

Programa C.5: Elaboração de Estudos de Avaliação dos Efeitos da Implantação de Empreendimentos Hidrelétricos na Região Hidrográfica do Rio Paraguai

Meta C.5.2: Elaborar estudos de qualidade de água e hidrossedimentologia da RH-Paraguai, de modo a avaliar alterações que as unidades de geração hidrelétrica possam causar nas condições ecológicas na planície do Pantanal

Relatório de Andamento 05: Qualidade da Água e Hidrossedimentologia

Brasília - DF

Dezembro/2019



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

C.5 Elaboração de Estudos de Avaliação dos Efeitos da Implantação de Empreendimentos Hidrelétricos na Região Hidrográfica do Rio Paraguai

**Meta C.5.2: Elaborar estudos de qualidade de água e
hidrossedimentologia da RH-Paraguai, de modo a avaliar alterações
que as unidades de geração hidrelétrica possam causar nas condições
ecológicas na planície do Pantanal**

Relatório de Andamento 05: Qualidade da Água e Hidrossedimentologia

Brasília - DF

Dezembro/2019



COORDENAÇÃO E ELABORAÇÃO

Agência Nacional de Águas

Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR)

Coordenação Geral

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Flávio Hadler Tröger

Coordenação Executiva

Luciana Aparecida Zago de Andrade

Márcio de Araújo Silva

Gaetan Serge Jean Dubois

Coordenação Temática

Alexandre Abdalla Araújo (**Meta C.5.1 - Elaborar estudos hidrológicos**)

Bolivar Antunes Matos (**Meta C.5.1 - Elaborar estudos hidrológicos**)

Marcelo Luiz de Souza (**Meta C.5.2 - Elaborar estudos de qualidade da água**)

Márcio de Araújo Silva (**Meta C.5.3 - Elaborar estudos de ictiofauna, ictioplâncton e pesca**)

Mariane Moreira Ravello (**Meta C.5.5 - Elaborar análise integrada multicritério**)

Thiago Henriques Fontenelle (**Meta C.5.4- Elaborar estudos socioeconômicos e de energia**)

Fundação Eliseu Alves

Coordenação Temática

Carlos Padovani – Embrapa Pantanal e Walter Collischonn (**Meta C.5.1 - Elaborar estudos hidrológicos**) e (**Meta**

C.5.5 - Elaborar análise integrada multicritério)

Marcia Divina – Embrapa Pantanal (**Meta C.5.2 - Elaborar estudos de qualidade da água**)

Agostinho Catella – Embrapa Pantanal (**Meta C.5.3 - Elaborar estudos de ictiofauna, ictioplâncton e pesca**)

Maurício Amazonas – CDUS/UnB (**Meta C.5.4- Elaborar estudos socioeconômicos e de energia**)

Coordenação Técnica e Equipe Técnica (Meta C.5.2 - Elaborar estudos de qualidade da água)

Dra. Márcia Divina de Oliveira – Bióloga, Qualidade de água, Pesquisadora Embrapa Pantanal

E-mail: marcia.divina@embrapa.br

Dr. Ibraim Fantin da Cruz- Biólogo, Hidrossedimentologia, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) e do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PPGRH). E-mail: ibraimfantin@gmail.com

Peter Zeilhofer – Geógrafo - Qualidade de Água, PPGGeo e PPGRH, UFMT

Rafael Mingoti – Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rubia Fantin da Cruz, Bióloga, qualidade de água, UFMT

Stephen K. Hamilton, Biólogo, Biogeoquímica, Michigan State University, USA

Daniela Maimoni de Figueiredo, Bióloga, Qualidade de água, PPGRH-UFMT

Eliana Freire Gaspar de Carvalho Dores, Química, Qualidade da Água, PPGRH-UFMT

Olavo Pedrollo, Engenheiro Civil, Modelagem Qualidade de Água, IPH/UFRGS.

Juliana Andrade Campos, Doutoranda em Recursos Hídricos, PPGRHSA-IPH.

Marcelo Luiz de Souza, Coordenação de Qualidade de Água e Enquadramento, Agência Nacional de Águas

Marcel Medinas de Campos, Mestrando em Recursos Hídricos, UFMT

Wilkinson Lopez Lázaro, Biólogo, Qualidade de água, UNEMAT

Vander Kaufman, Hidrólogo, Hidrossedimentologia, NaturWelt Serviços Ambientais

Pierre Girard, Geólogo, Hidrossedimentologia, PPGRH-UFMT

Cristóvão Scapulatempo, Engenheiro Civil, Modelagem da qualidade da água, UFPR

Carlos Roberto Padovani, Biólogo, sensoriamento remoto, Embrapa Pantanal

Eduardo Morgan Uliana, Engenheiro Ambiental, Hidrologia, PPGRH-UFMT

Valdeci Antônio de Oliveira, Hidrossedimentologia, Mega Consultoria Ambiental.

Lucas Olegário Bueno, Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT

Patricia D'Angol, Engenheira Ambiental, Hidrossedimentologia, Mestranda Engenharia Ambiental, UFSC.

Dempsey Threyce Alves de Arruda e Silva, Mestrando em Recursos Hídricos, UFMT

Juliane Stella Martins Costa de Figueiredo, Mestranda em Recursos Hídricos, UFMT

Jaqueline Kaiser, Engenheira Sanitarista e Ambiental, Mestranda em Recursos Hídricos, UFMT

Tainá Labrea, Geógrafo, UnB

Lumena de Lima Jaques, Graduanda em Engenharia Química, UnB

Isabelly Cristina Araújo, Engenheira Ambiental, bolsista AT-CNPQ.
 Josias de Campos Oliveira, Biólogo, Embrapa Pantanal
 Hernandes Monteiro, Embrapa Pantanal
 Antônio Arantes, Biólogo, Embrapa Pantanal
 Caroline Alvez Dávalos dos Santos, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Edmar Marques Santos, Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Nilmara Reis Sales de Oliveira, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Letícia de Souza Ribeiro, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Geovanna Mikaelle Santos Silva, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Jéssica Nicolau Vieira, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Rafael Luis Menezes Tomborelli, Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Danielly Gomes dos Santos Sobrinho, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Larissa da Silva Mattos, Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMT
 Adriano Dias Amaro, Graduando em Ciências Biológicas, UFMT

Grupo de Acompanhamento do Plano da RH Paraguai - GAP

Segmento	Setor	Instituições	Nº	Indicações (Titular e Suplente)
Poder Público	Federal	Agência Nacional de Águas	1	Titular: Luciana Aparecida Zago de Andrade
				Suplente: Rosana Mendes Evangelista
		Ministério do Meio Ambiente	2	Titular: Leonardo Rodrigues Klosovski
				Suplente: a designar
		Ministério de Minas e Energia	3	Titular: Adriano Jerônimo da Silva
				Suplente: Marlian Leão de Oliveira
		Ministério dos Transportes	4	Titular: Deodoro Barbosa Rezende
				Suplente: Marcos de Souza Martins
		Ministério da Integração	5	Titular: Marlian Leão de Oliveira
				Suplente: Roberto Anselmo Rubert
		Fundação Nacional do Índio	6	Regina Nascimento Ferreira
		Embrapa Pantanal	7	Márcia Divina de Oliveira
Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar - SEMAGRO	8	Leonardo Sampaio Costa		
Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural	9	Carlos Henrique Lemos Lopes		
Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão do Mato Grosso Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar -	10	Titular: Luiz Henrique Magalhães Noquelli		
		Titular: Nédio Carlos Pinheiro		

		Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural	11	Juraci de Ozêda Ala Filho
Poder Público	Municipal	Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Sustentável da Bacia Hidrográfica do Taquari	12	Titular: Nilo Peçanha Coelho Filho
		Consórcio Nascentes do Pantanal		Suplente: Dariu Antonio Carniel
Usuários	Abastecimento/ Saneamento	Empresa de Saneamento do Estado de Mato Grosso do Sul - SANESUL	13	Dulcélya Monica de Queiroz Sousa
		Águas Cuiabá	14	Titular: Luciana Nascimento Silva Suplente: Édio Ferraz Ribeiro
	Irrigação/ Agropecuária	Federação da Agricultura e Pecuária do Mato Grosso - FAMATO	15	Titular: Lucélia Denise Perin Avi Suplente: Laura Garcia Venturi Rutz
		Federação da Agricultura e Pecuária do Mato Grosso do Sul - FAMASUL		16
		Federação dos Trabalhadores na Agricultura no Estado de Mato Grosso do Sul - FETAGRI	17	Titular: Valdinir Nobre de Oliveira Suplente: Orlando Luiz Nicolotti
	Pesca, Turismo e Lazer	Associação dos Atrativos Turísticos de Bonito e Região - ATRATUR	18	Eduardo Folley Coelho
		Sindicato dos Guias de Turismo de Mato Grosso - SINGTUR	19	Waldir Teles de Ávila
		Cooperativa de Pescadores e Aquicultores do Mato Grosso – COOPEAMAT	20	Titular: Claudionor Angeli Suplente: Pedro Jovem dos Santos Júnior
	Indústria	Federação das Indústrias do Estado de Mato Grosso do Sul		21
		Federação das Indústrias do Estado de Mato Grosso	22	Titular: Monicke Sant´anna Pinto de Arruda Suplente: Álvaro Fernando Cícero Leite
	Hidroeletricidade	Associação Brasileira das Empresas Geradoras de Energia Elétrica – Abragel	23	Titular: Maria Aparecida Borges P.Vargas Suplente: Delfim José Leite Rocha
Hidroviário	Confederação Nacional do Transporte	24	Titular: Paulo Delmar Leismann	

Sociedade Civil		SOS Pantanal	25	Felipe Augusto Dias
				Breno Ferreira Melo (WWF)
	Organizações Não Governamentais	Associação Brasileira de Engenheiros	26	Suzan Lannes de Andrade
				Fórum Nacional da Sociedade Civil nos Comitês de Bacias Hidrográficas - FONASC / Fundação Neotrópica do Brasil
	Suplente: Reinaldo Lourival (Neotrópica)			
	Organizações Técnicas de Ensino e Pesquisa	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul	28	Synara Aparecida Broch
				Universidade Federal de Mato Grosso
	Organizações Indígenas	Povos Indígenas da BAP	30	
				Suplente: Valdinez Gabriel

Sumário

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	14
1. Apresentação.....	16
2. Introdução	175
2.1. Caracterização da Região Hidrográfica do Paraguai.....	186
2.2. Usos da água.....	18
3. Justificativa, objetivos e escopo	23
3.1. Justificativa	23
3.2. Objetivos.....	284
3.3. Escopo.....	284
4. Metodologia	305
4.1. Concentração, cargas e da taxa de variação de sedimentos, carbono, nutrientes e solutos dissolvidos nos rios com EHS em operação e previstos	25
Obtenção, seleção e análise dos dados secundários: qualidade da água e vazão	26
Obtenção e análise dos dados primários.....	27
Amostragem de alta frequência	31
4.2. Modelagem da qualidade de água e do transporte de sedimentos e nutrientes para previsão dos efeitos de novos EHS na RHP	41
Modelo de redes neurais: conceito, treinamento e verificação	41
Aplicação das RNAs na RH Paraguai	37
Desenvolvimento do modelo RNA para estimativa da taxa de variação nos EHS previstos	37
Produção de sedimentos e nutrientes na bacia de drenagem a montante dos EHS em operação e previstos	39
Dados dos empreendimentos em operação	42
Estatística descritiva dos dados.....	43
Modelos testados, variáveis de entrada e estatísticas.....	48
5. Resultados	52
5.1. Transporte de sedimentos, carbono, nutrientes (suspensos e do leito) e solutos dissolvidos nos rios da RHP, com empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos.....	53
Vazão	53
Condutividade elétrica	55
Sedimentos em suspensão (SS) e no leito (SL)	56
Turbidez.....	58
Carbono orgânico particulado (COP) em suspensão e carbono total (CT) no leito.....	59
Fósforo total (PT) transportado em suspensão e no leito.....	61

Formas de Nitrogênio (NT e ND)	62
Solutos dissolvidos.....	64
5.2. Impactos dos barramentos no transporte de materiais nos rios da RHP	65
Taxas de variação	65
Classificação das alterações.....	75
5.3. Evolução do assoreamento em reservatórios hidrelétricos da RHP	80
Avaliação do efeito do descarregador de fundo e da posição da tomada d'água na sedimentação.....	89
5.4. Variações de curto prazo na hidrologia e da qualidade da água em EHs em operação: estudo de caso no Ribeirão Ponte de Pedra.....	93
Vazão	93
Temperatura da água	93
Nitrato	95
DQO-Demanda Química de Oxigênio	97
Variações de vazão e da qualidade da água durante as manobras das PCHs	99
5.5. Previsão de alteração no transporte dos rios com empreendimentos hidrelétricos: modelagem de rede neural.....	101
Cenários atual e futuro para a taxa de retenção de sedimento, fósforo total e nitrogênio total em suspensão: análise por exutórios dos principais rios ou sub-bacias	113
6. Análise por sub-bacia.....	105
Região do Alto Paraguai	105
Região do rio Cuiabá.....	109
Região do rio São Lourenço	1210
Região do Piquiri.....	12410
Região do Taquari.....	126
7. Considerações e recomendações	118
8. Referências	133
ANEXO I.....	1375

Lista de Figuras

Figura 1. Região Hidrográfica do Paraguai com os principais corpos hídricos e unidades hidrográficas de planejamento.	19
Figura 2. Mapa dos EHs em diferentes estágios de implementação na RHP.	19
Figura 3. Localização dos pontos de amostragem de dados primários e secundários.	25
Figura 4. Fotos ilustrativas do equipamento utilizado na medição da vazão, ADCP modelo RiverSurveyor-M9, e do flutuador Hidroboard SonTek.	27
Figura 5. Amostradores de sedimento em suspensão.	28
Figura 6. Amostradores Helley-Smith (Fonte: Próprio autor)	28
Figura 7. Amostrador USBMH-60 (Fonte: Hidromechc.com.br).	28
Figura 8. Arranjo espacial das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis, estações de monitoramento de qualidade da REMAPP e estações fluviométricas.	32
Figura 9. Estação “Água 1” (A1), a montante da PCH Eng. José Gelázio da Rocha e a montante PCH Rondonópolis.	32
Figura 10. Estação “Água 2” (A2), a jusante da PCH Eng. José Gelázio da Rocha e a montante PCH Rondonópolis.	33
Figura 11. Estação “Água 3” (A3), a jusante da PCH Rondonópolis.	33
Figura 12. Bacia do Ribeirão Ponte de Pedra com as estações de monitoramento de qualidade de água da REMAPP-“Rede de monitoramento ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal” (A1-A3). Fonte: Oliveira (2016)	41
Figura 13. Representação de uma RNA feedforward com três camadas, comumente aplicados em modelos hidrológicos. Fonte: Campos (2019).	36
Figura 14. Tipos de solo da RHP, de acordo com o novo sistema brasileiro de classificação dos solos. Fonte: Campos (2019).	38
Figura 15. Uso e ocupação do solo na RHP. Fonte: Embrapa (2015)	39
Figura 16. Produção média anual de sedimentos (t/ha) na bacia de drenagem a montante dos empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos localizados na Região Hidrográfica do Paraguai.	40
Figura 17. Produção média de nitrogênio orgânico (kg NO/ha) produzido na bacia de drenagem a montante dos empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos na Região Hidrográfica do Paraguai.	41
Figura 18. Produção média de fósforo orgânico (kg PO/ha) produzido na bacia de drenagem a montante dos empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos na Região Hidrográfica do Paraguai.	42
Figura 19. Relação entre dados observados e calculados do Modelo de CSS – Taxa de alteração absoluta da concentração de sedimento em suspensão.	51
Figura 20. Relação entre dados observados e calculados do Modelo de N – Concentração do nitrogênio total de jusante.	51
Figura 21. C Relação entre dados observados e calculados do Modelo 02 – Taxa de alteração do fósforo total e jusante.	52
Figura 22. Vazão média de longo termo dos trechos de rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP. (Fonte: MGB-IPH Produto 10).	53

Figura 23. Mediana da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.....	55
Figura 24. Mediana das cargas de sedimento em suspensão (ton./dia) transportada pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	57
Figura 25. Mediana da carga de sedimentos (ton./dia) transportada no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	58
Figura 26. Medianas da turbidez (UNT) nos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.....	59
Figura 27. Mediana da carga de carbono orgânico particulado em suspensão (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	60
Figura 28. Mediana da carga de carbono total (kg/dia) transportado no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	60
Figura 29. Mediana da carga de fósforo total em suspensão (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	61
Figura 30. Mediana da carga de fósforo total (kg/dia) transportado no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	62
Figura 31. Mediana da carga de nitrogênio total em suspensão (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	63
Figura 32. Medianas da carga de nitrogênio dissolvido (kg/dia) transportada pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	63
Figura 33. Mediana da carga de nitrogênio total (kg/dia) transportado no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.	64
Figura 34. Mediana da carga de solutos dissolvidos (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na Região Hidrográfica do Paraguai.	65
Figura 35. Taxa de variação no transporte de sedimentos em suspensão e carga (valores no mapa).....	66
Figura 36. Taxa de variação no transporte de sedimentos do leito (%) e carga (valores no mapa).	67
Figura 37. Taxa de variação no transporte de COP em suspensão (%) e carga (valores no mapa).	68
Figura 38. Taxa de variação no transporte carbono total no leito (%) e carga (valores no mapa).	69
Figura 39. Taxa de variação no transporte fósforo total em suspensão (%) e carga (valores no mapa).	70
Figura 40. Taxa de variação no transporte fósforo total no leito (%) e carga (Taxa de variação no transporte fósforo total em suspensão (%) e carga (valores no mapa).	71
Figura 41. Taxa de variação no transporte nitrogênio total em suspensão (%), RH Paraguai.	72
Figura 42. Taxa de variação no transporte nitrogênio total no leito (%) e carga (valores no mapa).....	73
Figura 43. Taxa de variação do transporte de nitrogênio dissolvido, RH Paraguai.....	74
Figura 44. Taxa de variação no transporte de solutos dissolvidos (%) e carga (valores no mapa).	75
Figura 45. Imagens de satélite multitemporais da PCH São Lourenço mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	81
Figura 46. Imagens de satélite multitemporais da UHE Itiquira mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	82

