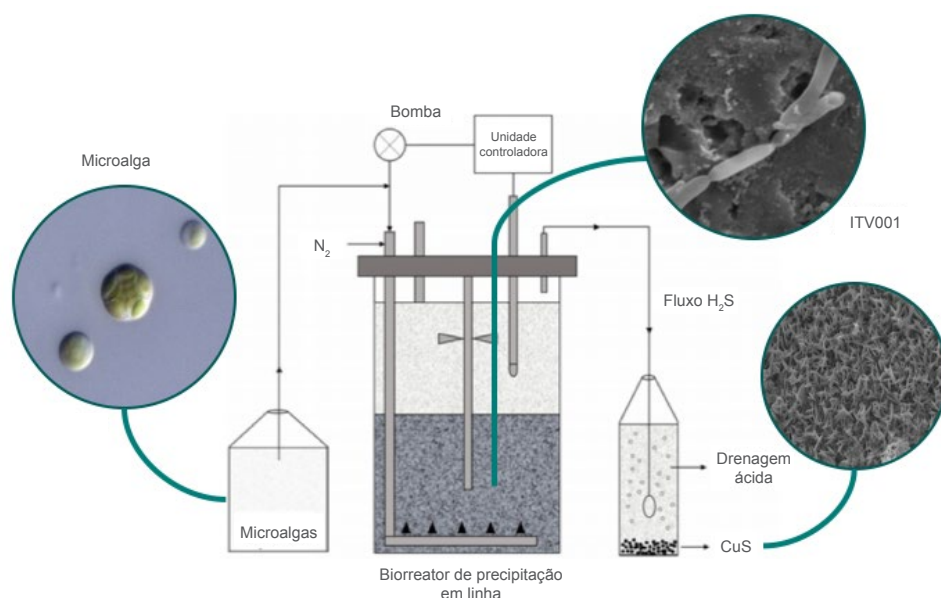


Figura 87: Biorreator, protótipo usado em projetos de biorremediação de drenagem ácida de minas***. A fotomicrografia à direita é da bactéria ITV001, isolada, com o genoma caracterizado e testada para uso no biorreator com drenagem em mina de cobre. O resultado do processo é o sulfeto de cobre recuperado. Figura adaptada de Santos (2016).

* doi.org/10.1155/2017/7256582

**doi.org/10.1016/j.resmic.2016.04.008; doi.org/10.1128/genomeA.00383-16, doi.org/10.1128/genomeA.01748-15

*** doi.org/10.1155/2017/7256582

Recuperação de áreas degradadas

O processo de exploração mineral requer a supressão da vegetação nas áreas de mina e nas áreas de deposição do material estéril. Para minimizar os efeitos ambientais dessa supressão, é necessário restaurar as áreas impactadas (Figura 88).

Em Carajás, a área ocupada pela mineração de ferro era de 51 km², em 2016, dos quais, originalmente, 27 km² e 24 km² eram floresta e vegetação de canga, respectivamente. Após três décadas de exploração mineral, 80,6% da área de canga na região de Carajás permanecem intocados.



O ITV contribui na busca por maior eficiência nos processos de recuperação das áreas impactadas, por meio da execução de um conjunto de atividades que incluem a caracterização dos substratos minerados e o manejo de nutrientes para o melhor crescimento das plantas, a seleção e a propagação de espécies nativas, estudos sobre técnicas de revegetação em taludes de cava de mina e pilhas de estéril, e levantamento de indicadores para a avaliação do status da recuperação ambiental nas áreas revegetadas.

Figura 88: Áreas impactadas em recuperação em Carajás. Taludes da cava N4WN a serem revegetados (esquerda) e taludes parcialmente revegetados nas Pilhas de Estéril Oeste (centro) e NW II (direita).

Após três décadas de exploração mineral,
80,6% da área de canga na região de
Carajás permanecem intocados.

* doi.org/10.1371/journal.pone.0211095

Caracterização de solos e substratos

A avaliação das propriedades físicas e bioquímicas do solo vem sendo realizada nas principais áreas revegetadas nas unidades de ferrosos da Vale em Carajás. As áreas amostradas compreendem pilhas de estéril, taludes de cava de mina e áreas destinadas à restauração florestal para a compensação ambiental. Os resultados mostram que as áreas a serem revegetadas apresentam

reduzida atividade microbiológica no solo e muito baixa fertilidade. Isso se traduz em baixos teores de matéria orgânica e de nutrientes disponíveis no solo para as plantas. Dessa maneira, destaca-se a importância do uso de fertilizantes para promover melhor crescimento e desenvolvimento inicial da vegetação nas áreas em recuperação, como ilustrado na Fig. 89.



Figura 89: Experimentos para detectar a resposta nutricional de diferentes espécies vegetais em substratos distintos. Plantas na figura inferior foram fertilizadas com micro e macronutrientes.

Solos de áreas
mineradas apresentam
reduzida atividade
microbiana. Com
intervenção adequada
elas se recuperam
rapidamente.

Uma das alternativas para melhorar a recuperação é o uso de **topsoil**. No entanto, seu uso apresenta limitações para áreas extensas, e por isso, é pouco praticado. Entretanto, onde é praticado os resultados

são evidentes. Em áreas revegetadas na mina de Manganês em Carajás, o uso de **topsoil** promoveu maior crescimento e diversidade filogenética da vegetação do que o plantio de mudas.

Indicação de espécies vegetais nativas para recuperação de áreas mineradas

O ITV vem desenvolvendo estudos que visam à indicação de espécies vegetais nativas adequadas para recuperação de áreas impactadas pela mineração. A primeira etapa iniciou-se com a seleção das espécies vegetais nativas dos campos ferruginosos de Carajás, com

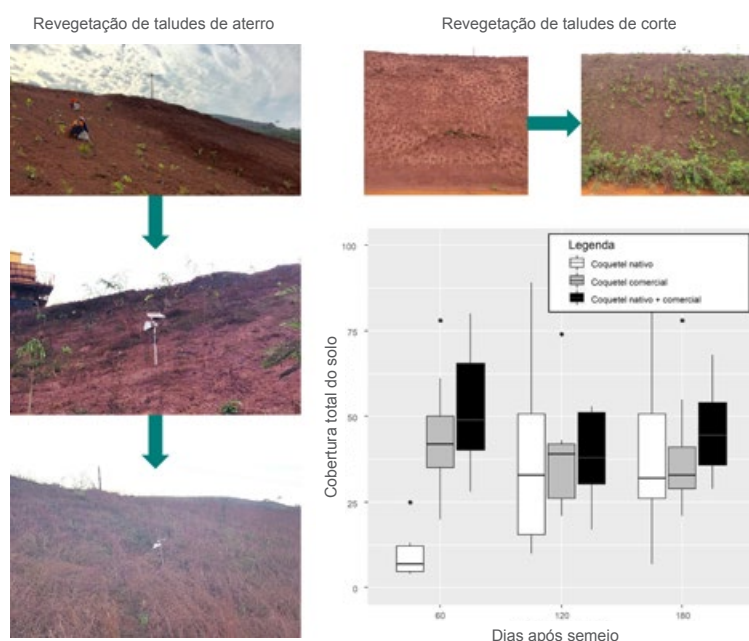
maior potencial de uso em programas de recuperação. Nesse sentido, 53 espécies com maior potencial de recuperação das áreas e retorno dos serviços de ecossistema foram selecionadas considerando uma série de características relacionadas ao manejo, distribuição geográfica e interação com

a fauna*. Posteriormente, a partir do uso de critérios de importância nas comunidades vegetais das cangas e florestas, da facilidade de propagação, do potencial para atrair a fauna dispersora e da persistência em áreas já revegetadas, foram selecionadas aproximadamente 100 espécies compiladas.

Técnicas de revegetação com espécies vegetais nativas em áreas mineradas

Estudos de propagação das espécies nativas já foram realizados em mais de 60 espécies. Protocolos vêm sendo criados para a quebra de dormência de sementes, assim como o emprego de propagação vegetativa para aquelas espécies com dificuldade para a propagação via sementes, como as gramíneas nativas das cangas. Obter sementes de qualidade e com boa germinação representa um passo essencial para a produção de mudas nos viveiros.

Outros estudos avaliam o crescimento de diferentes coquetéis de espécies em áreas de taludes de aterro (pilhas de estéril) e de corte (cavas de mina) (Figura 90). Resultados preliminares indicam que coquetéis de espécies nativas das cangas de Carajás mostram maior tolerância à seca do que as espécies comerciais utilizadas em Carajás, apresentando menor perda da cobertura vegetal com a redução da disponibilidade hídrica.



* doi.org/10.1111/aec.12470

Os estudos de RAD contemplam também a conservação de espécies raras e endêmicas como o caso do jaborandi (*Pilocarpus microphyllus*), que tem papel importante na geração de renda para famílias que vivem no entorno da Flona de Carajás. O jaborandi é uma espécie ameaçada de extinção devido à extração predatória e possui ocorrência natural no interior da Flona de Carajás, região que ainda conserva grande parte de suas populações

nativas. Foram estudados a fenologia, o crescimento natural, a propagação, ensaios para o crescimento em campo (Figura 91), além do monitoramento de plantios dessa espécie em áreas em fase de recuperação ambiental. Os estudos prosseguem por meio do desenvolvimento de técnicas de plantio, com a finalidade de exploração pela agricultura familiar, contribuindo para melhorar a renda de comunidades que vivem do extrativismo dessa espécie.



Figura 91: Estágios de crescimento e reprodução de plantas de *Pilocarpus microphyllus*. a) planta madura atingindo aproximadamente 2,5 m de altura; b) crescimento de plântulas no sub-bosque da floresta; c) flores; d) frutos imaturos e maduros; e) sementes colhidas após deiscência de frutos.

Indicadores do status de recuperação ambiental em áreas mineradas

A recuperação ambiental das áreas mineradas tem o objetivo de restituir a biodiversidade e o funcionamento ecossistêmico como parte da estratégia de minimizar o impacto ambiental causado pelas atividades antrópicas. O ITV busca definir métodos integrados e funcionais capazes de medir o status da recuperação de áreas revegetadas após a mineração de ferro (Corumbá e Carajás) e manganês.

Para isso, o ITV monitora cronossequências de áreas sem intervenções, áreas com diferentes estágios de recuperação ambiental (iniciais, intermediários e avançados) e áreas de referência cobertas por vegetação nativa. Parâmetros como os aspectos funcionais e filogenéticos da vegetação, disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica, microrganismos e atividade microbiana do solo são alguns dos parâmetros avaliados. Para esse monitoramento, são utilizados métodos de análises bioquímicas do solo e abordagens de metaproteômica e de metagenômica.