Figura 47. Imagens de satélite multitemporais da UHE Jauru mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	83
Figura 48. Imagens de satélite multitemporais da UHE Juba II mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	84
Figura 49. Imagens de satélite multitemporais da PCH Sete Quedas Altas mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	85
Figura 50. Imagens de satélite multitemporais da UHE Ponte de Pedra, rio Correntes, mostrando a evolução do processo de assoreamento.	86
Figura 51. Imagens de satélite multitemporais da PCH Cambará mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	87
Figura 52. Imagens de satélite multitemporais da PCH Pequi mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	88
Figura 53. Imagens de satélite multitemporais da PCH Casca II mostrando a evolução do processo de assoreamento.....	89
Figura 54. Avaliação do efeito do descarregador de fundo sobre o transporte no leito de fósforo total (a), carbono total (b), nitrogênio total (c), sedimentos (d).	90
Figura 55. Vazão defluente, turbinada e vertida em resolução de 1h da PCH Eng. José Gelázio da Rocha disponíveis para o período da operação da REMAPP - “Rede de monitoramento ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal” (março 2018 a setembro 2019). Fonte: ENGIE.	93
Figura 56. Temperatura da água medida em frequência horária nas estações A1 (montante PCHs), A2 (jusante PCH Eng. José Gelázio) e A3 (jusante PCH Rondonópolis). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm).	94
Figura 57. Temperatura da água medida em frequência horária no Ribeirão Ponte de Pedra, no trecho sob influência das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis, entre 20/02-31/03/2019 (período chuvoso). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s).	95
Figura 58. Temperatura da água medida em frequência horária no Ribeirão Ponte de Pedra no trecho sob influência das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis entre 16/05-10/07/2019 (época de seca). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm).....	95
Figura 59. Concentração do nitrato da água medida em frequência horária nas estações A1 (montante PCHs), A2 (jusante PCH José Gelázio) e A3 (jusante PCH Rondonópolis). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm).	96
Figura 60. Concentração do nitrato da água medida em frequência horária no Ribeirão Ponte de Pedra no trecho sob influência das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis entre 11/12/2018-19/01/2019 (período chuvoso). No eixo secundário estão apresentadas a v vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm). ...	96
Figura 61. Concentração do nitrato da água medida em frequência horária no Ribeirão Ponte de Pedra no trecho sob influência das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis entre 16/05-10/07/2019 (época de seca). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm).	97
Figura 62. Concentração da Demanda Química de Oxigênio da água medida com frequência horária nas estações A1 (montante PCHs), A2 (jusante PCH José Gelázio) e A3 (jusante PCH Rondonópolis). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (mm).	98
Figura 63. Concentração da Demanda Química de Oxigênio da água medida com frequência horária no Ribeirão Ponte de Pedra no trecho sob influência das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis entre 11/12/2018-19/01/2019 (período chuvoso). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm).	98

Figura 64. Concentração da Demanda Química de Oxigênio da água medida com frequência horária no Ribeirão Ponte de Pedra no trecho sob influência das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis entre 16/05-10/07/2019 (época de seca). No eixo secundário estão apresentadas a vazão (Q m ³ /s) e a precipitação (P mm).	99
Figura 65. Efeitos de manobras de operação das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis sobre o nitrato (NO ₃), DQO e temperatura da água do Ribeirão Ponte de Pedra (13/03/2019). Linhas que representam variáveis de qualidade de água tratadas com alisamento para facilitar a interpretação. Estações A1 e A3; Vazão (Q m ³ /s) e precipitação (P mm).	100
Figura 66. Taxa de variação prevista para o sedimento em suspensão em (%) entre montante e jusante dos empreendimentos hidrelétricos previstos na RHP.....	101
Figura 67. Taxa de variação prevista para o transporte de fósforo total em suspensão em (%) entre montante e jusante dos empreendimentos hidrelétricos previstos na RHP.	112
Figura 68. Taxa de variação prevista para o transporte de nitrogênio total em suspensão em (%) entre montante e jusante dos empreendimentos hidrelétricos previstos na RHP.	113
Figura 69. Potencial de alteração nos trechos com empreendimentos hidrelétricos estudados.....	117

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características básicas dos empreendimentos hidrelétricos (EHs) em operação na RH Paraguai..	20
Tabela 2. EHs utilizados na modelagem das taxas de alteração de parâmetros da qualidade da água e hidrossedimentológicos.	43
Tabela 3. Estatísticas descritivas das variáveis de caracterização dos empreendimentos.	44
Tabela 4. Estatísticas descritivas das 11 classes de tipo de solo nas áreas de drenagem dos EHs.	45
Tabela 5. Estatísticas descritivas de uso da terra presentes nas áreas de drenagem dos EHs.	45
Tabela 6. Estatísticas descritivas dos parâmetros de montante e jusante.	46
Tabela 7. Correlações de Pearson entre as variáveis de entrada e os parâmetros de Jusante.	47
Tabela 8. Separação de amostras para treinamento, validação e verificação do modelo de Redes Neurais.	48
Tabela 9. Desempenho dos modelos de estimativa da alteração da carga de sedimentos em suspensão (mg/L) nos empreendimentos hidrelétricos previstos da RH Paraguai (M=modelos).	50
Tabela 10. Vazão média de longo termo nos trechos de rios com empreendimentos hidrelétricos em operação (Fonte: Empreendedores).	54
Tabela 11. Critérios para quantificação das taxas de alteração por parâmetro, em porcentagem.....	76
Tabela 12. Quantificação das taxas de variação (TX em %) das cargas em suspensão (SS, NT, ND, PT e SD) e do leito (SS, NT, PT e CT), por parâmetro, nos empreendimentos hidrelétricos (EH) em operação na RHP. Sedimento em suspensão= SS, nitrogênio total= NT, fósforo total= PT, carbono orgânico particulado= COP, carbono total= CT e solutos dissolvidos= SD. O símbolo “seta” indica a direção da taxa de variação, para cima indica liberação (↑) e para baixo indica retenção (↓). A cor verde indica Baixa alteração, amarelo Média e vermelho Alta alteração.	77
Tabela 13. Empreendimentos com altas taxas de variação nas cargas de sedimento (SS), nitrogênio total (NT), fósforo total (PT) e carbono orgânico particulado em suspensão (COP) e carbono total do leito (COP e CT)....	79
Tabela 14. Avaliação do efeito da posição vertical da tomada d'água na variação do transporte em suspensão para jusante do reservatório.	91
Tabela 15. Taxa de alteração percentual entre o cenário atual e o cenário futuro para rios em sub-bacias com EHs previstos.	104

1. Apresentação

Este documento refere-se ao relatório final do tema Qualidade de Água e Hidrossedimentologia do projeto “Elaboração de Estudos de Avaliação dos Efeitos da Implantação de Empreendimentos Hidrelétricos na Região Hidrográfica do Rio Paraguai e para Suporte à Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da RHP”, em atendimento ao Contrato 062/2016 firmado em 21 de novembro de 2016 entre a Agência Nacional de Águas e a Fundação Eliseu Alves.

O tema da Qualidade de Água e Hidrossedimentologia é uma das frentes de investigação sobre impactos potenciais dos empreendimentos hidrelétricos (EHs) na Região Hidrográfica do Paraguai (RHP), com vistas a subsidiar a tomada de decisões no que se refere à emissão de outorgas para este uso sem prejuízos aos outros diversos usos da água na região.

O presente relatório reúne os principais resultados e conclusões resultantes da pesquisa, que envolveu a coleta em campo de dados primários e a aquisição e organização de dados secundários de qualidade de água e hidrossedimentologia para a utilização em estimativas e modelos hidrológicos desenvolvidos com o intuito de prever as consequências da implantação dos EHs sobre os demais usos da água na bacia, sobretudo as atividades relacionadas com a pesca.

O relatório está organizado em uma introdução contendo uma caracterização da bacia e a contextualização da pesquisa, uma descrição dos métodos utilizados para a coleta e análise de dados, resultados obtidos a partir das análises e a síntese das principais conclusões sobre o objeto de estudo.

Tomando como base as alterações na qualidade de água verificadas nos EHs que já operam na RHP, o estudo busca compreender os potenciais impactos dos empreendimentos cuja instalação está prevista, considerando suas especificidades e as características dos rios afetados.

Os resultados e conclusões obtidos a partir deste estudo serão incorporados a uma análise integrada mais abrangente, que considerará também resultados de outras áreas temáticas, tais como a Hidrologia, Ictiologia, Socioeconomia e Energia. A integração dos resultados de todas as áreas de temáticas tem como objetivo subsidiar a emissão de outorgas do uso da água para a produção de energia, sem o comprometimento dos outros diversos usos na RHP.

2. Introdução

O barramento de rios por meio de estruturas hídras de engenharia tem gerado os mais diversos benefícios à sociedade. O armazenamento de água o abastecimento humano e produção de alimentos, o controle de enchentes, oportunidades de recreação e a geração de energia são importantes usos da água proporcionados pela construção das barragens em nossos rios.

No entanto, o barramento dos rios também produz alterações no funcionamento dos ecossistemas e comunidades de organismos aquáticos. A alteração do fluxo natural da água, assim como do transporte de nutrientes e sedimentos, além da geomorfologia dos rios e dos diversos corpos hídricos nas planícies (Bednarek, 2001). A perda da conectividade hidrológica é um impacto relatado por vários estudos sobre os impactos das represas no ambiente natural (BEDNAREK, 2001; POFF ET. AL, 1997; LIMBURG E WALDMAN, 2009; HALL ET AL., 2012; COONEY E KWAK, 2013).

Ecossistemas de água doce são moldados pela sua conectividade funcional e estrutural (Pringle, 2001; Wiens, 2002). A conectividade hidrológica destes ecossistemas pode ser caracterizada pela transferência, por meio da água, de materiais, organismos e energia dentro e entre elementos do ciclo hidrológico (Pringle, 2001). Ao nível da bacia hidrográfica, entre os aspectos ecossistêmicos mais afetados pela perda da conectividade hidrológica são reportadas interferências nos fluxo natural da água, bem como de nutrientes e sedimentos, no deslocamento longitudinal de organismos aquáticos, modificações nos canais dos rios e planícies de inundação e fragmentação dos cursos d'água (PETTS, 1984; CHISOLM, 1994; YEAGER, 1994; LIGON ET.AL., 1995, WARD E STANFORD 1995; STANFORD ET. AL., 1996, POFF ET. AL, 1997).

A Ictiofauna, incluindo recursos pesqueiros importantes, pode ser afetada diretamente pela barreira física das estruturas instaladas em sua rota migratória, ou indiretamente, pelas alterações na qualidade da água, perda de habitats naturais, introdução de espécies exóticas e ou queda na produtividade dos ecossistemas aquáticos em função da retenção de nutrientes nos barramentos.

Em termos de qualidade de água e o transporte de sedimentos ao longo da hidrografia, diversos estudos têm reportado que as perturbações mais comuns estão relacionadas com fluxo natural de materiais e constituintes importantes para a dinâmica das comunidades ecológicas e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos.

Este estudo busca avaliar os efeitos da implantação de empreendimentos hidrelétricos quanto a estas alterações na qualidade de água e na dinâmica hidrossedimentológica na Região Hidrográfica do Paraguai (RHP). Para tanto, o estudo é fundamentado na importância dos nutrientes nitrogênio e fósforo para a RHP e, sobretudo, para a planície do Pantanal.

Segundo Reynolds (2006), nitrogênio (N) e fósforo (P) são nutrientes limitantes ao crescimento da biomassa de autótrofos aquáticos, e por isso regulam a abundância desses organismos. O nitrogênio, especialmente, é considerado um nutriente limitante para a produtividade em ambientes da planície do Pantanal (LOVERDE E HUSZAR, 2007). Tão importante quanto a quantidade, a proporção entre o N e P é essencial na regulação da produtividade nos ecossistemas aquáticos (REDFIELD, 1958).

Outra questão fundamental ao estudo refere-se ao transporte de sedimentos em suspensão, elemento importante para a estruturação de algumas formas fluviais, como as planícies de inundação, onde seu acúmulo em áreas de várzea ocorre de forma vertical. Por sua vez, o transporte de sedimentos no leito é fundamental para a estruturação do canal fluvial (KONDOLF, 1995). Associados aos sedimentos encontram-se elementos adsorvidos importantes para o funcionamento dos ecossistemas aquáticos.

Portanto, alterações nestes elementos podem alterar a morfologia fluvial, a conectividade lateral e a troca de materiais entre o planalto e a planície, com consequências aos ecossistemas aquáticos. Estes efeitos podem ser percebidos melhor em médio e longo prazos (dependendo magnitude das alterações) e, mesmo reservatórios de pequeno porte, podem acarretar estas interferências, porque pode reter ou liberar esses nutrientes de forma desigual, causando desequilíbrio na sua proporção.

2.1. Caracterização da Região Hidrográfica do Paraguai

A Região Hidrográfica do Paraguai, objeto deste estudo, abrange uma área de cerca de 360.000 km² entre os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Seu principal rio, o Paraguai, tem suas nascentes no extremo norte da bacia, no limite com a RH-Amazônica, nas encostas do Planalto dos Parecis. A RHP pode ser dividida em planalto, que inclui as cabeceiras dos rios e altitudes que variam de 250 a 750 m, a depressão, com altitudes entre 180 e 250 m, e a planície do Pantanal, com altitudes de 150 a 180 m (ALVARENGA et al., 1984).

A drenagem da bacia é feita pelo rio Paraguai e pelos seus principais formadores, os rios Juru, Cabaçal, Sepotuba, Cuiabá, São Lourenço, Itiquira, Correntes, Piquiri, Taquari, Negro, Aquidauana, Miranda e Apa, sendo que apenas os rios Juru, Cabaçal, Sepotuba, Cuiabá, Taquari e Miranda são afluentes diretos do rio Paraguai. O rio Paraguai é o principal rio de um sistema deposicional caracterizado pela presença de megaleques construídos pelos tributários (ASSINE; SOARES, 2004; ZANI et al., 2009). Esses autores identificaram seis leques aluviais na bacia: rio Paraguai, abaixo da cidade de Cáceres formando o leque do Corixo Grande, e nos rios Cuiabá, São Lourenço, Taquari, Negro e Miranda. A Figura 1 apresenta os principais rios e as unidades hidrográficas de planejamento.

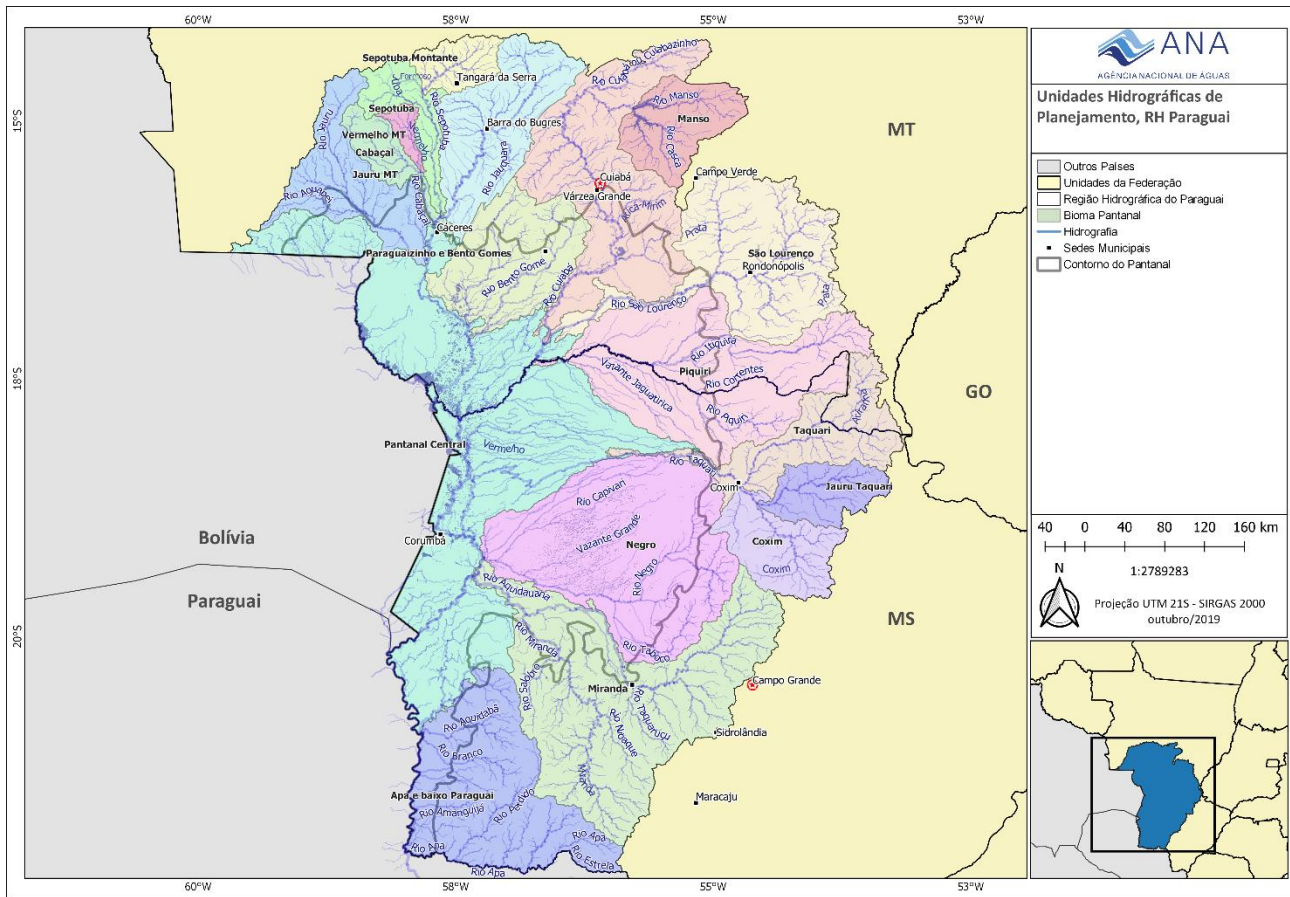


Figura 1. Região Hidrográfica do Paraguai com principais corpos hídricos e unidades hidrográficas de planejamento.

A precipitação média anual na RHP varia entre 800 e 2.000 mm, sendo os maiores valores observados nas áreas de planalto, mais especificamente no extremo norte da bacia. Apesar de chover menos na parte sul, a precipitação apresenta melhor distribuição ao longo do ano. O período chuvoso ocorre entre outubro e abril e a estiagem no restante dos meses. A evapotranspiração total anual média é de 1.239 mm, ocorrendo os maiores valores no mês de agosto, quando é registrada a maior insolação. Apesar das incertezas na estimativa da evapotranspiração, considera-se que há um equilíbrio no balanço de entrada de água por precipitação e perda de água evapotranspiração, podendo o balanço ser até negativo (HAMILTON et al., 1997; PENATTI et al., 2015). Além da variação anual, ocorrem períodos multianuais de seca e chuva na RHP, que afetam a planície de inundação.

Na estação seca, os rios do planalto são alimentados pelos aquíferos, que conferem águas diferenciadas entre norte e sul da bacia. No norte da bacia e no rio Cuiabá predominam afloramentos do aquífero Fraturado Centro-Sul e Ponta Grossa, na região do rio São Lourenço e Piquiri afloram principalmente os aquíferos Guarani e Bauru, este último com águas mais ácidas. O aquífero Guarani também aflora na região do Taquari até o Miranda, junto com o aquífero Bauru e Serra Geral, sendo que na região do rio Miranda, as águas possuem condutividade elétrica média de 165 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH próximo ao neutro. A diferença na qualidade das águas desses aquíferos é pequena, predominando águas bicarbonatadas sódicas, cálcicas, e águas um pouco mais concentradas em cálcio e magnésio no aquífero Serra Geral, na região do rio Miranda. Alguns aquíferos apresentam teores de ferro elevados, como o Fraturado Centro-Sul, cujas águas afloram nas regiões dos rios São Lourenço e Vermelho (REZENDE FILHO et al., 2012).

As regiões do Alto Paraguai e Taquari contribuem com o maior volume de água e com o maior transporte de sílica, nitrogênio total (NT), nitrogênio dissolvido (ND), fósforo total (PT) e carbono orgânico particulado (COP). Nas bacias dos rios Taquari e São Lourenço predomina o transporte de sólidos suspensos, COP e ferro total (OLIVEIRA et al., 2019). Na bacia do rio Miranda predomina o fluxo de sólidos dissolvidos e fósforo dissolvido. Individualmente, os rios Taquari, Cuiabá e Sepotuba são importantes no transporte de nitrogênio, tanto particulado como dissolvido; os rios Taquari e Miranda no transporte de fósforo; os rios Miranda, Cuiabá e Jauru no transporte de solutos dissolvidos e os rios Taquari e São Lourenço no transporte de sólidos suspensos e COP.

A região do Pantanal tem sido comparada com outras áreas úmidas tropicais com grandes planícies de inundação do mundo, como Orinoco, Okavango e Amazonas (JUNK et al., 2006), as quais têm sido estudadas quanto ao transporte de elementos entre áreas altas e baixas, e também os efeitos das planícies de inundação na biogeoquímica dos rios.

Oliveira et al. (2019) estimaram a transferência de materiais dissolvidos e particulados entre planalto e planície, a partir do transporte hídrico, e o balanço de massa anual destes na entrada (soma dos tributários) e saída (rio Paraguai, em Porto Esperança). Os autores estimaram o transporte de nitrogênio, fósforo e sólidos suspensos e suas perdas na planície de inundação do Pantanal.

A relação Previsto/Observado para as cargas anuais de solutos e nutrientes foi próxima a 1 (um), o que indica um balanço quase completo entre as cargas na entrada (tributários) e exutório do rio Paraguai, em Porto Esperança. Neste trabalho, foi observado um equilíbrio entre os processos biogeoquímicos de assimilação e liberação de solutos e nutrientes na planície (OLIVEIRA et al., 2019).

Os estudos na RHP têm indicado a influência das condições geoquímicas das áreas do planalto e depressões sobre a qualidade da água e o transporte de sedimentos e nutrientes e a importância das interações sinérgicas dos tributários com o rio Paraguai nos processos biogeoquímicos na planície de inundação.

Na área da RHP predominam as atividades de pecuária e agricultura. Em relação à conversão de áreas naturais para o uso antrópico, o uso para pastagem foi o principal uso da terra identificado, sendo 12% na planície e 44% no planalto (WWF, 2015). A retirada da vegetação nativa e a agricultura nas áreas de planalto têm aumentado a erosão e a entrada de sedimento para os leques aluviais, causando rápidas mudanças na paisagem, como ocorreu na área de drenagem do rio Taquari (ASSINE, 2005). Os usos da água ocorrem na atividade agropecuária para dessedentação animal, bem como na criação aves e suínos, bem como para irrigação, uso que vem crescendo nos últimos anos (ANA, 2017).

Foram estimados fluxos expressivos de sedimentos do planalto para o Pantanal, chegando a 29.000 ton./dia, com destaque às áreas de drenagem dos rios Taquari e São Lourenço (SEMMELMAN et al., 1996; BARBEDO, 2003). No Pantanal fica retida mais da metade do aporte de sólidos suspensos (BARBEDO, 2003) e carbono orgânico particulado que entra pelos tributários, sendo que boa parte desse material não alcança o rio Paraguai, ficando retido por sedimentação nas planícies de inundação dos rios Cuiabá, Taquari e Miranda (OLIVEIRA et al., 2019).

Os sedimentos transportados tendem a se acumular no início da área da planície de inundação, aumentando a sedimentação nessas áreas e contribuindo para a ampliação dos leques aluviais, evidenciado nitidamente em imagens de satélite (ASSINE; SOARES, 2004; ZANI et al., 2009). A bacia com maior sedimentação é a do rio Taquari, que forma um dos maiores leques aluviais do mundo.

Mudanças na direção do rio Taquari, devido à sedimentação e assoreamento, foram registradas por Padovani et al. (2005), que demonstraram uma retenção de sedimentos na planície de aproximadamente

77%. Outros rios como São Lourenço, Vermelho, Itiquira, Aquidauana e Miranda também apresentam sedimentação com mudanças na geomorfologia do Pantanal, porém ainda foram pouco estudados.

2.2. Usos da água

Cerca de 1,9 milhão de pessoas vivem na RHP, o que equivale a 1% da população do Brasil, sendo 84,7% em áreas urbanas, concentradas nas cidades de Cuiabá (483 mil habitantes), Várzea Grande, (215 mil habitantes) e Rondonópolis (150 mil habitantes), principais centros populacionais de Mato Grosso. Nestas áreas, os usos da água predominantes são o abastecimento público e diluição de efluentes domésticos.

O incremento de nutrientes e coliformes no rio Cuiabá, na zona urbana de Várzea Grande e Cuiabá, tem sido registrado por Zeilhofer et al. (2010) e Figueiredo et al. (2018), mas parte desse nutriente é transformado e absorvido pelo rio Cuiabá até a região de Porto Cercado (ZEILHOFER et. al., 2016).

Além dos usos relacionados com o abastecimento público e à diluição de esgotos, destacam-se também os usos no campo, principalmente a dessedentação animal na pecuária, bem como na criação de aves e suínos, a irrigação da monocultura de grãos, que vem crescendo nos últimos anos, além da piscicultura, indústria e geração de energia (ANA, 2017). Além disso, o hidroturismo é um uso da água importante, que tem como principal atrativo os cursos d'água na bacia onde há maior desnível com formação de corredeiras e cachoeiras, e nos corpos d'água do Pantanal, onde também é intenso o turismo de pesca.

O uso da água para a geração de energia elétrica na RHP, objeto deste estudo, também é expressivo e se encontra em expansão, com possibilidade de construção de novos EHs, cujo total pode chegar a 170 empreendimentos, sendo que até 2017 estavam em funcionamento 47 hidrelétricas (ANA, 2017), como mostra a Figura 2. A maioria destes empreendimentos são Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), caracterizadas por gerar até um limite de 30 MW.

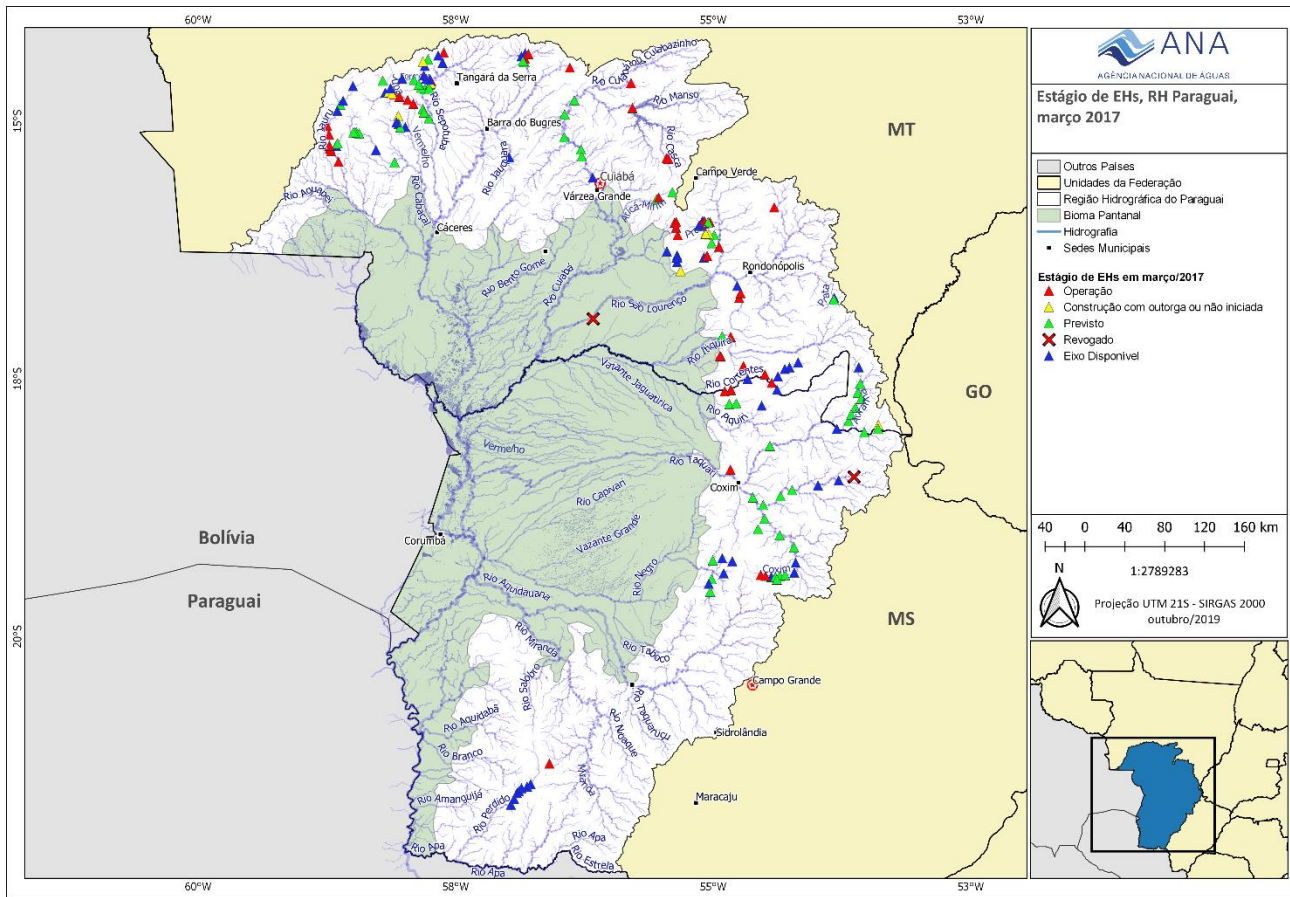


Figura 2. Mapa dos EHs em diferentes estágios de implementação na RHP.

Na Tabela 1 estão apresentadas as principais características de 36 EHs em operação na RHP, dos quais apenas quatro são usinas hidrelétricas-UHE (acima de 30 MW). Esses empreendimentos foram estudados quanto as alterações que provocam no transporte de materiais particulados e dissolvidos. Características importantes como volume, área inundada, e as estruturas de operação como desarenadores, posição da tomada d'água foram levadas em consideração nas análises das taxas de variação. A falta dessas informações é um limitante na modelagem de previsão de alteração para os futuros barramentos.

Estes EHs estão localizados nos principais tributários da RHP, como os rios Jauru, Correntes e Itiquira e afluentes menores, como rios Maracanã, Juba, Sapo, Santana, Aricá, Tenente Amaral, Ibó, Saia Branca, Ribeirão Ponte de Pedra, dentre outros.

Por outro lado, rios como o Sepotuba, Cabaçal, Cuiabá e Taquari encontram-se livres de barramentos hidrelétricos, embora muitos empreendimentos estão previstos nessas sub-bacias, os quais serão objeto de estudo dos modelos de previsão.

Tabela 1. Características básicas dos empreendimentos hidrelétricos (EHs) em operação na RH Paraguai

CARACTERÍSTICAS	Antônio Brennand ¹	Ombreiras ¹	Indiaváí ¹	Juba I ¹	Juba II ²	Graça Brennand ¹	Pampeana ¹	Sta. Gabriela ¹	Sete Quedas Alta ¹	São Lourenço ¹	Jauru ²	Pequi ¹
Nome do rio	Jauru	Jauru	Jauru	Juba	Juba	Juba	Juba	Correntes	Ibó	São Lourenço	Jauru	Saia Branca
Vazão média do rio MLT (m ³ /s)	46,50	60,00	70,10	55,20	61,25	77,90	80,00	54,20	12,20	108,00	85,47	10,22
Área de drenagem (km ²)	1590,0	2207,0	2320,0	1550,0	1808,0	1974,0	2057,0	3132,0	392,0	5775,0	2620,0	327,0
Área Alagada (km ²)	0,045	2,905	0,224	0,820	2,500	5,920	4,170	0,426	0,380	1290,000	2,620	0,020
NA máximo maximorum (m)	439,3	392,7	250,9	414,4	344,2	275,3	237,4	462,0	366,5	224,9	358,7	479,4
Volume total do reservatório (m ³)	420000	49360000	2050000	4700000	9400000	64400000	40300000	400000	1600000	100630000	20140000	39000
Volume útil do reservatório (m ³)	4000	-	-	16000000	1200000	-	-	-	-	7470000	12520	0
Altitude da crista da barragem (m)	440	395	252	416	345	276	238	464	368	227	360	478
Comprimento da barragem (m)	230	629	164	426	989	1380	563	165	519	312	570	75
Altura da barragem (m)	6	45	35	18	14	37	36	11	13	20	46	5
Queda líquida (m)	45	30	34	67	67	37	36	41	156	20	106	68
Número de turbinas	2	2	4	4	4	3	3	3	3	2	3	2
Potência de cada Turbina (kW)	10300	13500	7500	10700	10700	8750	9000	8500	7330	15000	40500	3125
Potência total (kW)	20600	26000	28000	42000	42000	27400	28000	24000	22000	29100	121500	6000
Número de comportas (de adução)	2	2	2	2	-	1	1	1	1	3	0	1
Comprimento do canal de adução (m)	300	0	150*	3280	2350	NA	NA	1183	3340	0	340	2240
Comprimento do trecho de vazão reduzida (m)	990*	0	0	3600	2410	0	1240	2200	-	0	950	2563
Vazão mínima do trecho de vazão reduzida (m ³ /s)	3	0	0	0	3	0	0	3	-	-	1	0
Número de comportas de descarga	2	2	2	-	-	3	2	1	1	2	0	0
Desarenador (SIM/NÃO)	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Descarregador de fundo (SIM/NÃO)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Posição da tomada d'água na barragem (Superficial/Profunda)	Superficial	Profunda	Superficial	Superficial	Superficial	Profunda	Profunda	Superficial	Superficial	Profunda	Superficial	Superficial
Tempo de Retenção Hidráulica (dias)	0,105	9,522	0,338	0,985	1,776	9,568	5,830	0,085	1,518	10,784	2,727	0,044
Data de Início da Operação	13/09/2002	23/07/2005	01/08/2003			28/06/2008	14/05/2009	18/09/2009	29/12/2010	28/04/2009	06/06/2003	05/12/2008

CARACTERÍSTICAS	Sucupira ¹	Cambará ¹	Embaúba ¹	Sen. Jonas Pinheiro ¹	Alto Paraguai ¹	Casca II ¹	Casca III ¹	Poxoréu ¹	Eng. José Gelázio ¹	Rondonópolis ¹	Ponte de Pedra ²
Nome do rio	Saia Branca	Ten. Amaral	Ten. Amaral	Caeté	Paraguai	Casca	Casca	Poxoréu	Ponte de Pedra	Ponte de Pedra	Correntes
Vazão média do rio MLT(m ³ /s)	11,02	9,97	10,02	0,78	7,10	8,30	8,50	8,80	26,90	28,62	80,70
Área de drenagem (km ²)	356,0	318,0	320,0	26,0	235,0	790,0	810,0	1340,0	1698,0	1767,0	4000,0
Área Alagada (km ²)	0,070	0,001	0,088	0,240	1,000		0,272	0,210	0,270	0,024	14,500
NA máximo maximorum (m)	409,0	454,0	408,8	542,7	111,5	497,4	410,4	332,8	366,7	301,0	397,5
Volume total do reservatório (m ³)	240000	39000	282000	5532000	1900		1240000	270000	2100000	146000	111000000
Volume útil do reservatório (m ³)	0	0	0	4504000	NA	NA	NA	NA	300000	72000	3500000
Altitude da crista da barragem (m)	404	454	410	16	112		413	334	368	302	399
Comprimento da barragem (m)	39	80	235	500	50	90	1070	240	286	60	1500
Altura da barragem (m)	2	1	9	17	3	3	38	15	3	4	35
Queda líquida (m)	45	43	53	300	57	59		8	67	61	243
Número de turbinas	2	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3
Potência de cada Turbina (kW)	2250	1406	1665	3,2	800/880	720/720/2080	4140	600	8	9	59
Potência total da PCH (kW)	4500	3590	4500	6,4	1680	3520	12420	1200	24	27	176
Número de comportas (de adução)	1	1	1	1	NA	2	1		0	0	3
Comprimento do canal de adução (m)	980	564	905	2800	36				6000	1560	9970
Comprimento do trecho de vazão reduzida (m)	1506	1285	1699	3900	NA	NA	NA	NA	6600	2030	12700
Vazão mínima do trecho de vazão reduzida (m ³ /s)	0	1	1	0	NA	NA	NA	NA	2	2	10
Número de comportas de descarga	0	0	0	1	NA	1	3	NA	0	0	3
Desarenador (SIM/NÃO)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Descarregador de fundo (SIM/NÃO)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM (tomada d'água)	M (tomada d'água)	Não
Posição da tomada d'água na barragem (Superficial/Profunda)	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Profunda		Profunda	Profunda	Superficial	Superficial	Superficial
Tempo de Retenção Hidráulica (dias)	0,252	0,045	0,326	82,087	0,003		1,688	0,355	0,904	0,059	15,920
Data de Início da Operação	18/10/2008	21/12/2012	25/08/2012	01/10/2006	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1970	03/10/1976	17/02/2007	12/12/2007	