Em Corumbá, o status da recuperação ambiental de áreas com até cinco anos de idade alcançou aproximadamente 60% do valor das áreas de referência, cobertas por vegetação nativa. Entre 32 variáveis levantadas, a cobertura vegetal, diversidade funcional e filogenética foram os melhores preditores para avaliar o status de recuperação da área. Em Carajás, os resultados apontam que a composição florística, densidade arbórea, área basal,

riqueza, diversidade filogenética e as características edáficas das áreas em fase de recuperação tendem a ser semelhantes às das áreas nativas após certo tempo em recuperação. A partir de análise multivariada de processos ecológicos, estrutura e diversidade da vegetação, foi possível mostrar que as pilhas de estéril de Carajás em fase de recuperação ambiental já alcançam 50% dos níveis pré-mineração após somente cinco a sete anos de intervenção (Figura 92). A inclusão de estudos da fauna e das funções ecossistêmicas no monitoramento futuro poderá melhorar o diagnóstico das áreas em processo de recuperação. Esses estudos apontam para procedimentos técnicos e objetivos capazes de qualificar e quantificar o status de áreas mineradas em processo de recuperação.

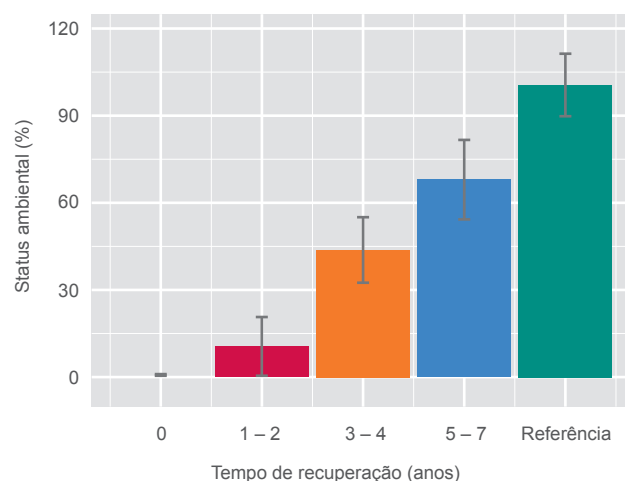


Figura 92: Status da recuperação ambiental em diferentes cronossequências de três pilhas de estéril no complexo Carajás, Parauapebas.

A recuperação ambiental de áreas degradadas tem por objetivo restituir a biodiversidade e o funcionamento ecossistêmico da área impactada.

Recomposição Florestal na BHRI

Com aproximadamente 42.200 km² de extensão, a bacia já perdeu aproximadamente metade de sua vegetação original (Figura 93). A recuperação das áreas de preservação permanente (APPs) e reserva legal (RL), desmatadas ilegalmente, está prevista na Lei de proteção da Vegetação Nativa (Lei nº12.651, de 25 de maio de 2012). A recuperação dessas áreas ajudaria a restabelecer corredores ecológicos, conectando fragmentos florestais, e a preservar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas.

A fim de contribuir para a recomposição florestal na bacia, o ITV realiza pesquisas que contribuem para a redução do passivo ambiental da bacia. Para isso, mapeia e referencia a extensão das áreas de APPs e RL como uma forma de apoiar a lei de proteção da vegetação nativa. Esta iniciativa está alinhada com a estratégia de

Desenvolvimento Regional Sustentável da Vale, com seu Plano de Compensação e com as políticas nacionais de clima que apoiam as iniciativas nacionais de restauração florestal.

De acordo com o que determina a legislação ambiental, o diagnóstico ambiental da bacia foi realizado com estimativas de APP (de rios, lagos, reservatórios, nascentes, declividade maior que 45° e topo de morro) e RL totais, incluindo a situação dessas áreas em termos de cobertura vegetal, desmatamento, área a ser recuperada e excedente de floresta.

Foi estimada uma área total de APP de 5.447 km² (13% da área da bacia hidrográfica). Desse total, 55% são compostos por florestas; 25% por áreas que precisam ser restauradas e 20% por

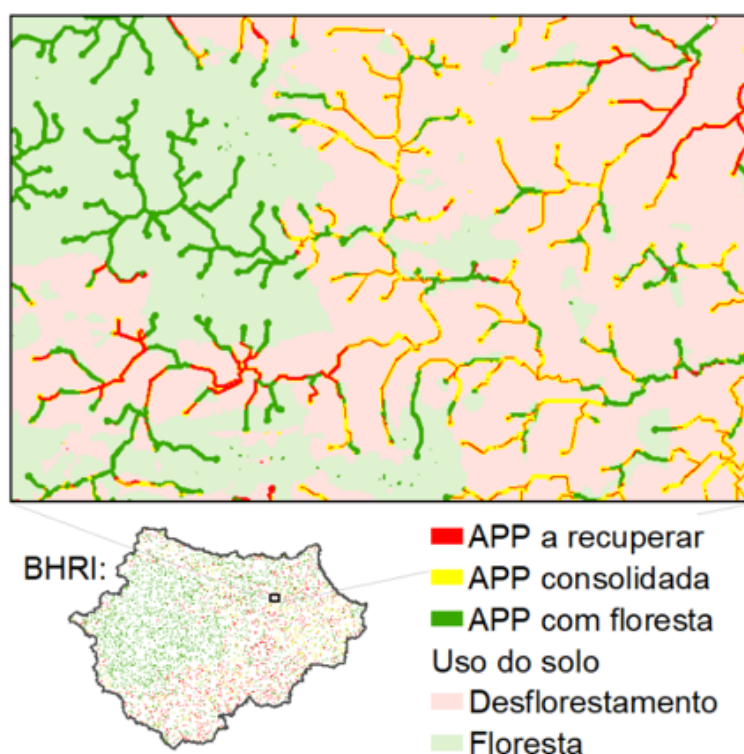


Figura 93: Mapeamento da situação ambiental das áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas em 2017.

áreas consolidadas (que foram desmatadas, mas não precisam ser recuperadas, segundo a legislação). Um exemplo do diagnóstico das APPs é apresentado na Figura 95.

Quanto às áreas de RL, há um passivo total de 4.383 km² de floresta (correspondente a 21% do desmatamento da bacia). Desse passivo, 44% devem ser obrigatoriamente restaurados e 56% podem ser sanados via compensação em qualquer lugar do

bioma amazônico (Figura 94). Por outro lado, há um excedente de 3.241 km² de áreas de floresta, dos quais 4% podem ser desmatados e 96% não podem ser desmatados, mas podem ser usados para compensar passivos de outros locais.

Dessa forma, a área total da bacia que precisa ser restaurada por lei, considerando APPs e RL, é de 3.275 km² (8% da área da bacia).

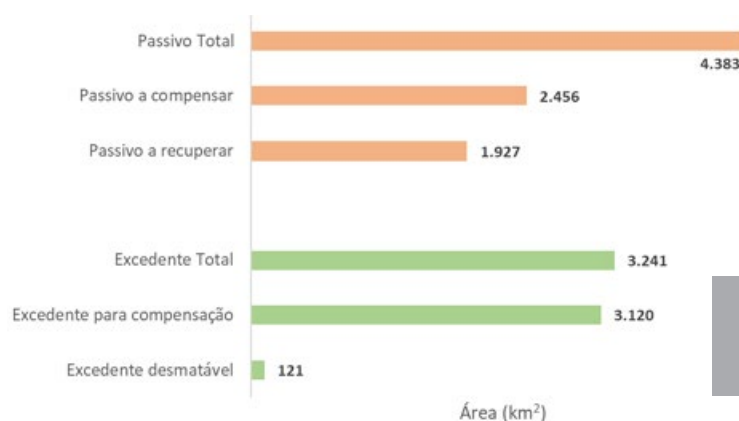


Figura 94: Situação da reserva legal na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas em 2017.

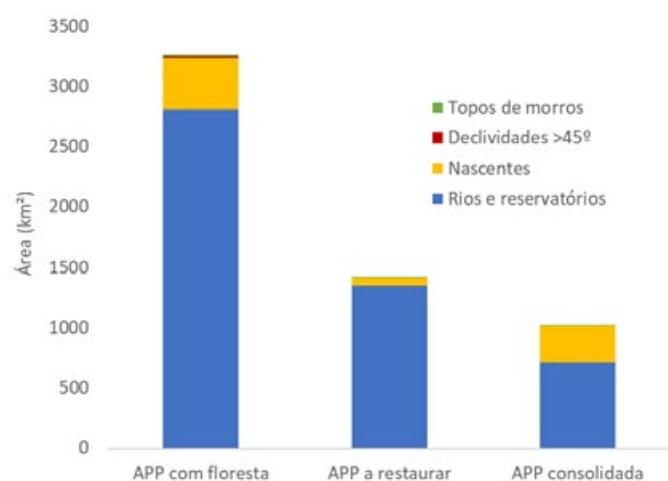


Figura 95: Áreas de preservação permanente (APP) de topos de morro, declividade maior que 45°, nascentes, rios e reservatórios que possuem cobertura florestal, que precisam ser restauradas e que são consolidadas (desmatadas, mas não necessitam ser restauradas), na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas em 2017.

A área total da bacia que precisa ser restaurada por lei, considerando APPs e RL, é de 3.275 km².

A

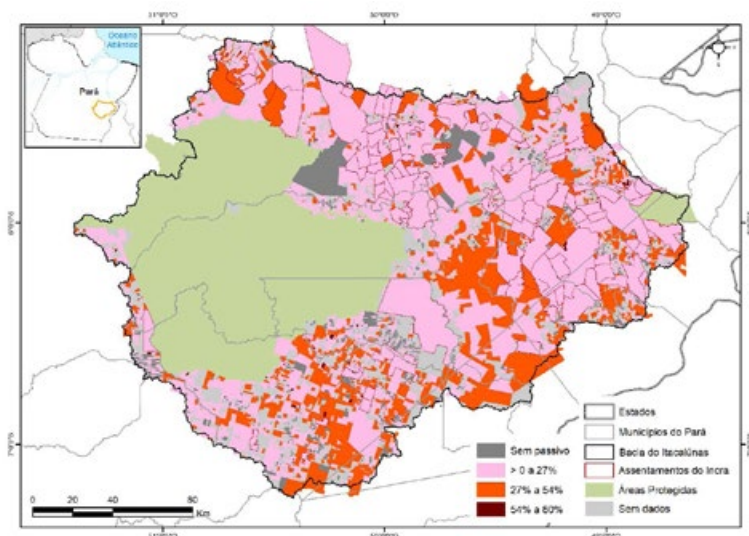


Figura 96A: Mapa da área de passivo ambiental de reserva legal na bacia do rio Itacaiúnas.

B

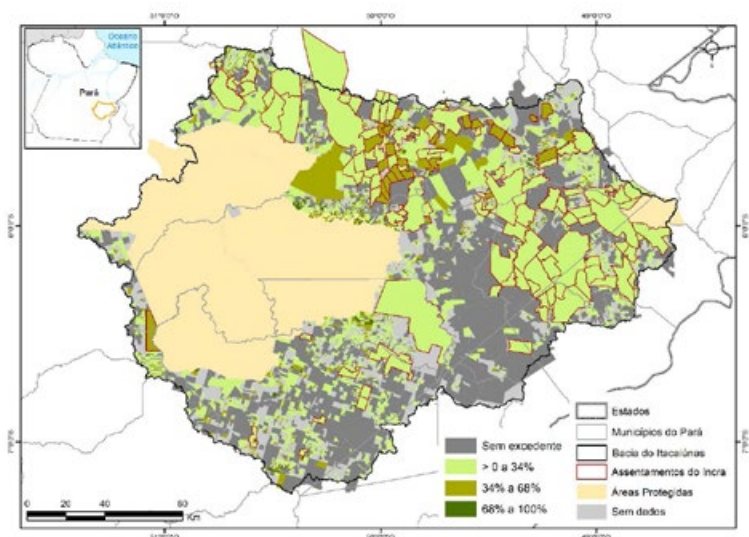


Figura 96B: Mapa da situação ambiental da reserva legal na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas em 2017, mostrando o excedente de reserva legal.

O mapa da situação ambiental da bacia será atualizado anualmente a partir de 2019, quando iniciadas as atividades de implementação da recomposição florestal. Serão selecionadas áreas prioritárias e propostos modelos de restauração, em nível de imóvel rural, que atendam à legislação e, ao mesmo tempo, possam servir de renda às comunidades locais.

Socioeconomia

As pesquisas na área de Socioeconomia analisam a dinâmica do desenvolvimento econômico e social dos territórios em que a Vale atua, com atenção para os impactos do negócio na ocupação e desenvolvimento dos territórios (urbano e rural), sobre a mão de obra, comunidades e as interações dos negócios da empresa com as vocações locais. Buscam, ainda, identificar oportunidades e potencialidades de desenvolvimento do território, contribuindo para o desenvolvimento sustentável regional.

Até agora, os estudos aconteceram na região do Corredor Norte, no Pará e Maranhão, com foco em comunidades lindeiras à Estrada de Ferro Carajás (EFC) e nas cidades de Canaã dos Carajás e Parauapebas. Além de diagnósticos socioeconômicos de 28 municípios atravessados pela EFC e de 49 comunidades críticas para a Vale, os pesquisadores analisaram a vulnerabilidade, a satisfação e o modo como essas populações interagem e enxergam a Vale. Também realizaram estudos sobre os conflitos sociais ligados à EFC e a sua relação com as condições de

vida e as percepções dessas comunidades. As pesquisas incluíram a análise de redes de stakeholders no território e a medição do impacto dos negócios da Vale no desenvolvimento socioeconômico, assim como uma estimativa do legado que a empresa já gerou no Pará e Maranhão. Estudos abordando aspectos físico-ambientais, das vocações e potencialidades para subsidiar um plano de desenvolvimento sustentável da região foram desenvolvidos. Elaborou-se também um atlas socioeconômico desse território. Apresentamos, em sequência, alguns resultados das pesquisas efetuadas.

Perfil socioeconômico da Estrada de Ferro Carajás

Inaugurada em 1985, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) tem 892 quilômetros de extensão e liga as minas do sudeste do Pará ao Porto de Ponta da Madeira, em São Luís (MA).

Ela possui um ramal ferroviário de 101 quilômetros para ligação ao S11D. Por seus trilhos, foram transportados mais de 200 milhões de toneladas de carga e cerca de 300 mil passageiros no ano de 2018. É estratégico para a Vale conhecer esse território e as comunidades que nele vivem.

Um conjunto de indicadores socioeconômicos foi constituído com base em dados secundários de bases oficiais, como o IBGE, e dados de pesquisa de campo obtidos em 49 comunidades consideradas prioritárias pela Vale ao longo da EFC. Foi possível, assim, elaborar o perfil de cada uma dessas comunidades e dos municípios. Um detalhe desses perfis pode ser observado na Figura 97.

Essa informação está sendo utilizada para construir uma plataforma digital de dados socioeconômicos do território da EFC, que será disponibilizada no site do ITV.

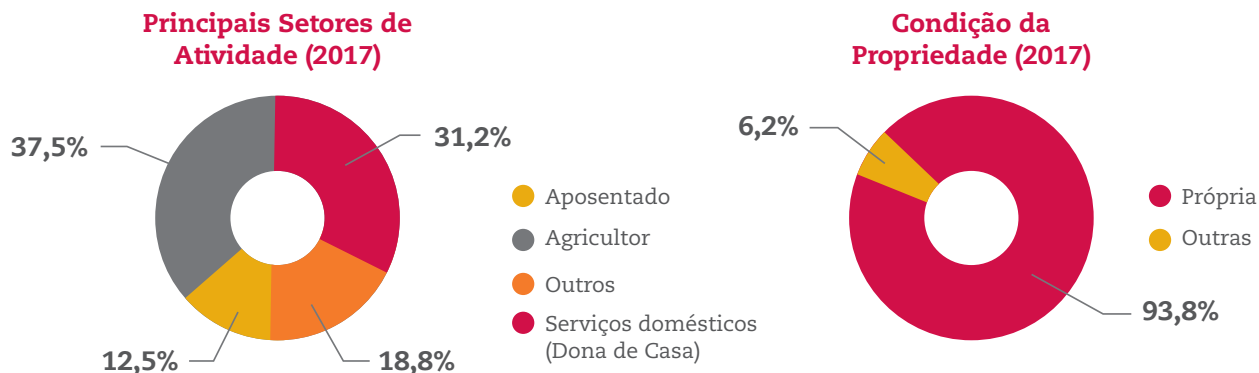
Total Renda Domiciliar Formal (2017) **R\$ 1.058,31**Renda Informal (2017) **R\$ 229,69**Renda Própria (2017) **R\$ 594,50**

Figura 97: Ilustração de alguns indicadores que foram usados para traçar o perfil das comunidades ao longo da EFC (Fonte: ITV DS, 2018).

Vulnerabilidade socioeconômica na Estrada de Ferro Carajás

A análise dos dados obtidos permitiu construir um índice de vulnerabilidade ou criticidade dos 1.906 domicílios das comunidades da EFC estudadas. Para essa abordagem, foi utilizada uma metodologia quantitativa com base em 13 variáveis socioeconômicas dos domicílios com maior relevância estatística. Esse índice, que varia de zero a um, pode ser utilizado para monitorar a condição socioeconômica das populações-alvo e para orientar ações da empresa e de outros stakeholders. Usando os percentis das vulnerabilidades domiciliares, também estabelecemos classes de vulnerabilidade (Tabela 9).

Foi constatado que 82% (40) das comunidades pesquisadas têm vulnerabilidade alta ou máxima. As comunidades do Pará apresentaram,

em geral, menores vulnerabilidades. A comunidade de Cariongo 3, em Miranda do Norte, no Maranhão, apresentou a maior vulnerabilidade. Essa comunidade foi recentemente contemplada com o investimento social da Vale no valor de quatro milhões de reais, o que permitiu a construção de 100 casas, em parceria com a Prefeitura e com a Associação dos Moradores de Cariongo 3, que contribuíram com a cessão do terreno e a realização da obra, respectivamente (Figura 98).

Apesar da elevada vulnerabilidade, os dados mostraram que os entrevistados declararam um nível de satisfação médio de 3,85 em morar nas suas comunidades (escala de 1 a 5).

Vulnerabilidade	Valor do índice médio	Nº de comunidades	
		PA	MA
Baixa	Até 0,1611	1	0
Moderada	De 0,1612 a 0,2253	7	1
Alta	De 0,2254 a 0,4840	5	33
Máxima	Acima de 0,4840	0	2

Tabela 9: Classes de vulnerabilidade das 49 comunidades (Fonte: pesquisa de campo do ITV DS, 2016 e 2017).



Figura 98: Investimento social patrocinado pela Vale em Cariongo 3 (Miranda do Norte, Maranhão), uma das comunidades da EFC (Fonte: pesquisa de campo do ITV DS, 2017).

Conflitos sociais relacionados com a Estrada de Ferro Carajás

Os conflitos sociais ligados direta ou indiretamente à ferrovia também foram pauta do estudo do ITV, considerando evidências de insatisfação motivadas por efeitos da ferrovia – reais ou percebidos como tais – ou, com insatisfações de outras ordens que são carreadas para a EFC. Os estudos indicam que a melhoria do relacionamento depende tanto do aumento das condições de vida das populações do entorno quanto do diálogo, com respeito à diversidade de povos e de usos sociais dos territórios.

Muitos dos conflitos tiveram ligação com as obras de duplicação. Esse é um modelo complexo e desafiante para a modelagem estatística com base nos dados disponíveis.

Foram encontradas evidências com significância estatística da associação entre o índice de vulnerabilidade socioeconômica das comunidades e as interrupções ocorridas na EFC. Foi ainda construído um modelo logit para estimar a probabilidade de ocorrência de conflitos nos municípios (Figura 99).

Melhoria no relacionamento depende tanto do aumento das condições de vida das populações locais quanto do diálogo com essas comunidades.

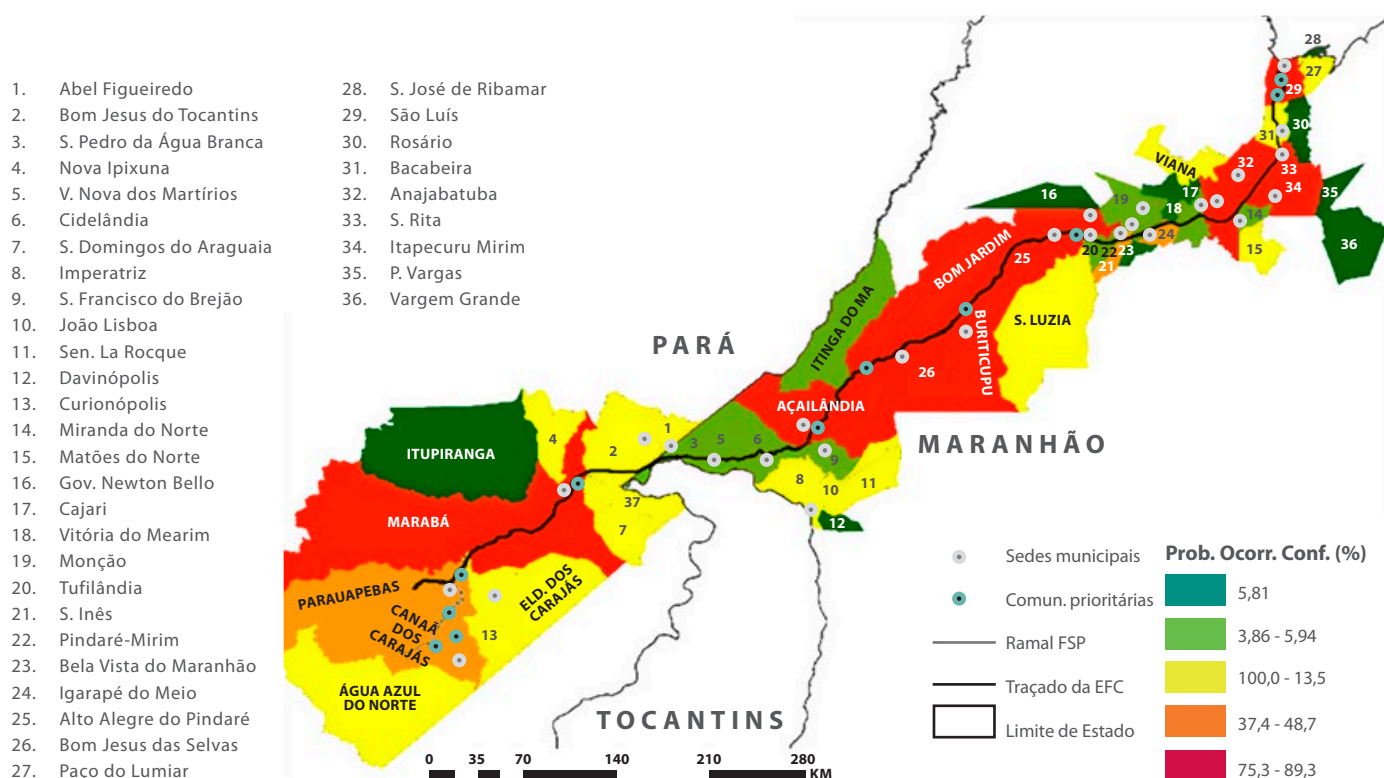


Figura 99: Probabilidade de ocorrência de conflitos no entorno da EFC (Fonte: ITV DS, 2016).