CARACTERÍSTICAS	Rio do Sapo ¹	Itiquira ²	Cachoeira da Fumaça ¹	Ponte Alta ¹	Figueirópolis ¹	Diamante ¹	Salto ¹	São Tadeu I ¹	Aquarius ¹	Maracanã ²	Santana ¹	Mestre ¹	Sta. Cecília ¹
Nome do rio	do Sapo	Itiquira	Tem. Amaral	Coxim	Jauru	Santana	Jauru	Aricá-Mirim	Correntes	Maracanã	Santana	Mestre	Mestre
Vazão média do rio MLT (m ³ /s)	18,23	72,90	12,98	5,90	102,00	12,92	79,90	6,31	14,02	4,49	7,83	1,1	1,54
Área de drenagem (km ²)	593,0	5137,0	762,5	495,0	2960	564	2657,0	256	3970	148,2	804	41,36	61,35
Área Alagada (km ²)	1,006	2,100	0,030	0,490	7,44	0,49	1,060	0,46		0,381	1,17	0,002949	0,006783
NA máximo maximorum (m)	240,5	415,0	99,0	590,5	190,0	325,4	215,2	422,3	363,3	461,2		477	367
Volume total do reservatório (m ³)	1080238	4800000		2175000	34936000	750000	3300000	3660000	443,7	533000	4400000	476	366
Volume útil do reservatório (m ³)	715999	1400000		2175000	34083000	750000	3300000	17070	443,7	533000		47500	18300
Altitude da crista da barragem (m)	238	417	102	592	194	327	216	425	359,3	463	210	476	366
Comprimento da barragem (m)	68	1200	38	362	130	631	1650	230		191		50	180
Altura da barragem (m)	4	11	25	17	28	17	17	27		7	30	12	9
Queda líquida (m)	23.01 / 25.78	86,81 (Itiquira I) e 135,34 (Itiquira II)	27	140	17	16	19	200	76,16	188	79	103,55	130,15
Número de turbinas	02 unid	2 (Itiquira I) e 2 (Itiquira II)	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
Potência de cada Turbina (kW)	2880	31.200 (Itiquira I) e 48.800 (Itiquira II)	800	6500	100005	2100	9918	9278	5207,94	5528		1017,19	1804,17
Potência total (kW)	5760	60.800 (Itiquira I) e 96.570 (Itiquira II)	3	13000	19410	4000	19	18000	5000	10680	14700	2000	3500
Número de comportas (de adução)	0	0	2	2			2	1	1	0		2	3
Comprimento do canal de adução (m)	708	3.400 (Itiquira I) e 2.350 (Itiquira II)	325	4150	0	150	0	30	2648	1792	7	1880	1655
Comprimento do trecho de vazão reduzida (m)	3	11000	25	3000		Não tem	662	2800	3230	2700		1984	2648
Vazão mínima do trecho de vazão reduzida (m ³ /s)	1	1	4	1		Não tem	3	0,2	3,2			0,031	0,045
Número de comportas de descarga	1	0	3	0	0	0	0	1	2			2	3
Desarenador (SIM/NÃO)	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Descarregador de fundo (SIM/NÃO)	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM		NÃO	NÃO
Posição da tomada d'água na barragem (Superficial/Profunda)	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Profunda	Profunda	Profunda	Profunda	Superficial	Superficial		Superficial	Profunda
Tempo de Retenção Hidráulica (dias)	0,686	0,762		4,267	3,964	0,672	0,478	0,064	0,000	1,374	6,504	0,005	0,003
Data de Início da Operação	27/02/2016	06/11/2002	24/04/2003	05/06/2007	28/09/2010	01/09/2005	29/12/2007	24/12/2010	19/09/2006	20/08/2013	27/10/2014	24/04/2015	26/07/2016

Fonte: ANA (2017); diversas

3. Justificativa, objetivos e escopo

3.1. Justificativa

O uso da água para a geração de energia elétrica na RHP, objeto deste estudo, também é expressivo e se encontra em expansão, com possibilidade de construção de novos EHs, cujo total pode chegar a 170 empreendimentos, sendo que até 2017 estavam em funcionamento 47 hidrelétricas (ANA, 2017) (Figura 2). A maioria destes empreendimentos são Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), caracterizadas por gerar até um limite de 30 MW (Tabela 1).

O potencial dos barramentos para a produção de energia hidrelétrica em reter sedimentos e nutrientes pode ser considerada uma perturbação importante no fluxo de destes materiais do planalto para a planície pantaneira.

Em rios que transportam elevadas cargas de sedimentos, como São Lourenço e Itiquira, onde já existem barramentos no final do seu trecho no planalto, podem servir de referência quanto à retenção de sedimentos e para a previsão de alteração em outros rios similares com empreendimentos previstos. A sedimentação nas áreas de transição rio-reservatório tem sido observada nos trechos mais a montante dos reservatórios (zona de transição rio-reservatório) dos EHs, sendo que em alguns casos, há a necessidade de dragagem do local. Em reservatórios com pequena área e curto tempo de residência, esse sedimento se acumula próximo à barragem e vem sendo liberado por meio de sistema de desarenador de fundo, a exemplo das PCHs no rio Tenente Amaral (CRUZ, 2018). Estes sistemas desarenadores e/ou descarregadores de fundo estão instalados em 20 das 36 EHs analisadas (Tabela 1) e ambos têm a função de reduzir o acúmulo de sedimento no reservatório e lançar o excesso a jusante.

Em rios com reduzido transporte de sedimentos, como Correntes e Jauru, os estudos têm demonstrado alterações na qualidade da água entre montante e jusante de barragens dos EHs, indicadas pela turbidez, nitrogênio total, nitrato, pH e sólidos suspensos (FANTIN-CRUZ et al., 2015 e SILVA et al., 2019). Nestes três estudos os autores constataram que as características estruturais dos EHs - como altura da tomada d'água e tempo de residência, aliadas às condições da qualidade da água e do transporte de sedimentos do rio - são fatores que influenciam os parâmetros estudados. As alterações observadas nestes estudos incluíram tanto a redução de quanto o aumento dos valores dos parâmetros de qualidade de água entre as medições a jusante e montante e jusante dos reservatórios hidrelétricos.

Alterações na qualidade da água entre montante e jusante da PCH São Lourenço, no rio São Lourenço, também foram observadas por CRUZ (2018), dentre elas a redução do pH e do oxigênio dissolvido e de variáveis relacionadas ao transporte de sedimento (turbidez, sólidos suspensos e ferro total).

Rios com barramento no final do seu trecho no planalto e que transportam elevadas cargas de sedimentos, como São Lourenço, Itiquira e Correntes, podem servir de referência quanto à retenção de sedimentos, cuja informação pode ser utilizada para a previsão de alteração em outros rios similares com empreendimentos previstos, como os da bacia do rio Taquari.

A sedimentação tem sido observada no início da área dos reservatórios (zona de transição rio-reservatório) desses rios, que tem levado, em alguns casos, à necessidade de dragagem do local. Em reservatórios com pequena área e curto tempo de residência, esse sedimento se acumula próximo à barragem e tem sido liberado por meio de sistema de descarregador ou desarenador de fundo, a exemplo das PCHs no rio Tenente Amaral (CRUZ, 2018). Estes sistemas estão instalados em 20 das 36 EHs em operação

na RHP e ambos têm a função de reduzir o acúmulo de sedimento no reservatório e lançar o excesso a jusante (Tabela 1).

O contexto dos EHs existentes e previstos na RHP, juntamente com os estudos efetuados até o momento apontando alterações na qualidade da água e no transporte de sedimentos e nutrientes a jusante dos barramentos, motivaram e justificam a importância da execução deste projeto, particularmente do componente “Qualidade da Água e Hidrossedimentologia”.

Esta temática, que permite uma análise sistêmica e integrada com outros componentes deste projeto quanto às alterações causadas pelos EHs em operação, gera ferramentas de tomada de decisão para a avaliação dos impactos ambientais dos futuros EHs.

Além disso, o presente estudo também contribui com o conhecimento científico para avaliar os métodos adotados para monitorar os efeitos dos barramentos em PCHs, e os efeitos no transporte de substâncias a montante de uma planície de inundação tão extensa e complexa quanto o Pantanal, além de sua sinergia com os usos da terra no planalto adjacente.

3.2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo avaliar as alterações da qualidade da água e das condições hidrossedimentológicas, causadas por empreendimentos hidrelétricos em operação na RH Paraguai, e estimar o potencial de alteração dos empreendimentos previstos, gerando assim ferramentas para subsidiar o planejamento e a tomada de decisão quanto à implantação das novas hidrelétricas.

3.3. Escopo

Para o alcance dos objetivos propostos acima e constantes no Termo de Referência, foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- I. Avaliação da concentração, do transporte e da taxa de variação de sedimentos, carbono, nutrientes e solutos dissolvidos nos rios com EHs em operação e previstos

Avaliação da concentração e do transporte de sedimentos, carbono, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e solutos dissolvidos na coluna d'água e no leito, nos trechos de rio com EHs em operação e previstos; avaliação das alterações da qualidade da água em escala temporal de alta frequência (horas, dias); estimativa da taxa de variação desses parâmetros, entre montante e jusante, e da retenção nos reservatórios, dos EHs em operação e previstos.

- II. Modelagem da qualidade de água e do transporte de sedimentos e nutrientes para previsão dos efeitos de novos EHs na RHP

Desenvolvimento de estudos de modelagem de qualidade de água e hidrossedimentológicos, com prévia descrição estatística, para aplicação de modelos de redes neurais artificiais (RNAs), para subsidiar a tomada de decisão quanto à Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica – DRDH.

- III. Estimativa das cargas difusas na bacia de drenagem a montante dos EHs em operação e previstos

Identificação e estimativa das cargas de poluição difusas localizadas nas áreas de drenagem a montante dos EHs previstos e em operação, através de modelos hidrológicos. Esta atividade tem por objetivo subsidiar modelos de previsão de alterações na qualidade de água em função dos barramentos previstos.

4.1. Concentração, carga e taxa de variação de sedimentos, carbono, nutrientes e solutos dissolvidos nos rios com EHs em operação e previstos

Na avaliação do transporte de sedimentos, nutrientes e solutos pelos rios é necessário, primeiramente, obter a concentração desses compostos na coluna d'água (qualidade da água) e no material de arraste de fundo do leito, que juntamente com a vazão líquida permitem o cálculo deste transporte.

Foram calculadas as medianas dos parâmetros da qualidade da água de cada ponto de amostragem nos rios avaliados, tanto para os pontos com dados primários quanto secundários. Essa mediana foi comparada entre os diferentes pontos de amostragem, visando estabelecer as diferenças entre rios ou sub-bacias, de forma que a variação temporal imposta pela sazonalidade de chuvas não foi considerada, ou seja, foi dada ênfase à variação espacial, com a mediana representando a condição anual de cada ponto.

Obtenção, seleção e análise dos dados secundários: qualidade da água e vazão

Os dados secundários de qualidade da água e hidrossedimentologia, particularmente quanto à concentração de sedimentos, nutrientes e solutos dissolvidos, foram obtidos principalmente nos relatórios de avaliação de impacto ambiental e/ou do monitoramento de 28 EHs em operação.

O monitoramento geralmente é feito no início, durante a construção e após o barramento. Foram usados dados da fase de pré-operação e na fase de operação, com base na data aproximada de início da operação da usina. Foram utilizados ainda dados (CRUZ, 2018; OLIVEIRA et al. 2019) para caracterizar os rios em locais não amostrados neste estudo, como a bacia do rio Tenente Amaral (CRUZ, 2018) e os principais rios na entrada para o Pantanal (OLIVEIRA et al., 2019).

Foram compilados cerca de 3.000 registros de qualidade de água e 2.653 para variáveis do sedimento. Deste total, foram selecionados 982 registros para análise da taxa de variação, utilizados ainda na construção do modelo de previsão com redes neurais. Esta seleção resultou da avaliação criteriosa da existência de dados a montante e a jusante de cada EH, que tenham sido obtidos na mesma data de amostragem (ou em dias próximos) e da quantidade de dados disponíveis, com pelo menos cinco amostragens.

Nos rios com mais de um ponto de coleta a montante ou a jusante do reservatório, foi calculada e considerada a média dos valores destes pontos, inclusive no caso de pontos localizados em afluentes. Na Figura 3 estão as estações de amostragem com dados secundários utilizados no estudo. Os pares de dados resultantes desta primeira seleção foram analisados a partir dos seguintes critérios:

- i) Exclusão de valores extremos que não expressam as características da água ou do sedimento observados em estudos anteriores na bacia (HAMILTON et al., 1997; OLIVEIRA et al., 2019 e relatórios do monitoramento publicados pela SEMA). Foram considerados resultados de fósforo total (PT) até o limite máximo dos dados (1,0 mg/L) e nitrogênio total (NT) até 15 mg/L. Embora valores acima de 5 mg/L de NT sejam considerados altos para os rios da RH Paraguai, esses resultados foram incluídos devido à impossibilidade de se adotar critérios de confirmação. Por outro lado, foram removidos valores maiores que 5 mg NO₃⁻/L (nitrato), porque a condutividade elétrica dessas amostras não refletiu as concentrações elevadas dessa forma nitrogenada (quatro registros a montante e quatro a jusante). Este mesmo critério foi adotado para o íon amônio.
- ii) Análise da coerência dos resultados entre variáveis correlatas, por exemplo, calculou-se a razão Fosfato/Fósforo total, nitrogênio dissolvido/nitrogênio total e a correlação entre condutividade elétrica e concentração de íons.
- iii) Valores abaixo dos limites de detecção dos métodos analíticos adotados foram substituídos pelos respectivos valores dos limites. Por exemplo: resultado expresso como < 1,0 mg/L foi considerado como sendo igual a 1,0 mg/L.

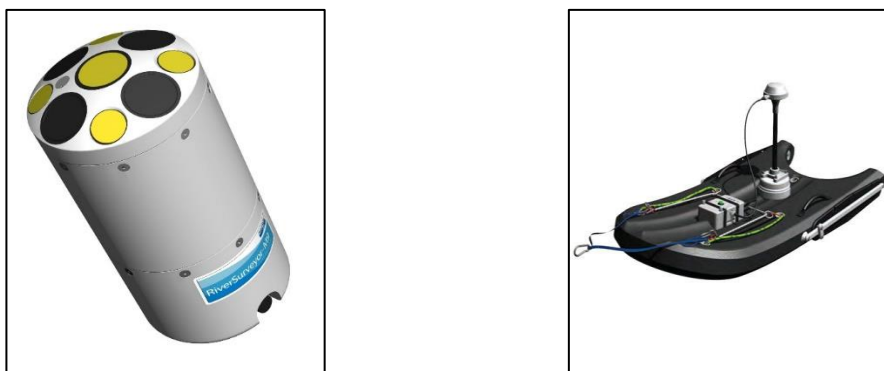
Obtenção e análise dos dados primários

Na obtenção de novos dados (dados primários) de qualidade da água e hidrossedimentologia, foram efetuadas amostragens em campo a montante e a jusante dos EHs em operação, principalmente nas cascatas de reservatórios em sequência, como nos rios Jauru e Juba, mostrados na Figura 3. Foram efetuadas 13 amostragens, a montante e a jusante dos barramentos existentes, entre maio de 2018 e julho de 2019, incluindo as épocas de seca e chuva na região. Neste mesmo período, foram amostrados trechos de rios com EHs previstos, com número de coletas variando no mínimo de 6 e no máximo de 13 amostragens em cada ponto durante esses meses. Os pontos foram situados próximos dos reservatórios previstos. Os métodos adotados nas amostragens em campo e nos procedimentos de laboratório e análise dos dados são descritos a seguir.

Amostragens e medições em campo

Medição de vazão

Em cada local de coleta foi implantada uma seção fluviométrica, onde foi levantado o perfil topobatimétrico e instaladas régua limnimétricas, exceto nas seções dos rios onde já haviam estações fluviométricas em operação, instaladas, em sua grande maioria, pelos gestores dos EHs. Para a construção da curva-chave da seção, tanto das novas estações quanto das que já estavam em operação, foram efetuadas medições de vazão utilizando o método acústico Doppler – ADCP, conforme descrito em ANA (2017). O modelo de equipamento acústico utilizado para a medição de vazão foi o *RiverSurveyor-M9 SonTek* que permite o uso em barcos ou em plataforma flutuante acoplável (*Hydroboard*; Figura 4).

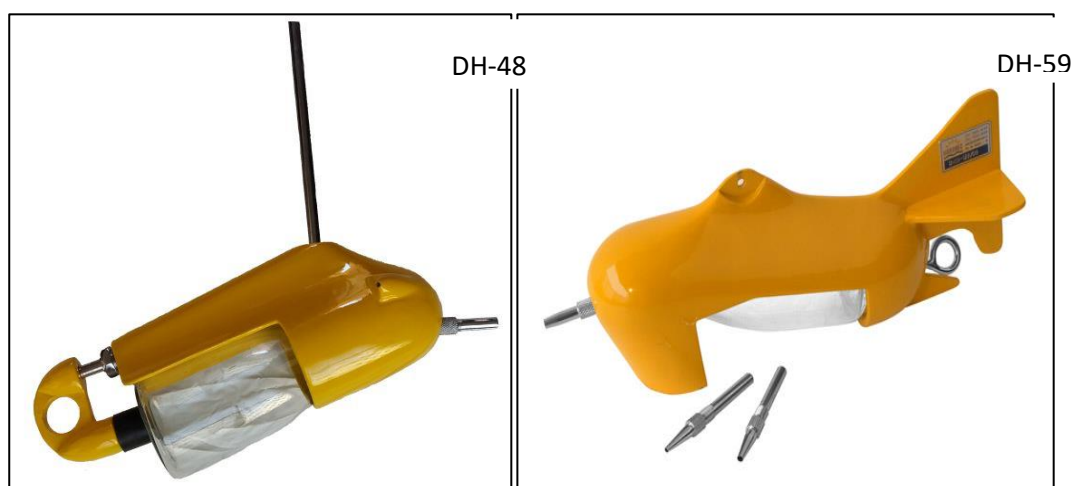


Fonte: SonTek

Figura 4. Fotos ilustrativas do equipamento utilizado na medição da vazão, ADCP modelo RiverSurveyor-M9, e do flutuador Hidroboard SonTek.