Fatores de risco social na EFC

A análise dos fatores potenciais de risco social para as operações de mineração, em especial a logística, também foi realizada. Identificamos os seguintes fatores: grau de exposição das comunidades aos impactos da ferrovia, condição socioeconômica das famílias, ocorrência de acidentes e grau de satisfação das populações. A fim de melhorar a mobilidade e evitar acidentes, 500 milhões de reais foram investidos nos últimos anos, sendo que, no período entre 2013 e 2018, 48 viadutos rodoviários foram construídos, incluindo passagens para pedestres e ciclistas em 27 municípios da EFC (Figura 100).



Figura 100: Viaduto construído para garantir travessia segura às populações (Fonte: pesquisa de campo do ITV DS e Vale Informar, 2017).

A Percepção Social da Mineração

Realizada em Parauapebas (960 domicílios) e em Canaã dos Carajás (349 domicílios), uma pesquisa de campo analisou a percepção social da imagem, reputação e identidade da mineração.

De maneira geral, a indústria da mineração foi considerada parceira pelos moradores

de ambas as cidades, que avaliaram ainda o setor como confiável e envolvido na solução dos problemas dos municípios. Os resultados mostraram que cerca de 80% dos entrevistados afirmaram confiar na mineração (Figura 101), sendo todos os índices mais positivos em Parauapebas do que em Canaã dos Carajás.

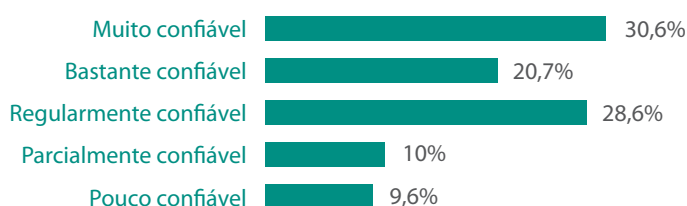


Figura 101: Confiabilidade da mineração (Fonte: pesquisa de campo nas cidades de Canaã dos Carajás e Parauapebas, 2018).

Redes sociais no território da EFC

Uma análise da rede de instituições atuantes nas comunidades da EFC foi realizada para entender como elas se articulam entre si (Figura 102). Essa rede foi construída a partir de dados obtidos por entrevista presencial com 17 líderes de associações comunitárias e outras instituições da região.

A análise demonstrou que a rede tem limitada capacidade de desenvolvimento e de articulação coletiva. O destaque foi para a Comissão Pastoral da Terra (CPT), o Centro de Cultura Negra (CCN) e o Movimento Interestadual de Mulheres Quebradeiras de Coco Babaçu (MIQCB) como os atores centrais da rede institucional na região.

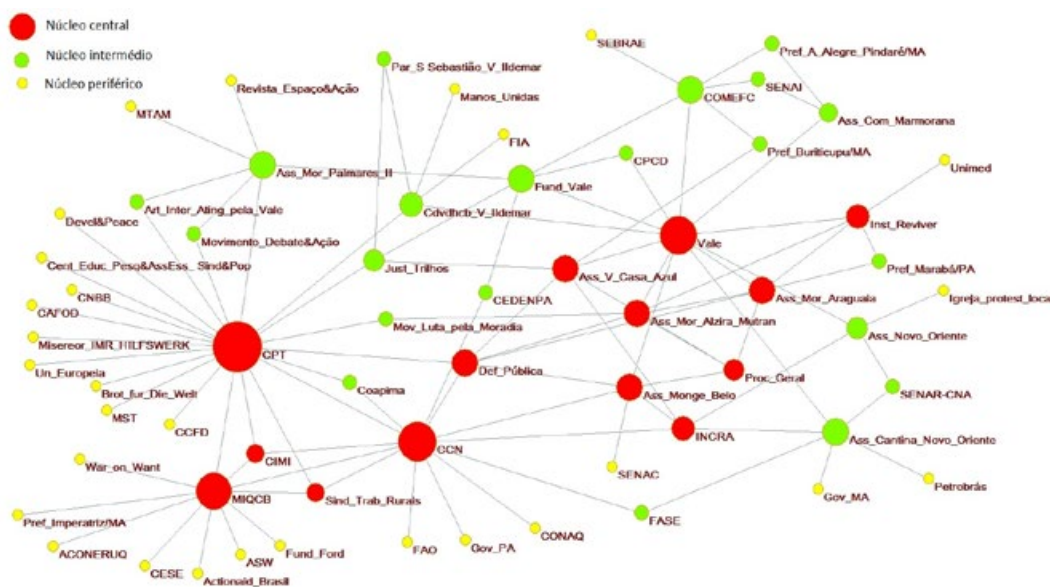


Figura 102: Rede de atores institucionais na região da EFC (Fonte: pesquisa de campo do ITV DS, 2016).

Impactos dos *royalties* da mineração

Outro estudo buscou avaliar o impacto dos *royalties* da mineração (CFEM) sobre os indicadores de desenvolvimento humano (Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal - IFDM) nos municípios do Sudeste Paraense, entre os anos de 2006 e 2016. As evidências demonstraram que a participação da CFEM nas receitas municipais do Sudeste Paraense contribuiu para elevar o IFDM desses municípios.

As evidências estatísticas indicaram que os municípios arrecadadores de CFEM têm um grau de desenvolvimento humano superior àquele verificado nos municípios não arrecadadores. A hipótese de que a mineração contribui significativamente para

o crescimento da receita dos municípios foi confirmada, sendo que esse aumento afeta positivamente a oferta de bens e serviços públicos, impactando na evolução dos indicadores de desenvolvimento humano nesses locais.

Ainda que o impacto da CFEM no IFDM seja positivo, é possível que exista uma limitação institucional que interfira em transbordamentos mais efetivos dessa compensação para o desenvolvimento local, uma vez que a evolução dos investimentos e oferta de bens e serviços públicos demonstram não acompanhar a evolução do crescimento da arrecadação e receita municipal (Figura 103).

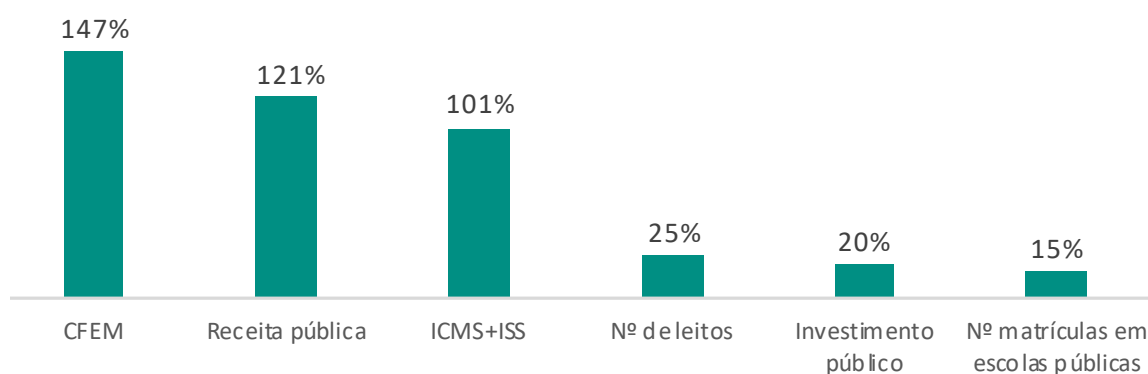


Figura 103: Crescimento das variáveis entre os anos de 2006 e 2016 nos municípios arrecadadores de CFEM (Fonte: Socioeconomia e Sustentabilidade, ITV DS, 2017).

Municípios arrecadadores de CFEM têm um grau de desenvolvimento humano superior àquele verificado nos municípios não arrecadadores.

Enquanto a CFEM distribuída cresceu na ordem de 147% e as receitas municipais, 121%, os investimentos públicos cresceram apenas 20%. A disponibilidade de leitos hospitalares e de matrículas escolares na rede pública aumentou 25% e 15%, respectivamente. Efeitos positivos que a CFEM pode exercer na região estão, também, correlacionados com

aspectos políticos, jurídicos e técnicos que podem limitar o fortalecimento de um ambiente institucional propício à efetiva aplicação das compensações financeiras. Além disso, há a possível falta de controle social efetivo e de transparência no direcionamento e operacionalização de recursos oriundos da mineração.

Legado da Vale no Sistema Norte no período de 2008 a 2017

O ITV realizou também um inventário do legado da Vale (Figura 104), considerando as ações realizadas entre os anos de 2008 e 2017, a partir de informações cedidas pela Gerência de Gestão Ambiental. O objetivo desse estudo foi o de avaliar o legado gerado pelos investimentos da Vale no Pará e no Maranhão, que somam dois bilhões de reais. Cerca de 702 milhões foram investidos em legado imaterial, sendo a área de educação

contemplada com 17,6% desse montante; a da cultura com 7,4%; as da saúde, social, esporte, lazer, emprego e renda com 75%. 1,3 bilhão de reais foi investido em legado material, dos quais as áreas de infraestrutura urbana e de mobilidade receberam 39,2% dos investimentos; as de saúde e saneamento básico, 8%; e infraestrutura em educação, cultura, esporte, lazer, emprego e renda, 52,8%.