Amostragem de água para análise da carga em suspensão: sedimentos, nutrientes e solutos

As coletas de água para a obtenção das cargas de sedimentos, nutrientes e solutos (íons dissolvidos) foram efetuadas por integração vertical, adotando o método de igual incremento de descarga (IID), as subamostras foram coletadas nas seções com as porcentagens acumuladas da descarga em 25%, 50% e 75%, obtidas por meio do software disponibilizados pela Agência Nacional de Águas, o HidroSedimentos 2.0 que é capaz de ler os arquivos gerados por equipamentos de medição de vazão pelo método acústico Doppler (ADCP) (ANA, 2019). Foram utilizados os equipamentos DH48 e o DH59, selecionados de acordo com as características hidráulicas da seção (Figura 5). As subamostras foram adicionadas a um balde misturador e, sob constante agitação, foram retiradas amostras para análises de sedimentos, nutrientes e íons.



Fonte: Hidrometria.com

Figura 5. Amostradores de sedimento em suspensão.

Amostragem de sedimento de leito para análise de sedimentos e nutrientes

A amostragem do sedimento transportado por arraste no leito foi efetuada com amostrador Helley-Smith, e a amostragem para a caracterização da granulometria do sedimento com amostrador UBSHM-60 (Figuras 6 e 7), seguindo o método proposto por Carvalho (2008).



Figura 6. Amostrador Helley-Smith



Figura 7. Amostrador USBMH-60
(Fonte: Hidromechc.com.br)

Análises em laboratório

Carga em suspensão

As variáveis analisadas nas amostras de água coletadas em campo foram: sólidos suspensos (SS), turbidez (TUR), fósforo total (PT), nitrogênio total (NT) e carbono orgânico particulado (COP, retido no filtro), nitrogênio dissolvido (ND = nitrato, nitrito e amônia), solutos dissolvidos (SD=soma de Na, K, Ca, Mg, Cl e SO₄), condutividade elétrica (Condt.). Tanto a coleta de dados como as análises em laboratório foram efetuadas pelas equipes da Universidade Federal de Mato Grosso e Embrapa Pantanal.

Todos os procedimentos das análises de água seguiram o descrito em AWWA-APHA (2017) e adaptações de outras metodologias consagradas e amplamente adotadas no meio científico, como aquelas descritas em Wetzel e Likens (1991,) para águas mais diluídas. A determinação da concentração de cátions, cloreto, sulfato, nitrito, nitrato, amônia na água foi feita por cromatografia líquida, com cromatógrafo da marca DIONEX. O fósforo total foi analisado segundo Mackereth et al. (1978) e Wetzel e Likens (1991) e o Nitrogênio Total segundo Wetzel e Likens (1991).

Para análise de COP foram filtrados 800 mL de água, em filtro de fibra de vidro (0,7 um), e a leitura do carbono, em %, convertido para mg/L, foi feita no equipamento Elementar Vario Cube para CNHS (Carbono, Nitrogênio, Hidrogênio e Enxofre), no laboratório da Embrapa Pantanal. Na análise da concentração de sedimento em suspensão, em mg/L, adotou-se o método de filtração, baseado nos procedimentos usados pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil (IT 06-01-01, Revisão 2, emissão 07/2015).

Sedimento do leito

Para quantificar o transporte de material do leito, as amostras de sedimento foram primeiramente colocadas na estufa a 105°C (±5°C) por 24h, esfriadas por um pernoite e, por fim, pesadas para obtenção de massa constante. A análise granulométrica do sedimento do leito do rio foi efetuada de acordo com o método de peneiramento, baseado nos procedimentos usados pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil (IT 06-01-03, Revisão 1, emissão 01/2015).

Para a determinação de fósforo total (PT), nitrogênio total (NT) e carbono total (CT), as folhas e outros detritos do sedimento foram separados da amostra, triturados em moinho, adicionados novamente na amostra e homogeneizada, sendo então retirada uma alíquota para análise. O fósforo foi analisado considerando o método de extração de Andersen (1975) e Riley e Murphy (1962), e as amostras de nitrogênio e carbono lidas diretamente no analisador Elementar Vario Cube para CNHS.

Cálculos e análises estatísticas

Cálculo da carga fluvial em suspensão: sedimento, nutrientes e solutos dissolvidos (de acordo com Carvalho, 2008)

Conhecendo-se a concentração de sedimentos em suspensão (SS) e a descarga líquida da seção (vazão), calculou-se a carga sólida em suspensão de acordo com a equação a seguir:

$$QSS = 0,0864 * Q * CSS$$

Onde:

QSS: carga sólida em suspensão– unidade: ton./dia

Q: Descarga líquida – unidade: m³/s

CSS: Concentração de sedimento em suspensão - mg/l

A mesma formula foi usada para o caso de nutrientes e solutos dissolvidos, com os resultados expressos em unidades de kg/dia.

Cálculo do transporte do leito: sedimento e nutrientes (de acordo com Carvalho, 2008)

A carga sólida de leito usando o amostrador de fundo modelo Helley Smith foi calculada pelo processo de múltiplas análises (Carvalho, 2008). Para o cálculo foram utilizados os dados de peso seco determinados em laboratório, a partir da análise individual das amostras coletadas em cada ponto. A carga

sólida de leito em um ponto foi então calculada pela seguinte equação: $q_{sa} = \frac{1}{E_{am}} * \frac{p(d_{i+1}-d_{i-1})}{l*t}$

E a carga total do leito foi calculada por:

$$Q_{sl} = \left[\sum \frac{p(d_{i+1}-d_{i-1})}{E_{am}*l*t} kg. d^{-1} \right] . 86,4 \text{ onde:}$$

Qsl = carga sólida total do leito, [ton./dia];

qsa = carga sólida pontual do leito, [kg/s];

Eam = eficiência hidráulica do equipamento;

p = peso seco da amostra no ponto, [kg];

$(d_{i+1}-d_{i-1})$ = distância entre a metade da largura vertical antecedente ao ponto medido até a metade da largura da vertical subsequente. Os pontos extremos terão suas distâncias contadas até a margem, [m];

l = largura da boca do amostrador, [m];

t = tempo de amostragem, [s].

Determinação da taxa de variação

A taxa de variação entre montante e jusante foi calculada para todas as variáveis analisadas, tanto em suspensão como no leito, para medir o efeito do reservatório e da operação do EH sobre cada parâmetro de qualidade de água e hidrossedimentológico, de acordo com a equação a seguir:

-Para $P(M) < P(J)$

$$TX = + \left(1 - \left(\frac{P(M)}{P(J)} \right) \right) \times 100$$

- Para $P(M) > P(J)$

$$TX = - \left(1 - \left(\frac{P(J)}{P(M)} \right) \right) \times 100$$

Onde:

TX é a taxa de variação em relação a condição de montante (natural ou controle), expresso em porcentagem (%);

P(J) é o valor do parâmetro medido no ponto de jusante;

P(M) o valor do parâmetro medido no ponto de montante.

A taxa de variação poderá ser positiva, negativa, ou neutra, de acordo com um aumento, diminuição ou estabilidade no valor do parâmetro em relação ao montante. Esta padronização faz com que os limites máximos de variação fiquem entre +100% e -100%.

Para avaliar se as taxas de variação calculadas são significativamente diferentes entre montante e jusante, foi adotado o teste pareado não paramétrico de Wilcoxon. Este teste avalia se as amostras obtidas a montante e jusante são iguais, a um nível de significância de 5%, e controla possíveis ruídos causados pela variabilidade climática sazonal ou interanual que poderiam ser atribuídos ao represamento. Sua aplicação vem se mostrando uma opção simples e eficiente para a quantificação das alterações provocadas por reservatórios, mesmo com limitação de dados (FANTIN-CRUZ, et al., 2016).

Amostragem de alta frequência: estudo de caso nas PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis, instaladas no Ribeirão Ponte de Pedra

Para a amostragem de alta frequência, foram utilizados equipamentos automáticos adquiridos com recursos do FINEP, através do projeto “Rede de Monitoramento Ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal” (REMAPP), coordenado pela equipe da UFMT, e pesquisadores nacionais e internacionais. Os equipamentos foram uma contrapartida do grupo proponente, sendo os recursos deste projeto destinados apenas a subsidiar a instalação e a operacionalização de três estações instaladas a montante e jusante das duas hidrelétricas no Ribeirão Ponte de Pedra.

Os conjuntos para monitoramento de qualidade de água das três estações foram compostos por equipamentos de dois fornecedores, da Campbell Scientific, cujos sensores permitiram a medição de pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade e temperatura da água (Campbell Scientific), e da Marte (equipamentos produzidas pela WTW/Xylem), para medição de nitrato (NO_3) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) por sonda NiCaVis® 705 IQ (WTW). Possuem ainda instalação completa para aquisição de dados micro-meteorológicos, cujos dados de precipitação foram obtidos no ponto A1 (Figura 8).

As estações foram instaladas no Ribeirão Ponte de Pedra (descrito no item 2.3), nas usinas Eng. José Gelázio e Rondonópolis, da empresa Engie Brasil. A Figura 8 mostra a localização das estações automáticas na bacia do ribeirão Ponte de Pedra. A estação de monitoramento A1 está localizada na margem direita do Ribeirão Ponte de Pedra, junto com a estação telemétrica PCH Eng. José Gelázio da Rocha (Código ANA: 66452500), à cerca de 6 km a montante da captação da PCH Eng. José Gelázio da Rocha sem influência de remanso pelo represamento (Figura 9). A estação A2 monitora a qualidade da água da vazão turbinada pela PCH Eng. José Gelázio da Rocha, após a confluência com o trecho de vazão reduzida do leito natural (Figura 10). A estação A3 monitora somente a qualidade da água turbinada da PCH Rondonópolis. A topografia acidentada e o leito estreito, não possibilitou a instalação de um local de medição após a confluência com o trecho de vazão reduzida (Figura 11).

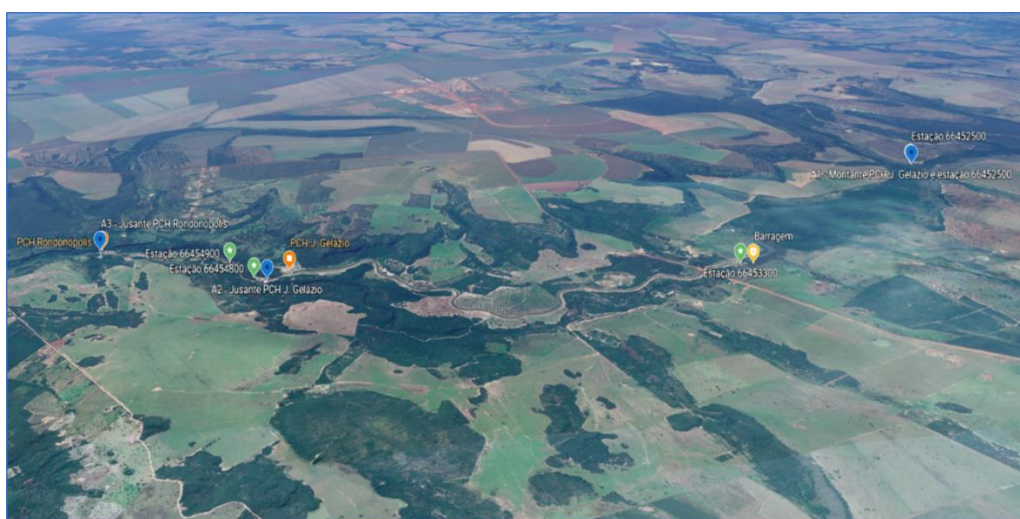


Figura 8. Arranjo espacial das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis, estações de monitoramento de qualidade da REMAPP e estações fluviométricas



Figura 9. Estação de monitoramento “Água 1” (A1), no Ribeirão Ponte de Pedra, a montante das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis



Figura 10. Estação “Água 2” (A2), a jusante da PCH Eng. José Gelázio da Rocha e a montante PCH Rondonópolis



Figura 11. Estação “Água 3” (A3), a jusante da PCH Rondonópolis.

Instalação, manutenção das estações automáticas e obtenção dos dados de alta frequência

A instalação das estações de monitoramento de qualidade de água em alta frequência foi efetuada entre os dias 22 e 27/01/18. Foram feitas 15 visitas ao local para leitura, verificação e reparo nos equipamentos. Foram identificados vários danos aos equipamentos causados por problemas técnicos ou condições ambientais. De maneira geral, os problemas e as interrupções que ocorreram nas medições foram tratados através da adoção de medidas corretivas, como troca de peças, cabos e jogos inteiros de equipamentos, e medidas preventivas, como instalação de gaiola de proteção (dentro da água) e cercas e caixas de proteção (fora da água), limpezas periódicas, verificações intermediárias e recalibrações. A operacionalização das estações automáticas implicou em um rígido controle periódico e sistemático dos equipamentos, que resultou no aprendizado de ações corretivas e preventivas para o funcionamento adequado dos equipamentos.

Por serem provenientes de três sistemas de armazenamento eletrônico distintos (*dataloggers*), que possuem resolução temporal e capacidade de armazenamento e de alimentação elétrica diferentes, todas as séries foram reamostradas para uma resolução temporal de uma hora (1 h), o que também permitiu uma comparação direta com os dados de vazão disponibilizados pela Engie Brasil. Os dados fluviométricos utilizados para sobrepor com os de qualidade da água, foram as séries de vazões afluentes e defluentes das duas PCHs para todo período de operação, cedidos pela concessionária Engie Brasil, responsável pelos EHs, os quais mostraram boa consistência.

Foram analisados os parâmetros de qualidade de água temperatura da água, condutividade, oxigênio dissolvido, pH, DQO e nitrato, para os quais foram apresentados os resultados da série de medições obtidas em todo o período e uma análise de um período de seca (16/05/2019 a 09/07/2019) e outro de chuva (14/12/2018 a 23/12/2018; 20/02/2019 a 31/03/2019), durante os quais os equipamentos produziram dados

consistentes e validados. A resolução temporal adotada foi de uma 01 hora, entre 24/03/2018 e 06/09/2019, sobrepostas com a vazão defluente da PCH Eng. José Gelázio da Rocha e a precipitação medida no ponto A1.

Os resultados obtidos pelos sensores da REMAPP foram validados a partir dos seguintes referenciais:

- i) Laboratório externo: A equipe REMAPP/Alta frequência realizou coletas de amostras e medições em campo a fim de intercalibrar os resultados obtidos pelas estações automáticas. Para tanto, enviou amostras para laboratório privado credenciado ao INMETRO, com certificação ISO/IEC 17025, ao longo do monitoramento. Na instalação das estações automáticas e primeiras calibrações também foram feitos comparativos das medições das variáveis de pH, temperatura da água, oxigênio dissolvido e condutividade com sonda multiparamétrica YSI *Professional Plus* cedida pelo mesmo laboratório. O equipamento utilizado como referência possuía certificado de calibração pela Rede Brasileira de Calibração/RBC (laudos e certificados no Anexo 1). Para intercalibrar os equipamentos de medição de nitrato e DQO, foram coletadas amostras de água para análise em laboratório (EMPBRAPA Pantanal) ao longo do período monitorado para construção da curva de calibração das estações de medição destes parâmetros.
- ii) Dados do monitoramento da Engie Brasil: dados do monitoramento da qualidade da água e limnologia de responsabilidade dos gestores das PCHs Eng. José Gelázio da Rocha e Rondonópolis (2008 a 2017) também foram utilizados como referência para a validação dos resultados obtidos pelas estações automáticas. Estes dados foram obtidos nos relatórios de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia, protocolados no órgão ambiental estadual (SEMA-MT), que fazem parte do processo de licenciamento dos EHs (Anexos 2 e 3).

Os dados provenientes dessas fontes foram utilizados durante as campanhas de manutenção da REMAPP, entre setembro 2018 e setembro 2019, para validar os resultados obtidos pelas estações automáticas de medição de alta frequência. Baseada em dados de fontes diversas, mas com qualidade técnica equiparável, foi obtido um conjunto de informações sólidas, aumentando a confiabilidade e segurança na calibração e validação dos equipamentos da REMAPP. Destaca-se que este conjunto de dados de referência foi utilizado somente para ajuste das medições em casos nos quais ocorreram efeitos de mudança abrupta (*change points*) das medições observados/documentados *in situ*, após manutenção e/ou recalibração dos sensores.

Bacia Hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra

A bacia hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra possui uma área de 2.131 km², com extensão de cerca de 156 km de seu curso principal e desnível entre a nascente e a foz de 529,8 m (OLIVEIRA, 2016). A bacia possui alto grau de desmatamento, com cerca 55% da sua área designado ao plantio e 18% para pastagens (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

As PCHs Eng. José Gelázio da Rocha (montante) e Rondonópolis (jusante) foram projetadas em sistema de cascata, em uma distância de cerca de 6,7 km entre si. Entraram em operação, em fevereiro 2007 (Eng. José Gelázio da Rocha) e dezembro de 2007 (Rondonópolis).

A PCH Eng. José Gelázio da Rocha possui uma capacidade de geração instalada de 24,45 MW, com área alagada de 0,13 km², barragem com 4 m de altura construída em concreto e aterro, composta por descarregador de fundo, vertedor livre e captação de água superficial por meio de um desvio que conduz para o canal de adução, com manta impermeável com 6,5 km de comprimento (OLIVEIRA, 2016).

O conduto forçado possui 250 m de comprimento e desnível de 63 m. A vazão mínima mantida no trecho de vazão reduzida é de 2,7 m³/s, oriunda da parte superficial do reservatório. O reservatório possui proliferação de plantas aquática enraizadas principalmente de *Eichhornia azurea*, *Pontederia* sp. (Pontederiaceae) e gramíneas (Poaceae).

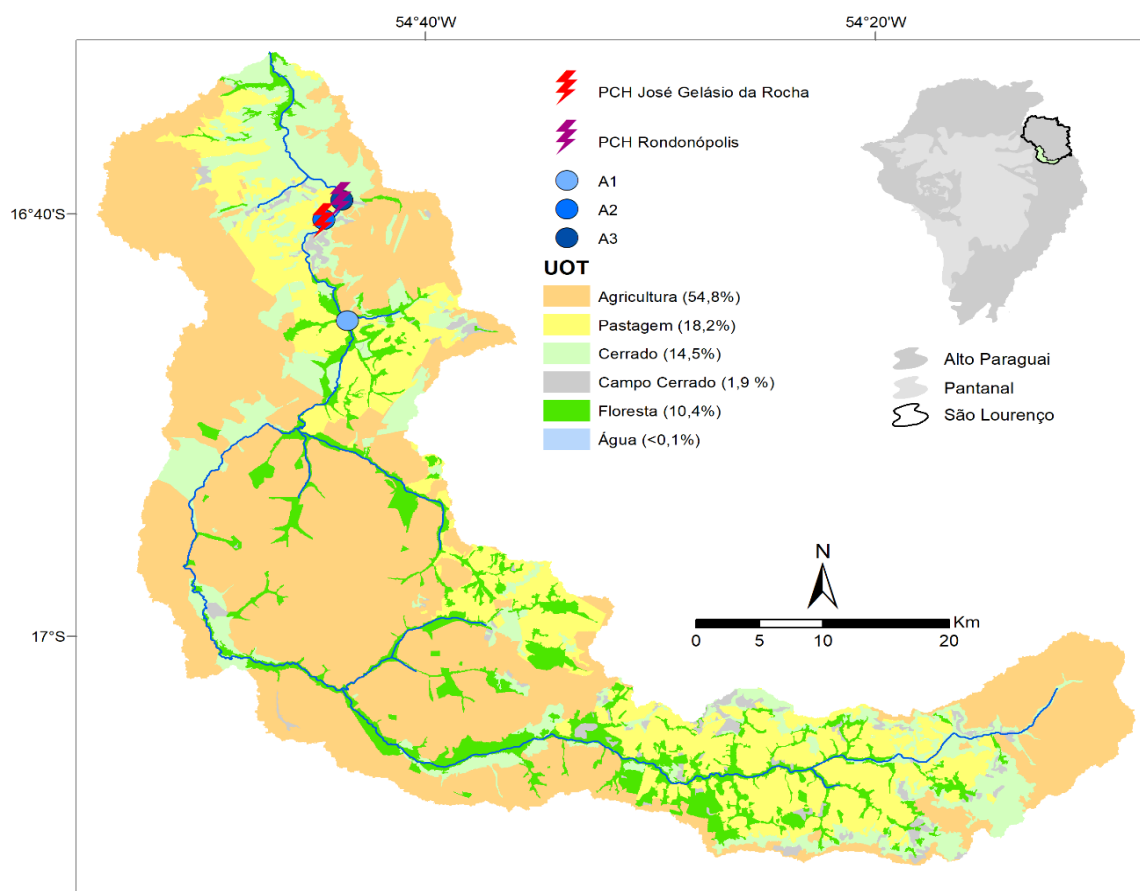


Figura 12. Bacia do Ribeirão Ponte de Pedra com as estações de monitoramento de qualidade de água da REMAPP-“Rede de monitoramento ambiental multifuncional do sistema Planalto-Pantanal” (A1-A3). Fonte: Oliveira (2016)

4.2. Modelagem da qualidade de água e do transporte de sedimentos e nutrientes para previsão dos efeitos de novos EHS na RHP

Modelo de redes neurais: conceito, treinamento e verificação

Redes neurais artificiais (RNAs) são modelos empíricos, cuja composição básica é uma função de ativação, geralmente não linear, que promove uma soma ponderada das entradas, resultando em um sinal correspondente à resposta desejada. Os fatores de ponderação são os pesos sinápticos, em analogia aos neurônios biológicos. O procedimento para ajuste destes parâmetros constitui o treinamento da rede neural.

Hornik et al. (1989) enunciou um teorema da aproximação universal com RNAs, o qual estabelece que qualquer relação mensurável pode ser aproximada com uma única camada intermediária, com qualquer precisão desejada, desde que adequadamente treinada e com um número compatível de neurônios artificiais nesta camada. As RNAs do tipo feedforward, também chamadas Multiple Layer Perceptrons (MPL) (Rumelhart et al. 1986), são comumente utilizadas em muitas aplicações hidrológicas, em geral com uma estrutura de três camadas (Figura 13).

Na primeira camada são inseridos os dados de entrada (variáveis explicativas). Nas camadas sucessivas, cada neurônio recebe a soma das entradas, ponderada pelos pesos sinápticos; esta soma passa por uma transformação linear ou não linear (função de ativação do neurônio), adicionada a um termo de tendência, que transforma esta soma em um valor de saída desta camada, para constituir a saída da rede (variáveis explicadas).

A função sigmoide unipolar é a mais utilizada como função de ativação dos neurônios da camada intermediária, devido à simplicidade de sua derivada. Também pode ser utilizada a função sigmoide bipolar. Pode-se ainda utilizar para os neurônios da camada de saída, uma função de ativação do tipo linear. No entanto, o uso de funções não lineares (sigmóides) para a saída, com escalonamento posterior, aumenta a capacidade do modelo para aproximar comportamentos não-lineares (SARI et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2017; FANTIN-CRUZ et al., 2011).

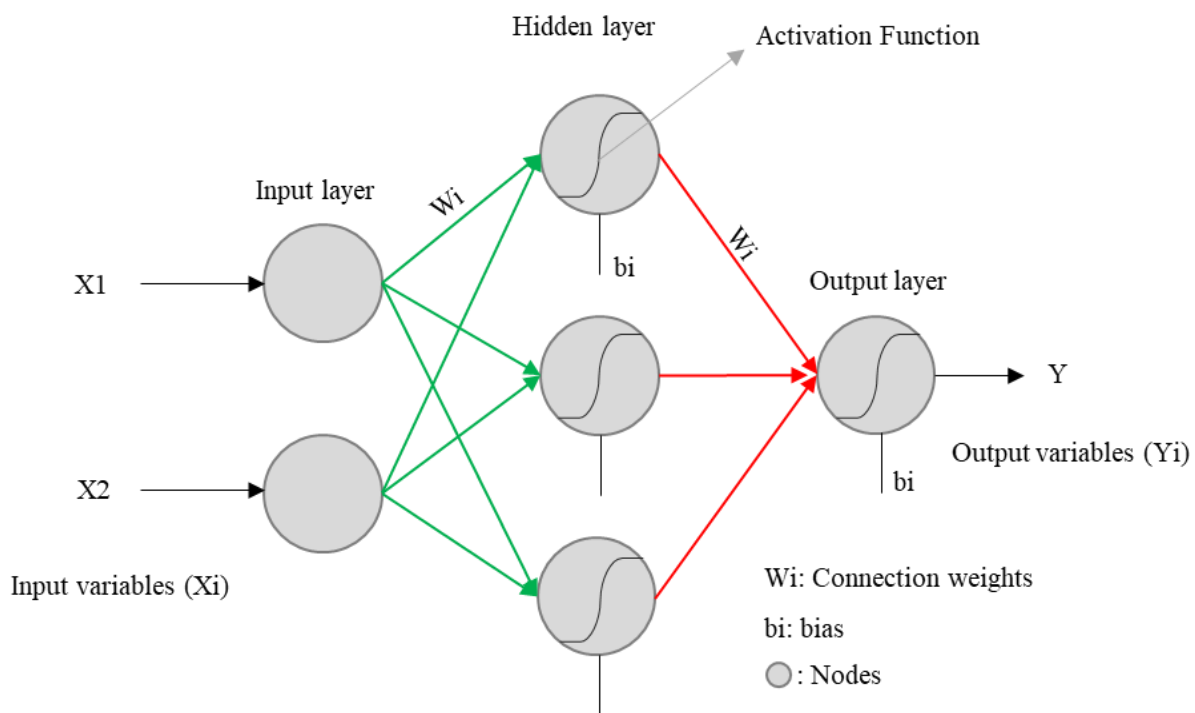


Figura 13. Representação de uma RNA feedforward com três camadas, comumente aplicados em modelos hidrológicos. Fonte: Campos (2019).

Na etapa de treinamento da rede, os pesos sinápticos das conexões e o *bias* são ajustados a partir de uma regra de aprendizado, cujo objetivo final é, normalmente, minimizar alguma medida de desempenho baseada nos erros entre as saídas calculadas e observadas (ASCE, 2000). Os valores iniciais são escolhidos aleatoriamente (KASABOV, 1998; FREEMAN; SKAPURA, 1991;). São efetuadas diversas repetições do treinamento, a partir de pesos aleatórios diferentes (com a escolha da configuração de pesos que apresentou o melhor desempenho) pois, devido a essa aleatoriedade, cada treinamento resulta em uma rede diferente.

O superajustamento da RNA pode acontecer quando o número de neurônios nas camadas intermediárias for excessivo (excesso de graus de liberdade), e quando o número de ciclos executados é muito grande, ocorrendo assim o treinamento excessivo da rede, caracterizado pelo ajuste também das aleatoriedades presentes na amostra de treinamento (HECHT-NIELSEN, 1989). Para evitar que isso aconteça, realiza-se uma limitação da complexidade (número de neurônios nas camadas internas) do modelo, ou a interrupção oportuna do treinamento quando condições suficientes de finalização são alcançadas.

A validação cruzada é o recurso mais utilizado para se evitar o superajustamento da RNA do tipo *feedforward*. Esta técnica utiliza uma amostra não usada pelo algoritmo de treinamento, chamada de amostra de validação, para executar uma avaliação do erro ao longo do treinamento. O início do superajustamento ocorre no ciclo em que o erro da série de validação começa a aumentar, enquanto o erro da série de treinamento continua a diminuir. Assim, a validação cruzada funciona como um determinante do momento ideal de parada do treinamento, já que a estatística de erros do treinamento vai sempre diminuindo (indicando desempenho melhor), enquanto que a estatística de erros da série de validação, a partir de determinado ciclo, volta a elevar-se, indicando que um limiar foi atingido. Esse limiar determina o momento a partir do qual a capacidade de generalização fica comprometida, devendo-se, nesse ponto, interromper o treinamento. Ao final, a rede treinada é submetida a uma amostra de verificação, que não participou da etapa do treinamento, para garantia da capacidade de generalização do modelo (HECHT-NIELSEN, 1989).

Aplicação das RNAs na RH Paraguai

Em Campos (2019) foram apresentados diversos modelos de redes neurais artificiais (RNAs) para estimar a concentração de sedimentos suspensos (CSS) em 23 pontos da RH Paraguai. Os pontos referem-se às estações fluviométricas que dispõem de dados de CSS disponíveis na *Hidroweb*. Os modelos foram desenvolvidos de forma a estimar a CSS a partir de outros dados mais comuns e de fácil obtenção, tais como as vazões, o volume de chuva na área de drenagem (obtido de produtos de sensoriamento remoto), o tipo de solo, o uso e a ocupação do solo, a declividade média da bacia de drenagem e a turbidez. O desempenho do melhor modelo desenvolvido, em termos de coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), foi de $NS=0,826$ no treinamento e $NS=0,832$ na verificação, indicando uma satisfatória aproximação entre os dados de CSS calculados pelo modelo e os dados observados.

Desenvolvimento do modelo RNA para estimativa da taxa de variação nos EHs previstos

Em virtude do bom desempenho observado nos modelos de Campos (2019) para estimar CSS na RH Paraguai, optou-se por testar a utilização dos mesmos dados de tipo de solo e de uso e ocupação do solo para estimar as taxas de alteração dos EHs na RH Paraguai. Para tanto, foram consideradas as seguintes variáveis de entrada:

Dados de tipo de solo

As classes de tipo de solo foram extraídas a partir do mapa de tipos de solo do Brasil, em escala de 1:5.000.000, que segue o sistema brasileiro de classificação dos solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2018). Embora existam semelhanças desta classificação com outros sistemas taxonômicos internacionais, o SiBCS foi escolhido pois ele agrega informações específicas dos solos tropicais brasileiros. As classificações foram utilizadas até o terceiro nível categórico, totalizando 29 classes, incluindo água (Figura 14).

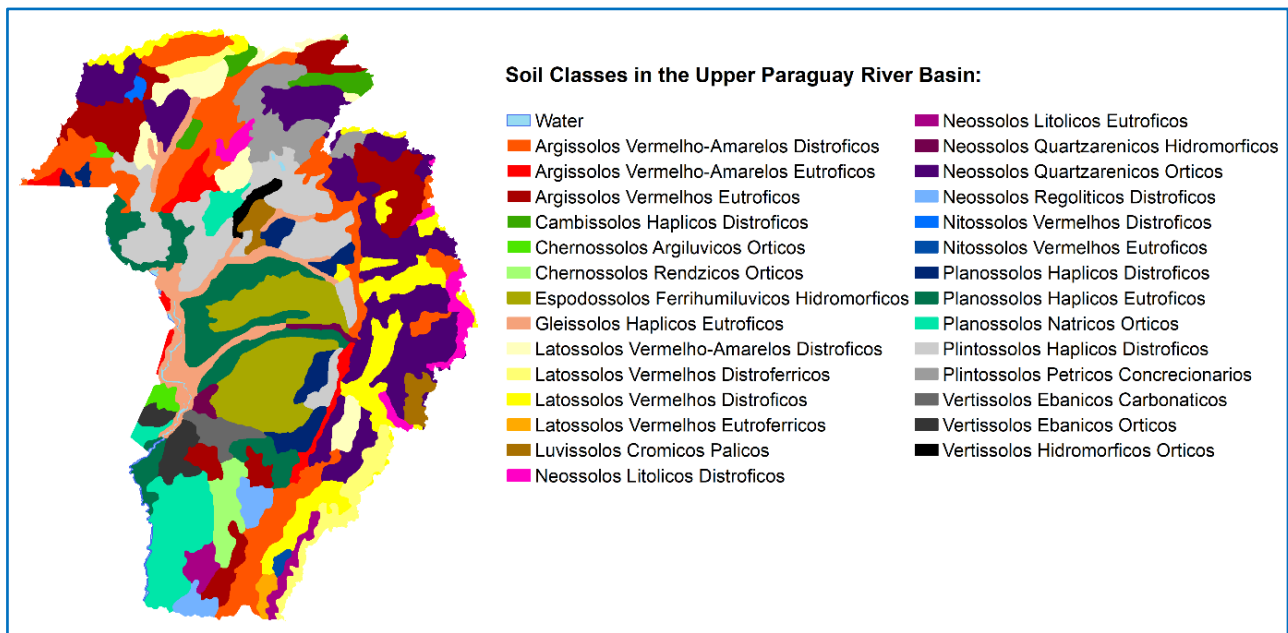


Figura 14. Tipos de solo da RHP, de acordo com o novo sistema brasileiro de classificação dos solos. Fonte: Campos (2019).

Os empreendimentos estudados estão, em sua maioria, localizados na região de Planalto da bacia, e as classes de solo que são observadas nestas áreas são: Argissolo Vermelho Eutrófico; Argissolo Vermelho Distrófico; Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico; Neossolo Quartzarênico Ortico; Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico; Latossolo Vermelho Distrófico; Latossolo Vermelho Distroférico; Cambissolo Haplico Distrófico; Plintossolo Haplico Distrófico; Plintossolo Pétrico Concrecionário e Nitossolo Vermelho Distrófico. Estas 11 classes são as que compõem o conjunto de variáveis de entrada que representam os tipos de solo nos modelos de RNA desenvolvidos nesse projeto.

Uso e ocupação da terra

O uso da terra também foi considerado na seleção de variáveis de entrada dos modelos, pois a cobertura vegetal de uma bacia exerce papel relevante na erosão e na produção de sedimentos, atuando como uma camada protetiva do solo, que minimiza os impactos causados pelas chuvas e os efeitos da ação do vento próximo a sua superfície.

As classes de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir de um mapeamento feito e disponibilizado Embrapa, referente ao ano de 2014, para toda a porção brasileira da Bacia (EMPRAPA, 2015). O mapeamento classificou 15 feições de uso da terra, sendo que as mais frequentes no Planalto são Agricultura, Pastagem e Savana Arborizada (Figura 15).

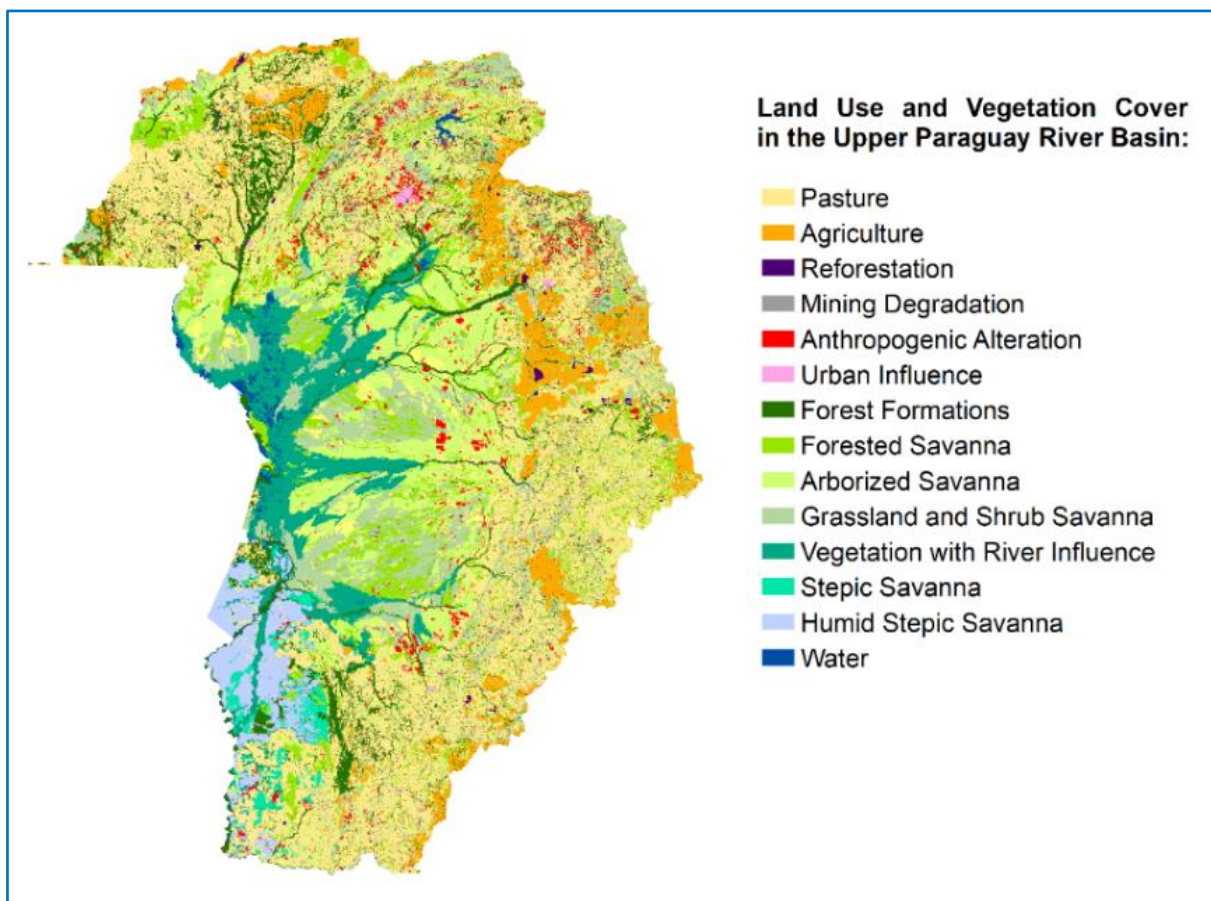


Figura 15. Uso e ocupação do solo na RHP. Fonte: Embrapa (2015)

Produção de sedimentos e nutrientes na bacia de drenagem a montante dos EHs em operação e previstos

As estimativas de produção potencial de sedimentos e nutrientes, nas bacias de drenagem a montante dos EHs em operação e previstos para o ano de 2017, foram efetuadas por meio do modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool* - SWAT - ARNOLD et al., 1998). Os detalhes deste modelo SWAT são apresentados por Neitsch et al. (2011), Arnold et al. (2012) e Baldissera (2015).