Legado Imaterial

R\$ 701,6 Milhões (35,4%)

Legado Material (Infraestrutura)

R\$ 1.280,3 Milhões (64,6%)

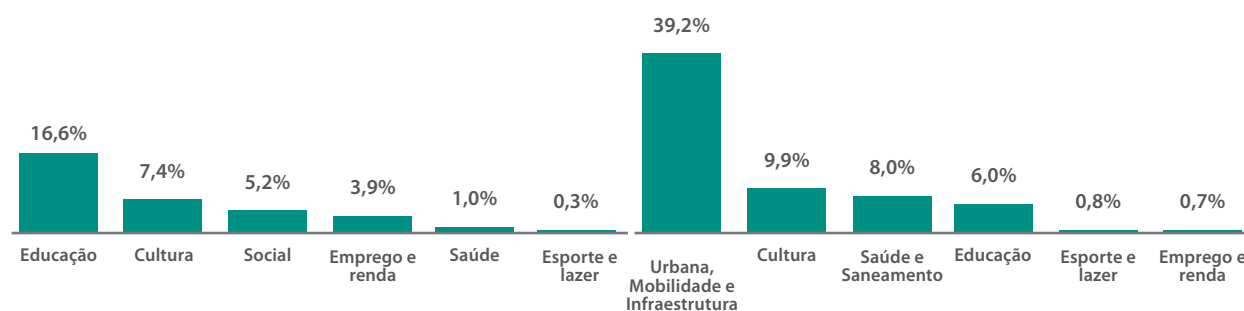


Figura 104: Investimentos em legado imaterial e material da Vale no Corredor Norte de 2008 a 2017 (em R\$ constantes de 2017). Fonte: Elaborada pela Socioeconomia e Sustentabilidade ITV, 2018, a partir de banco de dados disponibilizado pela Gerência Executiva do Meio Ambiente da Vale.

Como demonstrado na Figura 104, do investimento total da empresa, associado ao legado da mineração no território, um montante de 777,6 milhões de reais foi aplicado em infraestrutura urbana e mobilidade atendendo às necessidades dos municípios da EFC envolvidos na duplicação da ferrovia patrocinada pelo projeto S11D. A escolha da localização do investimento levou em consideração a criticidade dos locais com base em alguns parâmetros como o fluxo de veículos e pedestres nas passagens de nível oficiais, que são locais

de cruzamento entre ferrovia e rodovia ou estrada, cujas inversões financeiras contribuíram para diminuir os incidentes na Ferrovia. Os municípios beneficiados pelo projeto foram: Açailândia, Alto Alegre do Pindaré, Arari, Bacabeira, Bom Jesus das Selvas, Bom Jesus do Tocantins, Buriticupu, Itapecuru Mirim, Marabá, Miranda do Norte, Monção, Parauapebas, Pindaré Mirim, Santa Inês, Santa Rita, São Luís, São Pedro da Água Branca, Tufilândia, Vila Nova dos Martírios, Vitória do Mearim. A educação é a segunda área que mais recebeu investimentos

da Vale nesses territórios (467,6 milhões de reais), envolvendo desde a formação técnica e aperfeiçoamento de professores até a reforma e construção de escolas. A área da cultura também teve destaque no volume total de investimentos, recebendo 343,2 milhões de reais distribuídos em patrocínios de atividades culturais e preservação de acervo da cultura regional. As ações patrocinaram atividades no teatro, na música, no folclore e na preservação do patrimônio arquitetônico histórico. Saúde e saneamento básico foram contemplados com 178,5 milhões de reais de investimentos, especialmente em projetos comunitários que buscam promover o autocuidado e os hábitos de higiene nas comunidades, por meio de tecnologias sociais e melhoria da assistência nas unidades básicas de saúde dos municípios. A saúde é uma área de investimento estratégico para a empresa, uma vez que contribui para melhorar a qualidade de vida e o bem-estar de comunidades carentes. As principais ações visaram à distribuição

de testes para detecção de HIV, reformas de hospitais, postos de saúde e compra de unidades móveis de saúde para atender a demandas específicas. Ainda com destaque, o investimento social de 102,3 milhões de reais buscou, basicamente, apoiar ações de diálogo com as comunidades, a gestão pública, o monitoramento de indicadores sociais e projetos relacionados à segurança pública. Emprego e renda receberam investimentos no total de 91,7 milhões de reais e envolveram parcerias com o setor público e entidades da sociedade civil para multiplicar o capital econômico e social, fomentar o desenvolvimento econômico e melhorar o bem-estar das comunidades locais. Os investimentos em esporte e lazer envolvem dança, atletismo, corridas, futebol, construção de quadras poliesportivas, capacitação de professores em educação física e financiamento para a participação de atletas em campeonatos nacionais, somando um total de 20,9 milhões de reais.

Diagnóstico do território de influência da EFC

Um diagnóstico físico-ambiental e das vocações regionais com vistas a um plano de desenvolvimento regional sustentável de territórios adjacentes ao complexo minero-logístico de Carajás foi elaborado no ITV. Esse estudo tem como objetivo o de fornecer subsídios técnicos sobre a vulnerabilidade social e a prospecção de oportunidades, o fomento de parcerias, o mapeamento da aptidão e uso da terra, o estímulo ao desenvolvimento sustentável com atenção às vocações e culturas das comunidades locais, para o crescimento sem degradação e exploração dos recursos naturais de maneira sustentável e produtiva.

É com essa configuração que a elaboração de um plano se destaca no âmbito regional, pois as populações dessa área são muito vulneráveis.

As características do solo e do clima no território da EFC indicam que 80% das terras têm potencial para o desenvolvimento das atividades agrícolas (Tabela 10). Assim, mapeamos as cadeias produtivas em função das vocações socioprodutivas, das aptidões para o uso da terra e a infraestrutura disponível, cujos destaques são o extrativismo e a silvicultura (madeira em tora, carvão vegetal), a aquicultura,

(tambaqui, curimatã, tambacu, pintado, alevinos), a pecuária (leite), a avicultura (ovos de galináceo), a meliponicultura (mel), a agricultura permanente (abacaxi, açaí, mamão) e a agricultura temporária (tomate, melancia, maracujá, feijão, arroz, milho e mandioca). As quatro últimas culturas fazem parte do sistema de produção classificado como "lavoura branca", presente na maioria das áreas produtivas e destinada principalmente à subsistência familiar, favorecendo também a alimentação animal e a regulação das

propriedades químicas e biológicas que influenciam na fertilidade e estabilidade do solo.

Além da atividade agrícola, a atividade extrativista também desponta como fonte de ocupação e renda, com destaque para o extrativismo do babaçu e a extração madeireira. Os valores das principais produções agropecuárias, referentes ao ano de 2017 dos municípios da EFC, podem ser consultados na Figura 105.

Aptidão agrícola das terras antropizadas	Boa para agricultura	Regular para agricultura	Boa para pecuária	Regular para pecuária	Não Recomendável	Área total
Área (Ha)	1.446.347	56.723	1.846.239	458.207	350.349	4.230.729
Percentual	34,2	1,3	43,6	10,8	8,3	100,0

Tabela 10: Aptidão agrícola (km²) das áreas antropizadas do território da EFC (Fonte: elaborado por ITV DS com base em dados do IBGE, 2018).

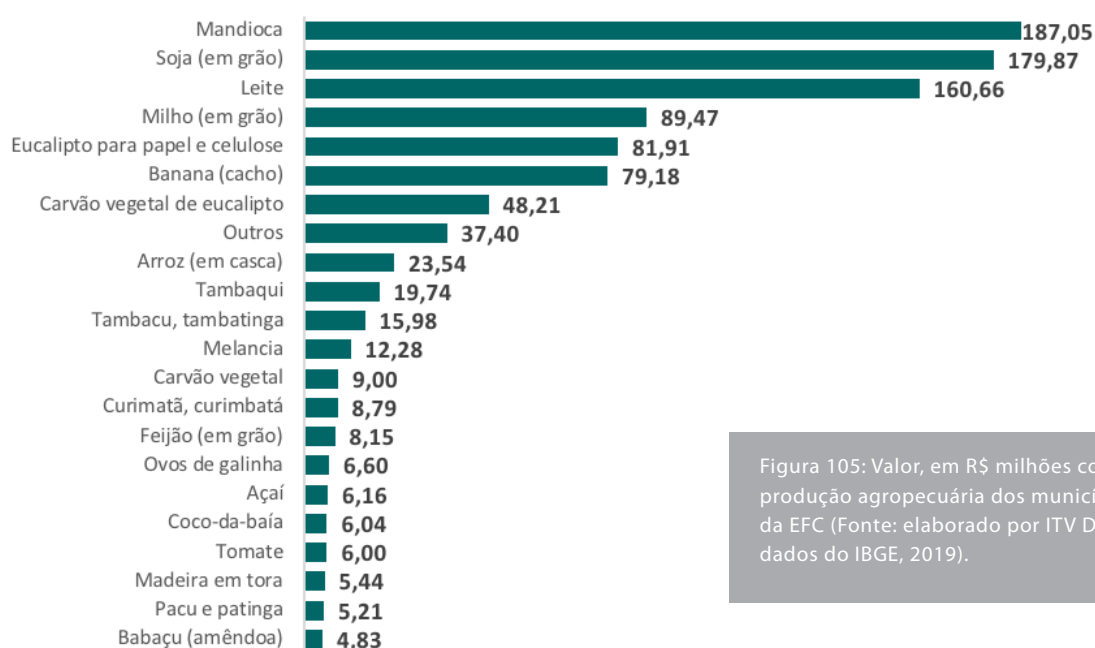


Figura 105: Valor, em R\$ milhões correntes, 2017, da produção agropecuária dos municípios do território da EFC (Fonte: elaborado por ITV DS com base em dados do IBGE, 2019).

Outros estudos realizados

As pesquisas da área de Socioeconomia e Sustentabilidade atendem às demandas de diferentes áreas da Vale, com análises específicas que podem ser customizadas conforme o contexto da localidade de interesse.

A fim de apoiar processos decisórios da Gerência de Força e Energia e de Relações com Comunidades do Corredor Norte, a pesquisa traçou o perfil e mediu a vulnerabilidade socioeconômica das famílias que ocupavam irregularmente áreas dentro da faixa de servidão do linhão que abastece o porto de Ponta da Madeira em São Luís (Figura 106).

Ainda em apoio à área de Relações com Comunidades, agora na Barragem do Sossego, compartilhamos informações socioeconômicas sobre as comunidades de Bom Jesus e Nova Jerusalém, em Canaã dos Carajás.

A interação é realizada também com a Vale em Moçambique. Pesquisadores realizaram estudos



Figura 106: Exemplo da forma de ocupação da faixa de servidão do linhão de São Luís. Fonte: pesquisa de campo, 2017.

em documentos de assentamentos no Corredor Logístico de Nacala e o suporte no desenho de um survey para diagnóstico socioeconômico desses assentamentos.

Estudo de vulnerabilidade
socioeconômica das famílias em
ocupação irregular apoia processos
decisórios da empresa.