Para cada sub-bacia da RH Paraguai foram geradas estimativas de médias mensais e totais anuais da produção de sedimentos anual (t/ha), da quantidade anual de nitrogênio orgânico (NO kg/ha) e de fósforo orgânico (POnutrient kg/ha) transportado via escoamentos superficial e subsuperficial. Os detalhes da metodologia da modelagem foram apresentados nos relatórios parciais (produto 8).

Nas Figuras 16, 17 e 18 estão mostrados os resultados da produção de sedimentos, nitrogênio e fósforo na parte alta da RH Paraguai. A produção anual de sedimento na bacia de drenagem a montante de cada EH varia amplamente entre 0,5 e 90,0 t/ha.ano. Na bacia do rio Taquari estão os EHs em bacias de drenagem com maior produção potencial de sedimento, com destaque para os EHs dos rios Ariranha e Jauru, com produção próxima a 90 t/ha.ano. Em pequenos rios da bacia do rio Cuiabá a produção também é alta, em torno de 60t/ha.ano. Em EHs nos rios Itiquira e Ribeirão Comprido (afluente do rio Correntes), a produção varia entre 40 e 45 t/ha.ano. Nas bacias de drenagens dos EHs da parte norte da RH Paraguai (incluindo o rio Cuiabá), a produção de sedimento é menor, variando entre 20 e 40 t/ha.ano, e menor que 20 t/ha.ano na área de drenagem de EHs da bacia do rio São Lourenço (Figura 16).

A estimativa do nitrogênio e fósforo orgânico transportado via escoamento superficial e subsuperficial (kg NO/ha) mostra variações entre 0,02 e 5,6 NO t/ha.ano e 0,02 e 0,93 t/ha.ano nas bacias de drenagem dos EHs da RH Paraguai (Figura 1 e Figura 18). Os EHs em áreas de drenagem com maior transporte de NO e PO em 2017 estão nas bacias dos rios Taquari, Coxim e Jauru (MS), seguidas do rio Correntes. Outras áreas com alto escoamento de NO e PO estão nas bacias do rio Cuiabá, onde estão três EHs com valores de NO entre 0,2 e 0,4 t/ha.ano, transportado via escoamento superficial das áreas de drenagem a montante.

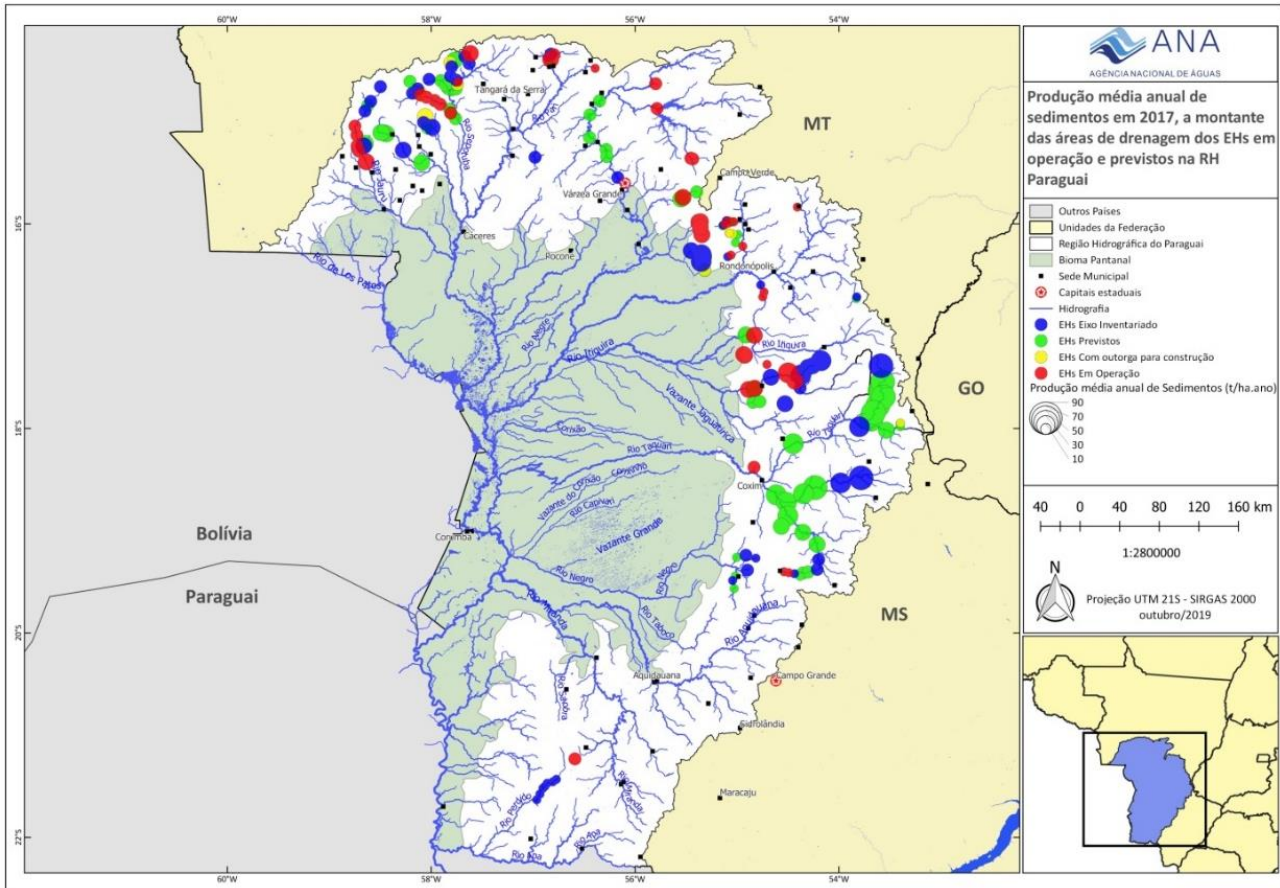


Figura 16. Produção média anual de sedimentos (t/ha) na bacia de drenagem a montante dos empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos localizados na Região Hidrográfica do Paraguai.

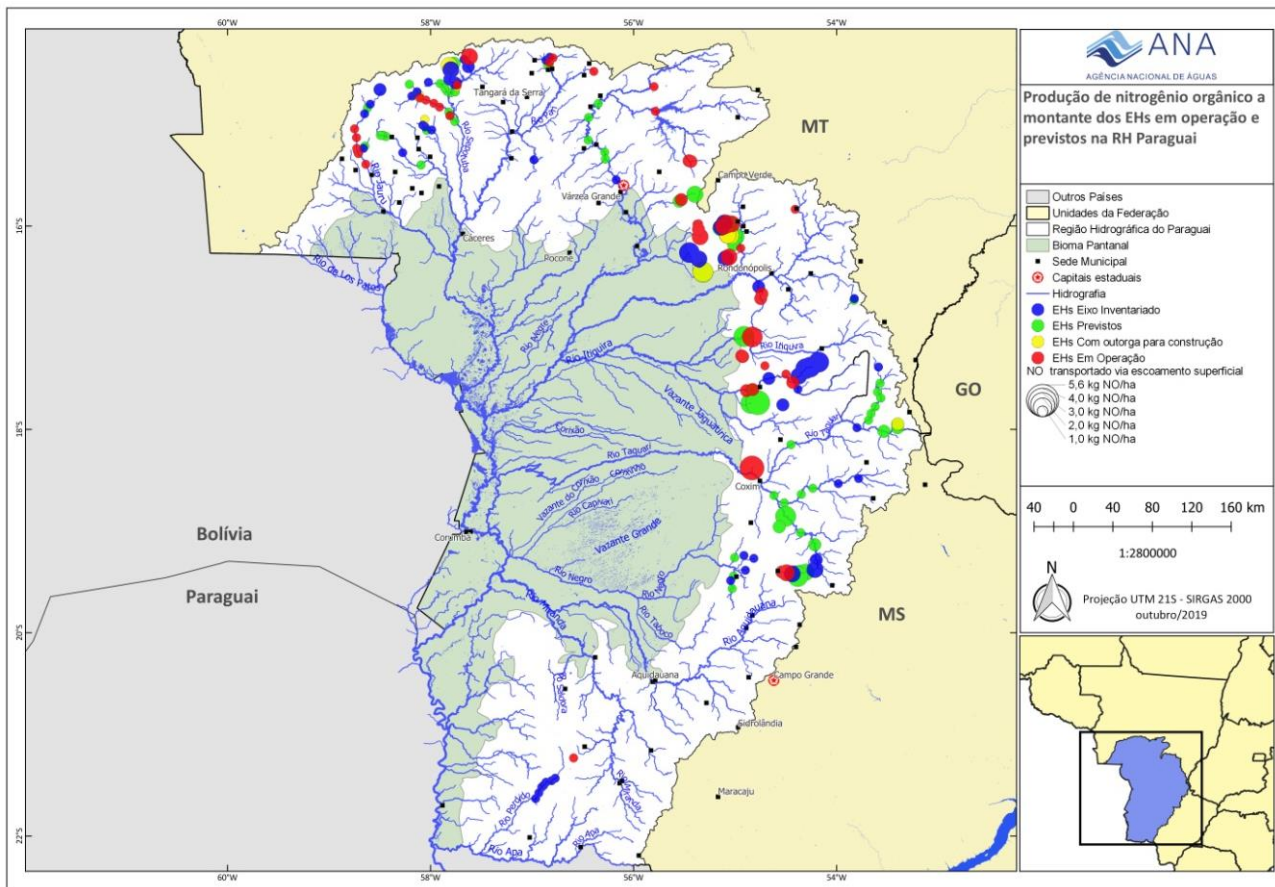


Figura 17. Produção média de nitrogênio orgânico (kg NO/ha) produzido na bacia de drenagem a montante dos empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos na Região Hidrográfica do Paraguai.

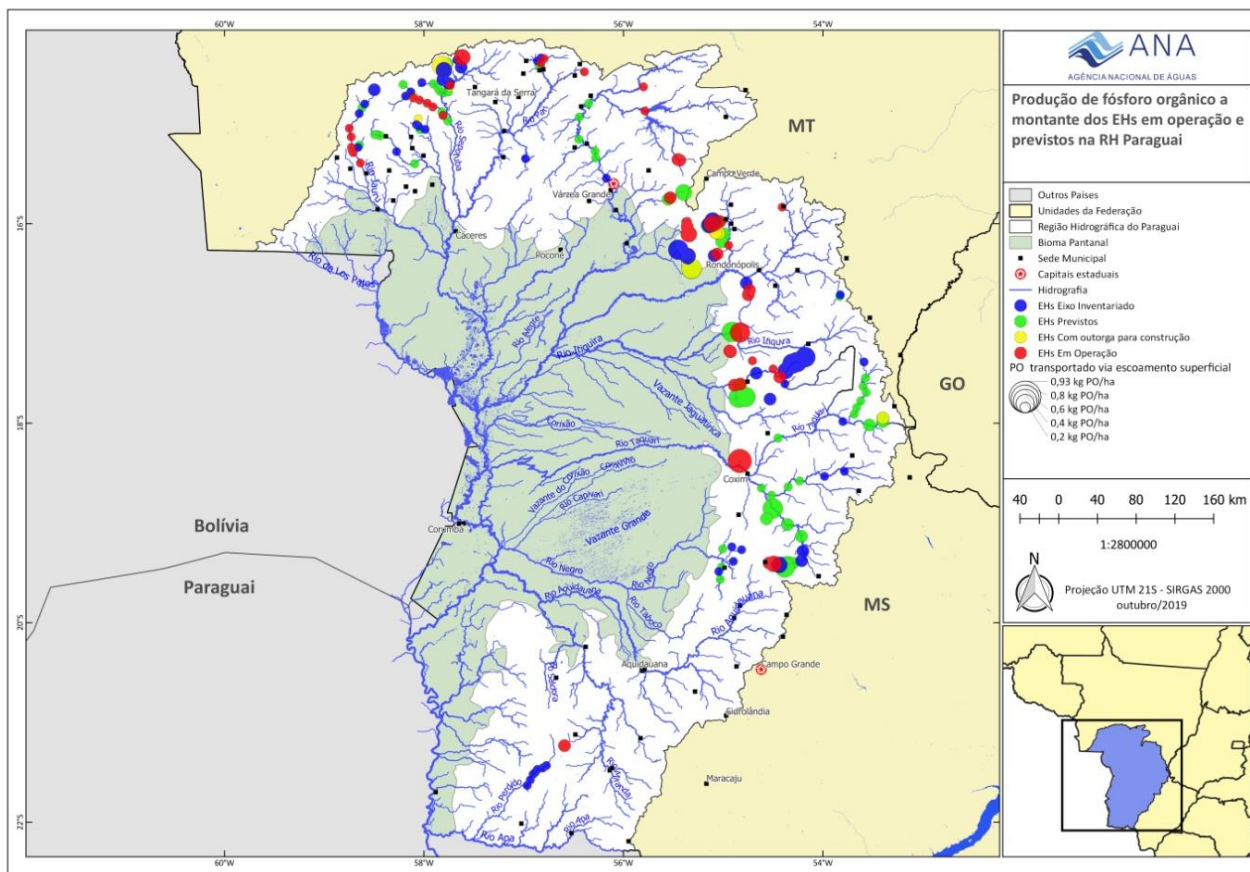


Figura 18. Produção média de fósforo orgânico (kg PO/ha) produzido na bacia de drenagem a montante dos empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos na Região Hidrográfica do Paraguai.

Dados dos empreendimentos em operação

Foram utilizados dados de montante e jusante de 34 empreendimentos hidrelétricos localizados no planalto da RH Paraguai (Tabela 2). Os parâmetros modelados, selecionados abaixo, tem correlação com usos e tipos de solo e, por conseguinte, com as cargas difusas das áreas de drenagem.

- Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)
- Concentração de Nitrogênio total (mg/L)
- Concentração de Fósforo total (mg/L)

Foram utilizados 571 registros de CSS (mg/L), 622 registros de fósforo total (mg/L) e 577 registros de nitrogênio total (mg/L). Informações sobre os dados dos empreendimentos e a quantidade de registros (relativos à base de dados primários e secundários) em cada EH, para cada parâmetro modelado, estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. EHs utilizados na modelagem das taxas de alteração de parâmetros da qualidade da água e hidrossedimentológicos.

Empreendimento	Área de Drenagem (km ²)	Área Alagada (km ²)	Volume total (m ³)	CSS	Fósforo	Nitrogênio
PCH Água Prata	333,72	0,001	4000	11 registros	11 registros	11 registros
PCH Alto Paraguai	340,09	1	1900	3 registros	16 registros	10 registros
PCH Antônio Brennand	1790,97	0,045	420000	22 registros	26 registros	25 registros
PCH Cambará	340,08	0,001	39000	5 registros	5 registros	1 registro
Cascata PCH Casca II + Casca III	722,15	0,272	1240000	-	7 registros	3 registros
PCH Diamante	528,41	0,49	750000	14 registros	8 registros	7 registros
Cascata PCH Diamante + Santana I	804,00	1,66	5150000	12 registros	13 registros	13 registros
PCH Embaúba	341,53	0,09	282000	4 registros	-	-
PCH Figueirópolis	2774,2	7,44	34936000	24 registros	24 registros	24 registros
PCH Graça Brennand	1881,94	5,92	64400000	40 registros	44 registros	45 registros
PCH Indiavaí	2237,44	0,224	2050000	10 registros	12 registros	10 registros
Cascata PCH Indiavaí + Salto	2657,00	1,28	5350000	12 registros	12 registros	12 registros
PCH Jonas Pinheiro	22,29	0,24	5532000	13 registros	-	-
PCH Eng. José Gelázio da Rocha	1750,52	0,27	2100000	18 registros	19 registros	19 registros
PCH Maracanã	109,13	0,381	533000	5 registros	5 registros	3 registros
Cascata PCH Mestre + Santa Cecília	40,23	0,001	87500	4 registros	3 registros	3 registros
PCH Ombreiras	2116,7	2,9054	49360000	35 registros	36 registros	36 registros
PCH Pampeana	1967,62	4,17	40300000	27 registros	32 registros	30 registros
PCH Pequi	338,64	0,02	39000	6 registros	4 registros	2 registros
PCH Poxoréo	94,50	0,21	270000	11 registros	34 registros	16 registros
PCH Rio do Sapo	3585,38	1,0055	1080237,5	2 registros	2 registros	2 registros
PCH Rondonópolis	1816,41	0,204	146000	10 registros	29 registros	31 registros
PCH Salto	2262,77	1,06	3300000	20 registros	22 registros	21 registros
PCH Santana	756,07	1,17	4400000	7 registros	6 registros	5 registros
PCH São Lourenço	5720,93	1290	100630000	28 registros	37 registros	42 registros
PCH São Tadeu	260,32	0,46	35000	19 registros	19 registros	19 registros
PCH Sete Quedas Altas	395,98	0,38	1600000	19 registros	19 registros	19 registros
PCH Sucupira	364,56	0,07	240000	19 registros	8 registros	1 registro
UHE Itiquira	5217,04	2,1	4800000	45 registros	29 registros	26 registros
UHE Jauru	2226,36	2,62	20140000	36 registros	28 registros	36 registros
UHE Juba I	1510,79	0,82	4700000	12 registros	28 registros	28 registros
UHE Juba II	1787,81	2,5	9400000	13 registros	30 registros	29 registros
Cascata UHE Juba I + II	1787,81	3,32	14100000	18 registros	-	-
UHE Ponte de Pedra	3965,00	14,5	111000000	47 registros	54 registros	48 registros
			TOTAL	571 registros	622 registros	577 registros

Estatística descritiva dos dados

As estatísticas descritivas dos dados utilizados nos modelos, tanto para variáveis de entrada, quanto de saída, são fundamentais para a posterior utilização dos modelos, principalmente em relação à extrapolação do domínio das variáveis (máximos e mínimos). Os modelos de natureza empírica devem sempre ser utilizados considerando o domínio dos dados, isso porque erros podem ser cometidos ao se usar dados com magnitude fora do domínio dos dados do treinamento. Por exemplo, usar um modelo empírico em bacias muito maiores, ou muito menores do que o tamanho das bacias que foram usadas para o ajuste do modelo, pode levar a estimativas erradas e incoerentes com a realidade.