Computação Aplicada

Identificação digital de espécies de plantas e abelhas

Identificar padrões e tomar decisões com o mínimo de intervenção humana é um dos objetivos da Inteligência Artificial (IA). Conhecido como "aprendizado de máquina", um ramo da IA é baseado na ideia de que os sistemas podem aprender a partir dos dados, com base no uso de um conjunto de métodos de análise de dados que automatizam a construção de modelos preditivos. Essa técnica vem sendo utilizada no ITV para identificar espécies de plantas

por meio da análise da imagem das folhas. A técnica utiliza algoritmos que aprendem com os dados usando redes neurais e técnicas de processamento digital de imagens. O sistema desenvolvido funciona em aplicativo para tablet (Figura 107 A e B) e reúne uma base de dados que permite usá-lo mesmo em um ambiente sem sinal de internet. Assim, o usuário pode levantar informações sobre a planta no exato momento em que a encontra no campo.



Figura 107 A e B: A figura da esquerda mostra o sistema de identificação de plantas sendo testado em campo para reconhecer espécies de *Ipomoeas*. À direita, é possível ver a imagem da folha de *Ipomoea*, transmitida para que a rede neural do sistema identificasse a espécie correta.

Um exemplo da aplicação dessa técnica está na identificação de espécies de bambu. A espécie foi escolhida por ser uma planta que floresce a cada 50 anos. Os resultados indicaram que o algoritmo desenvolvido foi seis vezes mais acurado na identificação de 13 espécies se comparado a um especialista botânico. Porém, é importante ressaltar que o especialista necessita visualizar a planta (Figura 108) e avaliar a textura através do toque. Caso apenas as folhas estejam disponíveis, o sistema pode ser considerado uma ótima alternativa para a identificação da espécie de planta em questão.

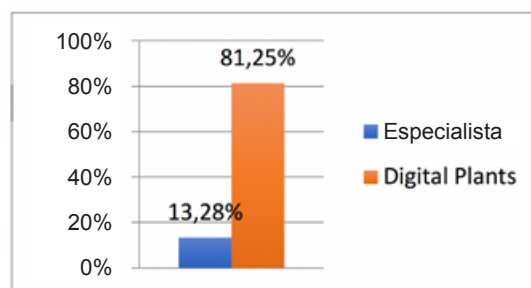


Figura 108: Teste comparativo entre a Inteligência Artificial do sistema e um especialista. Nesse teste, foi usada uma amostra com 128 indivíduos escolhidos aleatoriamente de 13 espécies de bambus.

A mesma abordagem está em desenvolvimento para a identificação de abelhas, conforme ilustrado na Figura 109. O processo consiste nas seguintes etapas: capturar a abelha; digitalizar a sua asa; identificar a espécie pelos algoritmos de IA, com base na diferenciação de bordas e distâncias das nervuras dessa asa, distintas para cada espécie; e obter uma descrição da espécie identificada.

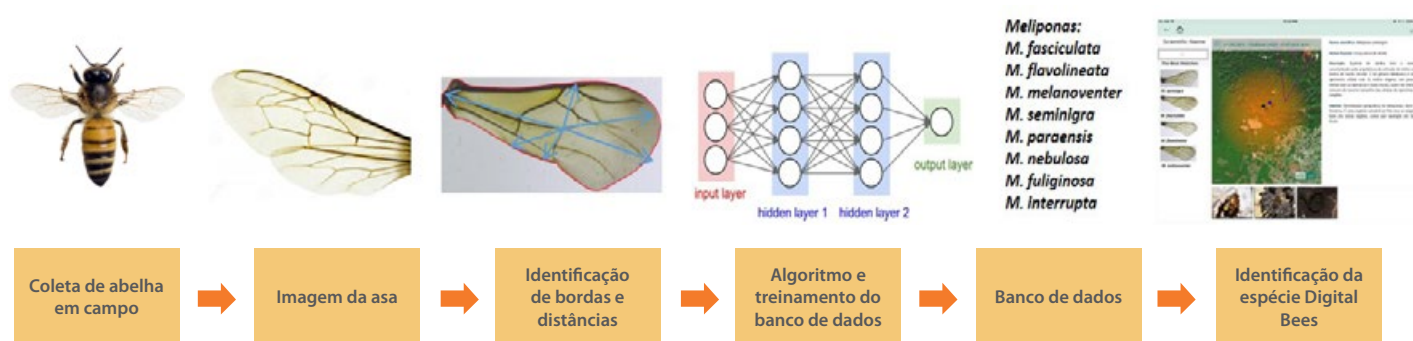


Figura 109: Identificação de espécies de abelhas pelo Digital Bees. Da esquerda para a direita: abelha capturada, digitalização da asa, identificação da espécie pelos algoritmos de IA e descrição da espécie identificada. Foram identificadas oito espécies do gênero *Melipona*.

Análise preditiva de incidentes ferroviários

O grupo de Computação Aplicada do ITV DS empregou abordagens de IA, aprendizado de máquina e visualização da informação, para desenvolver soluções de suporte à análise de informações para a tomada de decisões em outros setores da Vale. A iniciativa **Visual Analytic and Intelligence** atua na transformação e análise de dados operacionais em informações técnicas de grande interesse. As soluções desenvolvidas atuam em três fases da análise de dados: descritiva, diagnóstica e preditiva. A etapa descritiva procura apresentar um evento, como o contexto de ocorrência de uma falha operacional. A fase diagnóstica identifica as causas enquanto a fase preditiva procura responder o que seria mais provável de acontecer em um determinado contexto.

Uma das aplicações desse desenvolvimento ocorre na área de segurança ferroviária, que conta com a parceria da Comissão de

Investigação e Prevenção de Acidentes da Estrada de Ferro Carajás (CIPA-EFC). Primeiramente, são realizados a análise e o processamento dos dados operacionais vindos do Sistema de Gerenciamento de Incidentes, o **Incident management system (IMS)**. Posteriormente, algoritmos de aprendizado de máquina são aplicados e avaliados quanto à capacidade efetiva para análises. Por fim, tecnologias específicas para a visualização de dados e conhecimento são desenvolvidas, possibilitando o acesso à informação por meio de gráficos e mapas (Figuras 110 e 111). Por questões de confidencialidade de informações, os incidentes ilustrados das Figuras 110 a 112 são de caráter meramente ilustrativo e não correspondem aos incidentes reais das operações.

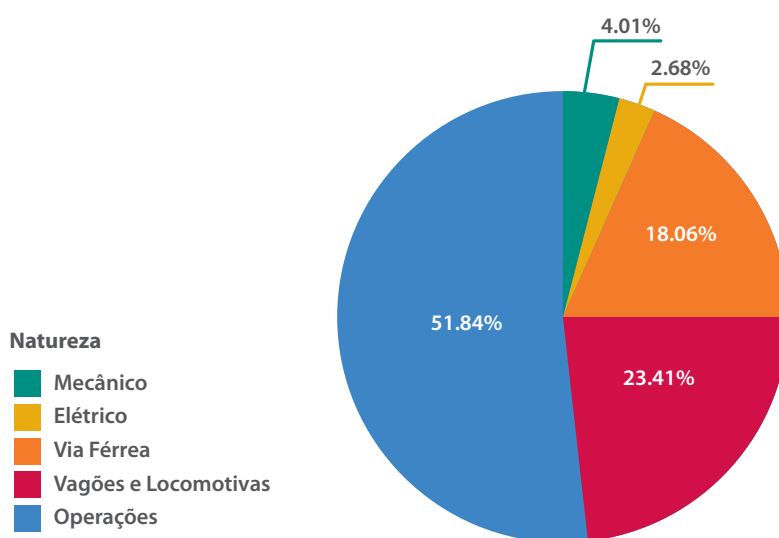


Figura 110: Distribuição de tipos de incidentes na EFC no período de 2016 e 2017. Cinco tipos de incidentes estão relacionados no gráfico.

Municípios

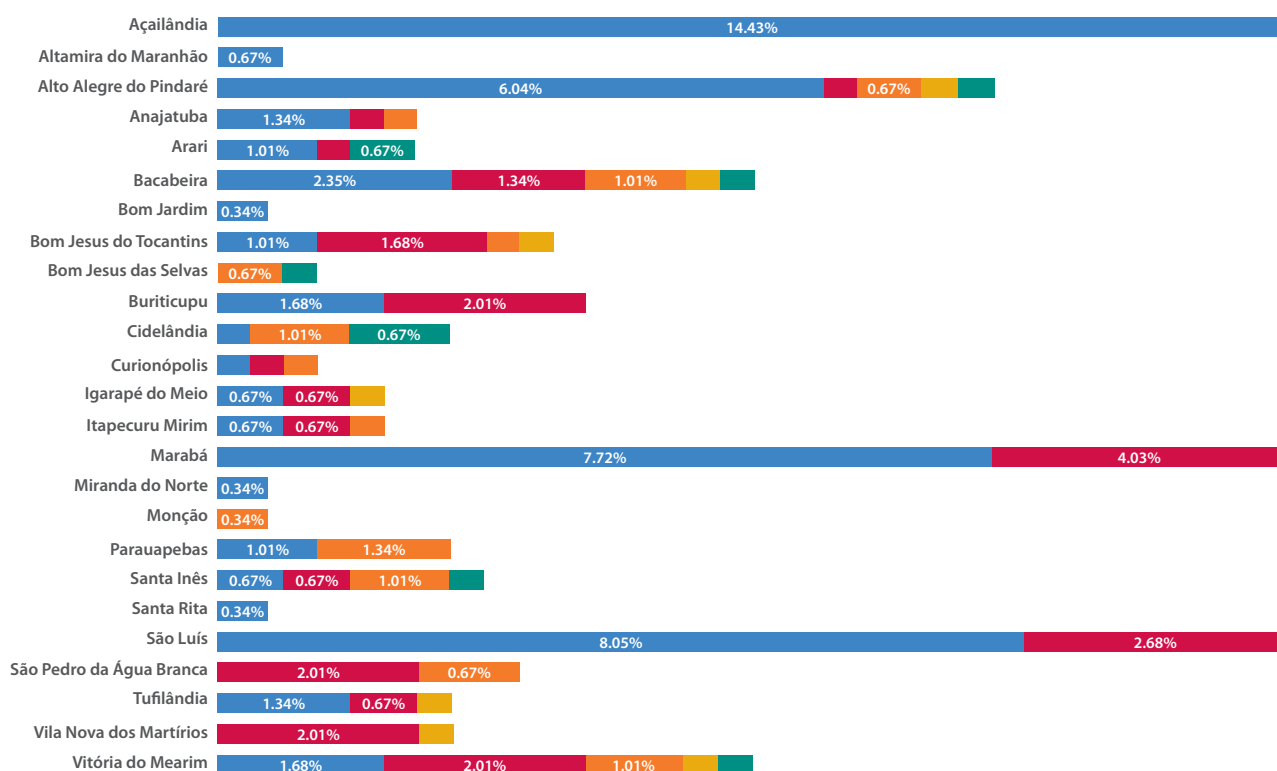


Figura 111: Distribuição dos incidentes ilustrados na Figura 109 por municípios em que ocorreram e suas respectivas proporções. As cores seguem a legenda da figura anterior.

A iniciativa não só agrupa tipos de incidentes, mas também trabalha e extrai conjuntos de informações que são frequentemente associados a condições de falhas ou incidentes operacionais, quantificando essas associações. As análises são realizadas com o uso do software **Knowledge Explorer & Visualization (KEV)**, capaz de executar uma análise exploratória de padrões de ocorrência de incidentes operacionais. Dessa forma, o software não apenas identifica situações propensas a falhas e incidentes, mas também permite à operação obter insights sobre situações que podem comprometer a segurança operacional, através de sofisticadas técnicas de visualização de informações (Figura 112).

Com uma interface totalmente interativa, o KEV possibilita, em um clique de mouse, que os usuários visualizem e naveguem, de forma exploratória, em conjuntos de

informações que são frequentemente associados a condições de falhas ou incidentes operacionais, auxiliando nas tomadas de decisões.

Na análise preditiva, eventos mais prováveis de ocorrer em um dado contexto podem ser identificados. Por exemplo, dado um conjunto de características sobre uma composição ferroviária, calcula-se o risco de ocorrência de incidentes, à medida que a composição trafega na ferrovia. A gestão e avaliação de riscos de incidentes nas operações da ferrovia podem ser feitas por essa ferramenta.

Os incidentes ilustrados são classificados pela área operacional e podem ter origem em componentes mecânicos, elétricos, em problemas na via férrea e em vagões e locomotivas.



Figura 112: Visualização de associações em falhas operacionais. As cores representam os diferentes tipos de incidentes operacionais. A intensidade das cores representa o valor quantitativo das associações.

O software para a visualização das análises apresenta o mapa da ferrovia, no caso a EFC, e um painel no lado esquerdo (Figura 113). Esse painel possibilita a inserção de várias informações sobre determinada composição (tipo local, comprimento etc.). Informações referentes a aspectos temporais, como o mês, o dia da semana e o turno, podem também ser analisadas e o risco determinado, assim como as informações sobre algum ponto da ferrovia, a exemplo

das passagens de nível. Inserindo as informações desejadas sobre a composição, o sistema computa os índices de risco à medida que a composição trafega na ferrovia e as cores associadas aos incidentes contemplados nesse estudo aparecem no mapa. O agrupamento das informações em um único painel e a correlação com o risco de incidentes permitem a realização de ações preventivas, resolutivas ou mitigatórias com maior nível de acerto.

ANÁLISE DE ÍNDICE DE RISCO

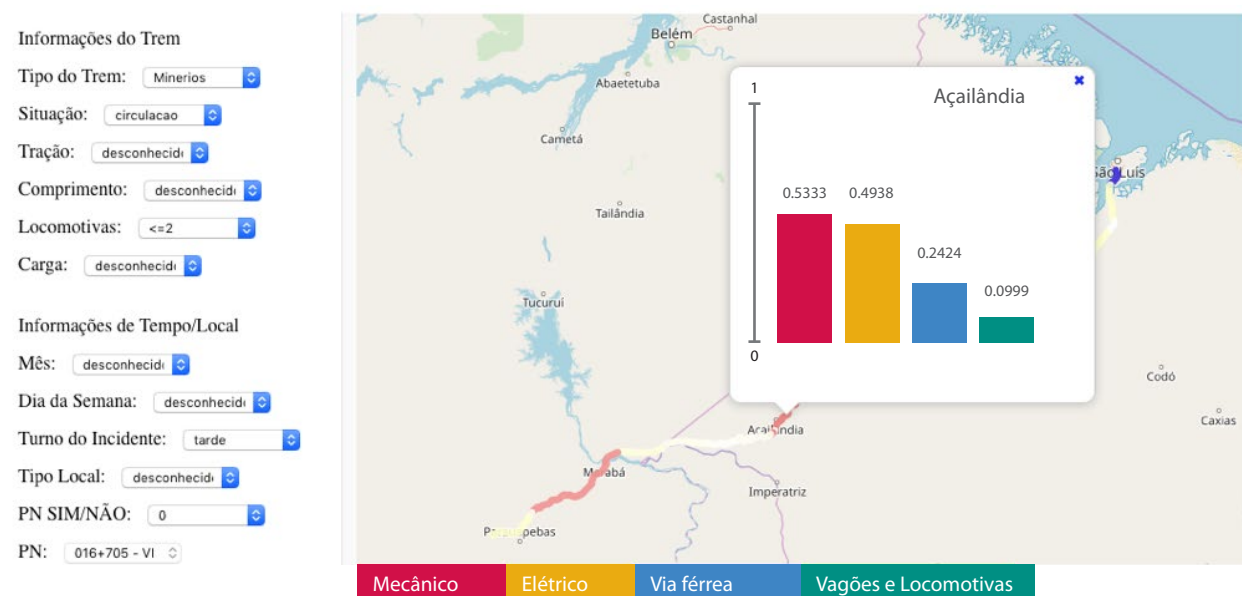


Figura 113: Resultado da análise do índice de risco de incidentes na EFC para uma composição, a exemplo de um trem de minério em circulação com até duas locomotivas, trafegando no turno da tarde. A Figura ilustra os índices de risco computados para o município de Açailândia, respectivamente para incidentes mecânicos (vermelho), de 0.53; elétricos, de 0.49; via permanente, de 0.24; e relacionados a vagões e locomotivas, de 0.09. Como o índice para incidentes em componentes mecânicos é o maior entre os quatro tipos medidos, a cor vermelha é destacada no traçado da ferrovia, no mapa.

Inspeção automática e manutenção preditiva de componentes de vagões

Um dos maiores desafios existentes no setor da mineração é o alto custo de manutenção de equipamentos usados na operação, como os do transporte de carga em vagões e navios. O desenvolvimento de modelos analíticos preditivos que diminuam a exposição do operador ao risco e com maior rapidez realizem a verificação dos equipamentos e componentes são importantes contribuições da pesquisa. Novas abordagens e ferramentas ajudam a diminuir custos, prevenir acidentes e reduzir o tempo de manutenção, impactando assim na produtividade de toda a cadeia.

O projeto realizado no ITV, em parceria com ISI/SENAI, desenvolveu modelos analíticos de dados e tecnologia computacional para a manutenção preditiva de componentes de vagões e locomotivas. São usados

nesse processo algoritmos de IA para a identificação automática de padrões normais, danificados e/ou defeituosos, com base em dados de imagens desses componentes. A tecnologia permite a maior regularidade nas análises, diminuindo a subjetividade da avaliação.

Um dos sistemas utiliza um conjunto de câmeras de alta velocidade e resolução, integrado a sensores, para capturar as imagens das rodas e vagões do trem (Figura 114). Um **software** baseado em algoritmos de processamento de imagens e visão computacional realiza as medições do perfil de rodas. Além da precisão no cálculo das medidas, o sistema é robusto para operar no ambiente das ferrovias. A operacionalização do sistema precisa ser validada junto com a operação.

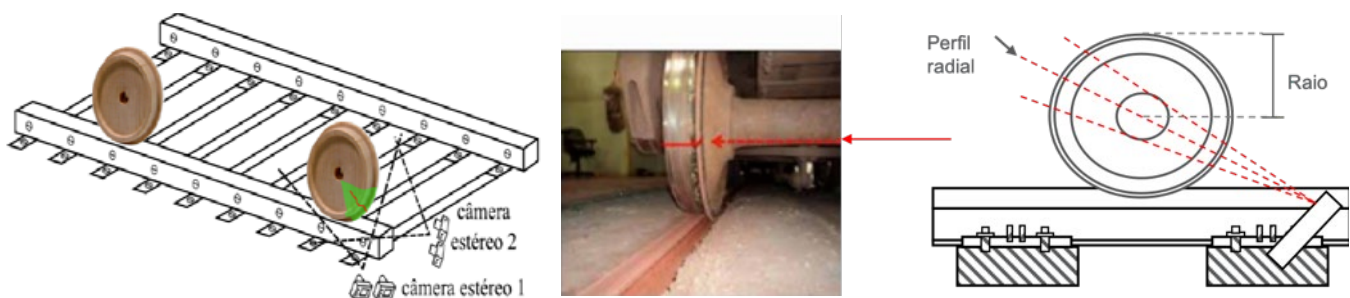


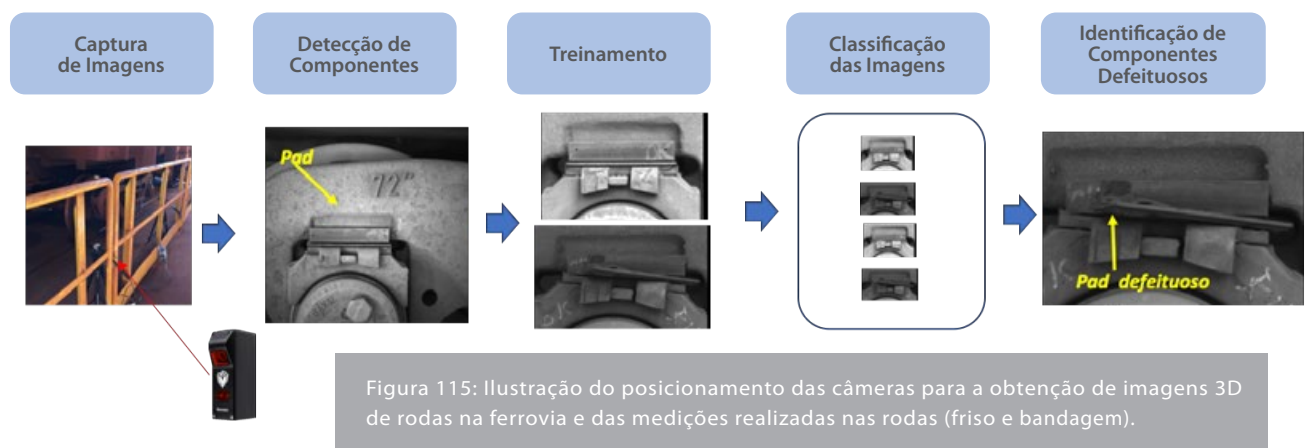
Figura 114: Ilustrações 1) do posicionamento das câmeras para a obtenção de imagens 3D; 2) rodas na ferrovia; e 3) das medições realizadas nas rodas (friso e bandagem).

A inspeção automática agrega conceitos de manufatura avançada para o aumento da produtividade e incremento da segurança.

A ferramenta desenvolvida para a medição de perfis de roda usa duas medidas para a avaliação de danos e imperfeições: (1) medidas de largura e altura do friso da roda, e (2) medida de comprimento da bandagem da roda (Figura 114). As medições indicam diferenças absolutas de medidas de perfis, com erros inferiores a 0.6 mm, quando comparadas com medidas realizadas pelo método atualmente empregado na empresa. O erro do sistema em uso atual é de 2 a 4 mm, conforme também informado pela empresa. Esses resultados mostram a robustez do sistema (algoritmo de captura, extração e análise de medidas), indicando o potencial de uso do sistema.

Outro desenvolvimento busca soluções para a manutenção preditiva de componentes de vagões. O sistema identifica automaticamente componentes defeituosos de vagões.

A Figura 115 ilustra o fluxograma de etapas para a inspeção de vagões, que compreende cinco fases. A solução compreende um sistema de visão computacional, com captura de imagens em alta resolução de vagões por câmeras industriais de alta velocidade. Essas imagens passam por um processamento para a identificação, classificação e verificação da ocorrência de defeitos nos componentes.



Três componentes serão inspecionados: pad, adaptador de roda e mola. Esses itens podem ser visualizados na Figura 116.

Testes já realizados em componentes de "pads" resultaram em uma acurácia igual ou maior a 89% na identificação de componentes defeituosos, indicando benefícios no uso da ferramenta desenvolvida para o cotidiano da operação. Esse foi um dos projetos do ITV que gerou patente e interesse da indústria. A inspeção automática agrega conceitos de manufatura avançada para o aumento da produtividade, incremento da segurança e para a estruturação eficaz das cadeias produtivas de transporte ferroviário de cargas.

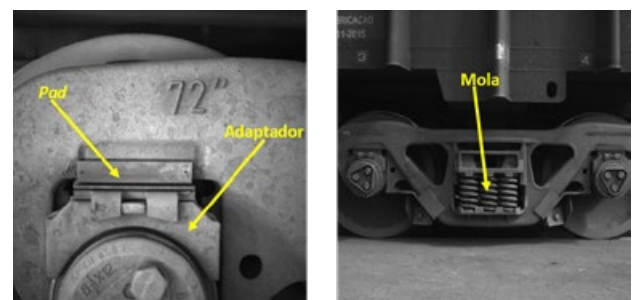


Figura 116: Componentes de vagões a serem inspecionados.

Neurotecnologias a serviço da mineração

Na indústria de mineração, a segurança do operador e a produtividade humana são essenciais para se atingir níveis elevados de qualidade e sustentabilidade operacionais. Fatores como preparação técnica através de rotinas de treinamento em simuladores de realidade virtual e o condicionamento mental, podem contribuir positivamente para se atingirem níveis elevados de produção, respeitando a saúde mental do trabalhador. A operação de uma escavadeira, ilustrada na Figura 117, pode ser simplificada em ciclos de operação. O ciclo pode ser dividido nas etapas de escavação do minério e sua deposição num equipamento chamado britador. A duração de um ciclo adequado para uma produção ótima deve ocorrer em 42s, mas é possível que esse ciclo seja reduzido para 37s. A redução de 1s no tempo de ciclo pode gerar um ganho anual de 4 milhões de toneladas de ferro. De modo a preparar a nova geração de operadores de escavadeira, o projeto visa treinar a cognição de operadores do Complexo Eliezer Batista mina S11D para que os mesmos possam atender aos níveis de exigência da indústria moderna da mineração sem que sua saúde mental seja comprometida.



Figura 117: Operação de uma escavadeira no Complexo Eliezer Batista na mina S11D.

Inicialmente procuramos identificar quais são os padrões neurais associados a uma produção de alto desempenho. Para isso são registrados dados neurais em sinais de eletroencefalografia (EEG) durante sessões de treinamento operacional em simulador de realidade virtual, como mostrado na Figura 118. De posse dos dados EEG, utilizamos algoritmos de inteligência artificial, como redes neurais artificiais, e também técnicas avançadas de processamento de sinais biológicos visando entender como regiões cerebrais se comunicam e em quais faixas de frequência essa comunicação ocorre.



Figura 118: Treinamento de operadores de escavadeira do Complexo Eliezer Batista na mina S11D em simulador de realidade virtual.

Essas análises fornecem um conjunto de medidas de conectividade cerebral que podem ser visualizadas em um mapa de cores mostrado na Figura 119, representando a sincronia na comunicação neural entre regiões corticais durante a operação.

Foram analisados os dados cognitivos de 25 operadores de escavadeira da mina S11D, que estão desenvolvendo suas atividades de mineração. Os quais foram divididos em três grupos de acordo com os seus níveis de produção.

Na Figura 119 observa-se uma intensidade neural reduzida na comunicação cortical para indivíduos com maior produtividade. Uma conectividade reduzida sugere um menor esforço cerebral levando o operador a realizar a tarefa com mais precisão. Isto sugere que operadores de alto desempenho realizam os ciclos de forma mais automática quando comparados a operadores com níveis de produção menores.

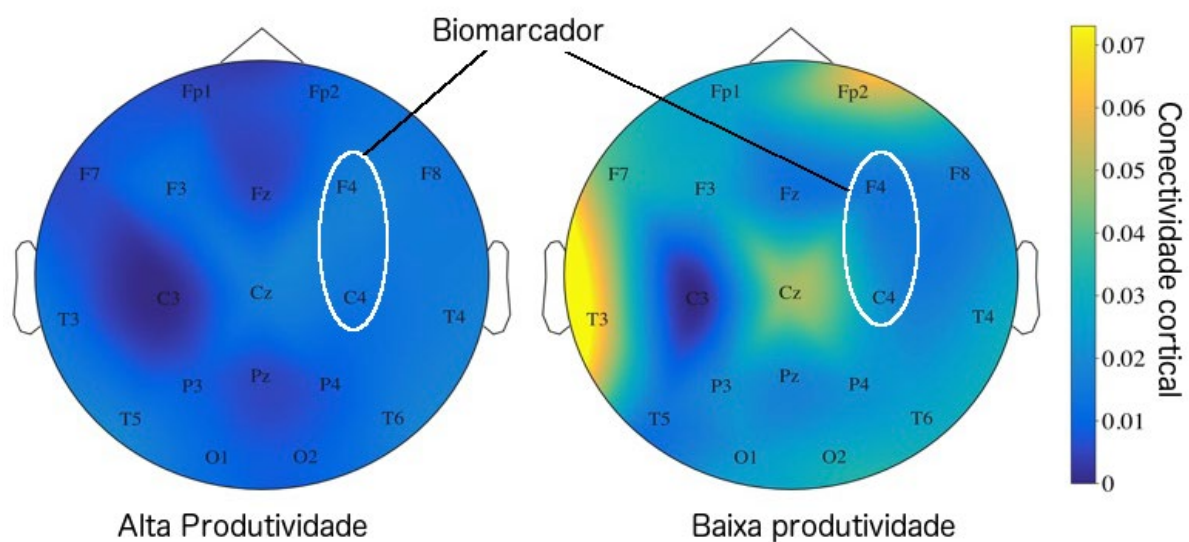


Figura 119: Medidas de conectividade cerebral representando a sincronia na comunicação neural entre regiões corticais durante a operação de escavadeira. A figura da esquerda mostra uma comunicação mais homogênea sugerindo uma destreza maior na operação da escavadeira. A figura da direita mostra valores de conectividade mais elevados em diferentes regiões, sugerindo que esse grupo de operadores ainda precisa de mais tempo de treinamento para aprimorar o controle da escavadeira.

A Figura 120 mostra o biomarcador neural associado à produtividade para essa amostra de estudo. Os 3 grupos foram divididos usando um algoritmo de cauterização (k-médias, com $k=3$), que teve como entrada 7 indicadores de desempenho fornecidos pelo simulador. Observa-se que os operadores com maior produção apresentam menor conectividade cortical. Valores negativos de Δ indicam que o operador excedeu a meta de 9.000 ton/hora (t/h), ou seja, ele produziu mais do que o esperado, enquanto que valores positivos indicam menor produção.

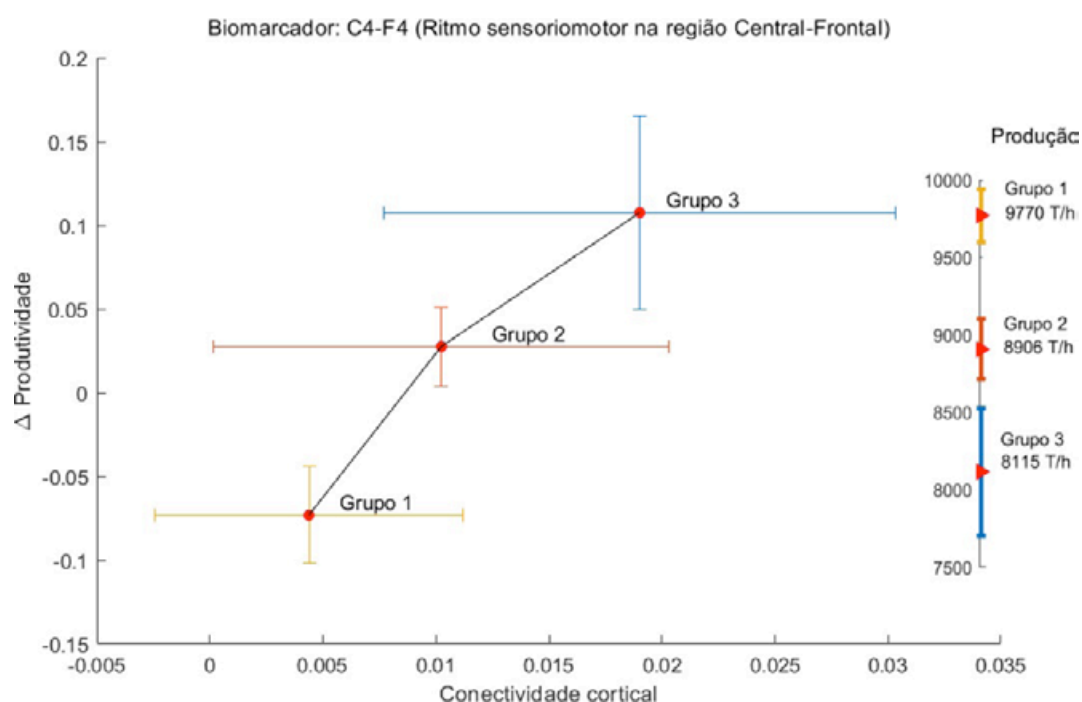


Figura 120: Biomarcador neural de produtividade. Na Figura, $\Delta = (PA - PR)$, PA é a produtividade planejada e PR a produtividade realizada. O gráfico produção (lado direito da figura) deve ser avaliado pela cor correspondente ao grupo.

Agradecimentos

A todos os pesquisadores, gestores, parceiros e colaboradores que contribuíram para a criação e implementação do ITV, sem os quais não teríamos alcançado os resultados aqui apresentados, nosso especial agradecimento.



Informações Gerais

A sede do Instituto Tecnológico Vale, no Pará, fica em Belém na Rua Boaventura da Silva, 955. Nazaré

Telefone de contato
(91) 3213-5400

Saiba mais em
www.itv.org

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