Para análise das estatísticas descritivas dos dados que compõem os modelos teste, separou-se as variáveis em quatro grupos: variáveis de caracterização dos empreendimentos; variáveis referentes ao tipo de solo; variáveis referentes ao uso e ocupação do solo; e os parâmetros que serão modelados.

Na Tabela 3 estão apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis de caracterização dos empreendimentos. O período de chuva é uma variável binária, em que 0 refere-se ao período seco; e 1 refere-se ao período chuvoso. As demais variáveis são quantitativas.

Tabela 3. Estatísticas descritivas das variáveis de caracterização dos empreendimentos.

Características dos Empreendimentos	Mín	Máx	Média	Mediana	Desv Pad
1 Período de Chuva	0,0	1,0	0,6	1,0	0,5
2 Área Alagada (km ²)	0,001	1290,0	55,5	2,1	253,4
3 Volume Total (hm ³)	0,0019	111,0	31,7	5,5	39,6
4 Tempo Retenção (dias)	0,0	237,1	10,7	3,9	25,5
5 Área Drenagem (km ²)	22,3	5720,9	2223,3	1967,6	1668,9
6 Altitude (m)	205,0	522,0	345,4	363,0	85,8

Nas Tabela 4 e na Tabela estão mostradas, respectivamente, as estatísticas de descrição das classes de tipo de solo e uso e ocupação da terra das áreas de drenagem dos empreendimentos. Para o tipo de solo, as classes com maiores valores, em termos de médias e medianas, foram os Neossolos Quartzarenicos Orticos, os Latossolos Vermelhos Distróficos e os Argissolos Vermelho Amarelo Distróficos. Isso significa dizer que dentre as 11 classes de tipo de solo presentes nas áreas de drenagem dos empreendimentos, as três supracitadas são as mais frequentes.

Tabela 4. Estatísticas descritivas das 11 classes de tipo de solo nas áreas de drenagem dos EHs.

Classes de Tipo de Solo (Área em km ²)	Mín	Máx		Média	Mediana	Desv Pad
Argissolo Vermelho Eutrófico	0,0	1694,5		99,4	0,0	331,9
Argissolo Vermelho Distrófico	0,0	468,9		33,5	0,0	106,8
Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico	0,0	2490,9		142,7	4,0	247,9
Neossolo Quartzarenico Ortico	0,0	3394,9		1264,3	1218,8	949,8
Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico	0,0	128,3		1,0	0,0	11,5
Latossolo Vermelho Distrófico	0,0	2452,8		613,6	304,9	783,0
Latossolo Vermelho Distroférico	0,0	627,1		4,5	0,0	46,1
Cambissolo Haplico Distrófico	0,0	211,8		1,7	0,0	19,0
Plintossolo Haplico Distrófico	0,0	10,5		0,4	0,0	2,1
Plintossolo Pétrico Concrecionário	0,0	1328,1		57,9	0,0	261,7
Nitossolo Vermelho Distrófico	0,0	66,5		4,1	0,0	14,0

Para o uso e ocupação do solo, as classes mais presentes nas áreas de drenagem dos empreendimentos foram agricultura, pastagem, savana arborizada, savana gramínea, formações florestais e alteração antrópica, conforme Tabela 5. Quando as médias e as medianas são iguais ou próximas de zero, significa que a variável possui muitos registros com valores iguais a zero (é o caso de algumas classes de tipo de solo e uso e ocupação do solo, que ocorrem apenas em pequenas porções da área de drenagem dos empreendimentos).

Tabela 5. Estatísticas descritivas de uso da terra presentes nas áreas de drenagem dos EHs.

Classes de Uso da Terra (Área em km ²)	Mín	Máx	Média	Mediana	Desv Pad
Agricultura	0,0	8147,0	767,6	84,1	1567,3
Água	0,0	16,6	5,9	3,8	6,0
Alteração Antrópica	1,1	319,5	65,4	61,6	70,3
Alteração Natural	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Degradado por Mineração	0,0	2,6	0,1	0,0	0,4
Formações Florestais	0,0	625,8	119,8	136,7	127,3
Influência Urbana	0,0	25,6	1,9	0,0	4,6
Pastagem	0,8	1889,3	580,0	305,0	618,7
Reflorestamento	0,0	144,0	33,1	0,0	57,3
Savana Arborizada	11,2	4464,0	412,3	335,5	735,6
Savana Estépica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Savana Estépica Úmida	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Savana Florestada	0,0	691,0	344,2	378,5	237,7
Savana Gramínea	0,0	770,9	296,8	362,0	235,9
Vegetação com Influência Fluvial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Na Tabela 6 estão apresentadas as estatísticas descritivas dos três parâmetros modelados, com relação aos dados de montante, jusante e a taxa de alteração absoluta do parâmetro (diferença absoluta entre o valor de jusante menos o de montante). Valores negativos indicam que o parâmetro reduziu seu valor, enquanto os valores positivos indicam aumento.

Tabela 6. Estatísticas descritivas dos parâmetros de montante e jusante.

Parâmetros	Mín	Máx	Média	Mediana	Desv Pad
Vazão Montante (m³/s)	0,27	329,96	48,77	53,10	37,72
Vazão Jusante (m³/s)	0,26	672,00	55,53	57,16	50,53
CSS Montante (mg/l)	0,10	480,70	24,17	7,04	50,90
CSS Jusante (mg/l)	0,02	266,00	14,15	5,26	26,35
Taxa de Alteração CSS Absoluta (mg/l)	-471,88	48,70	-10,02	-0,38	40,20
Descarga Sólida Montante	0,00	3249,97	148,48	13,17	410,08
Descarga Sólida Jusante	0,00	4821,41	94,68	15,63	332,42
Taxa de Alteração Descarga Sólida	-2020,55	1816,68	-53,80	-0,60	267,84
Turbidez Montante	0,01	245,00	11,30	4,69	24,09
Turbidez Jusante	0,01	223,00	11,68	4,00	22,37
Taxa de Alteração Turbidez Absoluta	-131,00	160,00	0,38	0,00	17,39
Fósforo Total Montante	0,01	0,95	0,07	0,04	0,10
Fósforo Total Jusante	0,01	1,00	0,06	0,04	0,09
Taxa de Alteração Fósforo Absoluta	-0,50	0,45	0,00	0,00	0,07
Nitrogênio Total Montante	0,01	14,00	1,55	0,38	2,92
Nitrogênio Total Jusante	0,01	13,64	1,49	0,40	2,80
Taxa de Alteração Nitrogênio Absoluta	-9,13	5,60	-0,06	0,00	1,27
Ferro Total Montante	0,01	5,92	0,36	0,10	0,76
Ferro Total Jusante	0,01	6,16	0,36	0,10	0,74
Taxa de Alteração Ferro Absoluta	-3,99	4,64	0,00	0,00	0,57

Coefficiente de correlação linear (Pearson)

Análises preliminares das relações entre as variáveis de entrada e os parâmetros de jusante (parâmetros que serão modelados) foram feitas com o uso do coeficiente de correlação linear de Pearson. Foi calculado o coeficiente de correlação linear e o respectivo *p-value* (que corresponde à probabilidade de erro com a rejeição da hipótese H_0 , de que não existe relação linear), com o uso da distribuição de *Student*, para cada parâmetro de jusante individualmente, conforme a Tabela 7. Os coeficientes de correlação cujo *p-value* foi maior que 0,05 (ou seja, correlações com pouca significância) foram destacados na Tabela 7.

Tabela 7. Correlações de Pearson entre as variáveis de entrada e os parâmetros de Jusante.

Variáveis de Entrada	Variáveis de Saída (Parâmetro de Jusante)		
	CSS	Fósforo Total	Nitrogênio Total
Período de Chuva	0,12	0,16	0,03*
Área Alagada (km ²)	0,07*	0,14	-0,11
Volume Total (m ³)	0,08*	0,01*	-0,16
Tempo Retenção (dias)	0,06*	0,07*	-0,12
Área Drenagem (km ²)	0,23	0,03*	-0,18
Altitude (m)	0,01*	0,04*	0,08*
Vazão Montante (m ³ /s)	0,33	0,01*	0,05*
Vazão Jusante (m ³ /s)	0,24	0,01*	0,06*
Agricultura	0,08*	0,13	-0,24
Água	0,05*	0,06*	-0,14
Alteração Antrópica	0,28	0,07*	-0,14
Degradado por Mineração	0,06*	0,01*	0,04*
Formações Florestais	0,25	0,09*	0,05*
Influência Urbana	0,06*	0,10	-0,17
Pastagem	0,06*	0,02*	-0,24
Reflorestamento	0,10	0,01*	-0,22
Savana Arborizada	0,01*	0,02*	0,00*
Savana Florestada	0,09*	-0,16	0,15
Savana Gramínea	0,22	0,02*	-0,12
Argissolo Vermelho Eutrófico	0,09*	0,14	-0,11
Argissolo Vermelho Distrófico	0,03*	0,02*	-0,13
Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico	0,10	0,00*	-0,18
Neossolo Quartzarênico Ortico	0,34	0,03*	0,09*
Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico	0,02*	0,09*	0,01*
Latossolo Vermelho Distrófico	0,02*	-0,10	-0,10
Latossolo Vermelho Distroférrico	0,04*	0,04*	0,03*
Cambissolo Háplico Distrófico	0,02*	0,09*	0,01*
Plintossolo Háplico Distrófico	0,07*	0,14	-0,11
Plintossolo Pétrico Concrecionário	0,07*	0,14	-0,11
Nitossolo Vermelho Distrófico	0,04*	0,08*	0,13
Parâmetro de Montante	0,62	0,69	0,90

*p-value > 0,05

Observa-se a ocorrência de correlações lineares positivas e negativas. Conforme já é esperado, os parâmetros de montante foram as variáveis de entrada que apresentaram os maiores coeficientes de correlação de Pearson com os seus respectivos parâmetros de jusante. As vazões de Montante e Jusante apresentaram correlações significativas para a CSS. Para os demais parâmetros esta variável não apresentou boa correlação. Para a CSS as variáveis que melhor se correlacionaram foram as Vazões de Montante e Jusante, a Área de Drenagem, as classes de uso da terra Alteração Antrópica e Formações Florestais, e o tipo de solo Neossolo Quartzarenico Ortico.

O fósforo foi o parâmetro que apresentou o maior número de correlações não significativas com as variáveis de entrada testadas (*p-value* maior que 0,05). A única correlação considerável foi com o próprio parâmetro de montante.

Além do parâmetro de montante, o nitrogênio também apresentou elevada correlação linear com a Área de Drenagem e as classes de uso da terra Agricultura, Pastagem e Reflorestamento (ambas com correlações negativas).

Modelos testados, variáveis de entrada e estatísticas

Foram testados diversos modelos de Redes Neurais Artificiais para cada um dos parâmetros avaliados. Para a construção dos modelos, foram utilizadas as redes neurais do tipo *feedforward* com apenas uma camada intermediária. Os recursos para o uso das RNAs foram todos programados em código Matlab® R2012b, sem o uso de pacotes prontos disponibilizados para este fim.

Para o treinamento dos modelos, utilizou-se o algoritmo retropropagativo (RUMELHART et al., 1986), juntamente com técnicas de aceleração de treinamento (VOGL et al., 1988). A função sigmoide unipolar foi adotada para todos os neurônios. O superajustamento dos dados foi evitado utilizando a técnica de validação cruzada (HECHT-NIELSEN, 1989).

A definição da complexidade (número de neurônios na camada interna) das redes foi feita fixando valores elevados de neurônios na camada intermediária, de acordo com a quantidade de variáveis de entrada, que conferem graus de liberdade suficientes para que a rede ajuste as relações. Como a validação cruzada foi utilizada para evitar o superajustamento da rede, um número elevado de neurônios internos não provoca o superajustamento do modelo. Para os modelos finais, pretende-se realizar a pesquisa da complexidade mínima da camada intermediária. No entanto, este procedimento não implica em melhoria no desempenho dos modelos, mas proporciona redução de custo computacional na utilização dos modelos.

Em cada treinamento, foram feitas 20 repetições, cada uma delas com inicializações aleatórias dos pesos sinápticos, adotando-se os pesos resultantes da repetição com o melhor desempenho final, avaliado na amostra de validação, de modo a minimizar a influência da inicialização aleatória sobre os resultados.

Para o treinamento com validação cruzada, os dados foram divididos em três partes (treinamento, validação e verificação), conforme a Tabela 8, utilizando o método de amostragem sistemática do domínio, de forma que os dados de todos os empreendimentos estejam presentes nas três amostras. Os ciclos foram fixados em 300.000.

Tabela 8. Separação de amostras para treinamento, validação e verificação do modelo de Redes Neurais.

	Separação de Amostras		
	Treinamento	Validação	Verificação
Modelos de CSS	305	151	115
Modelos de Fósforo Total	286	125	166
Modelos de Nitrogênio Total	267	114	179

Seleção das variáveis de entrada

Foram testadas diversas combinações de variáveis de entrada para cada parâmetro, incluindo modelos com todas as variáveis previamente selecionadas (características físicas dos EHs, as classes de tipo de solo, as classes de uso e ocupação do solo e o próprio parâmetro de montante), modelos apenas com as variáveis de caracterização física dos EHs e o parâmetro de montante como entrada. Esta configuração foi proposta em função de maior simplicidade na obtenção das variáveis de entrada. Ainda na mesma proposta de simplicidade, foram testados modelos utilizando como entrada somente o próprio parâmetro de montante.

As configurações finais dos modelos utilizados para estimar as alterações na BAP são apresentadas a seguir:

CSS

Dados de Entrada – 26 entradas

- Área de Drenagem (km²)
- Área Alagada (km²)
- Volume Total (m³)
- Produção anual de sedimentos na área de drenagem (ton/ha/ano)
- 11 classes de uso da terra
- 10 classes de tipo de solo
- CSS de montante (mg/L)

Dados de Saída – 1 saída

- Alteração absoluta da CSS (mg/L)

Nitrogênio total

Dados de Entrada – 16 entradas

- Área de Drenagem (km²)
- Área Alagada (km²)
- Volume Total (m³)
- Produção anual de Nitrogênio na área de drenagem (ton/ha/ano)
- 11 classes de uso da terra
- N de montante (mg/L)

Dados de Saída – 1 saída

- Nitrogênio Total de Jusante (mg/L)

Fósforo total

Dados de Entrada – 6 entradas

- Área de Drenagem (km²)
- Área Alagada (km²)
- Volume Total (m³)
- Produção anual de Fósforo na área de drenagem (ton/ha/ano)

- 1 classe de uso da terra - Agricultura
- N de montante (mg/L)

Dados de Saída – 1 saída

- Fósforo Total de Jusante (mg/L)

Estatísticas de Desempenho

Para avaliar o desempenho dos modelos desenvolvidos, foram usadas estatísticas com base nos erros na saída da rede, sendo elas: erro absoluto médio – E méd, o erro absoluto máximo – E máx e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970) ou NS. O NS varia de $-\infty$ até 1, valores próximos de 1 representam capacidade grande de aproximação; valores \leq zero indicam que o valor médio de Y é uma melhor aproximação do que os valores calculados de Y_i .

A Equação a seguir apresenta o cálculo do NS:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{méd})^2}$$

onde: T_i são os dados observados;
 $T_{méd}$ é a média dos dados observados; e
 Y_i são os dados calculados pelo modelo.

A aplicação de modelos clássicos de RNAs, para avaliar o potencial de retenção de sedimentos e nutrientes dos novos EHS na RH Paraguai, requer previamente a estatística descritiva e de desempenho para validação dos dados que são utilizados nos modelos (tanto para variáveis de entrada quanto de saída) e para as etapas de treinamento e verificação, respectivamente, cujos resultados estão descritos a seguir.

Resultados da Calibração

Na Tabela 9 estão apresentadas as estatísticas de desempenho dos modelos desenvolvidos para cada parâmetro. O desempenho é apresentado para o conjunto de dados do treinamento e da verificação. Esta, que por sua vez, não participou de nenhuma etapa do ajuste modelo. Nas Figura 19, 20 e 21 estão mostradas as comparações visuais dos dados observados e os calculados pelos modelos finais desenvolvidos.

Tabela 9. Desempenho dos modelos de estimativa da alteração da carga de sedimentos em suspensão (mg/L) nos empreendimentos hidrelétricos previstos da RH Paraguai (M=modelos).

		E máx (mg/L)	E méd (mg/L)	NS
Modelo CSS	Treinamento	50,86	7,35	0,889

	Verificação	65,87	8,16	0,826
Modelo Nitrogênio	Treinamento	5,73	0,59	0,847
	Verificação	5,66	0,56	0,823
Modelo Fósforo	Treinamento	1,01	0,015	0,712
	Verificação	1,05	0,017	0,606

Em geral, os modelos apresentaram coeficiente de Nash-Sutcliffe – NS bastante satisfatório, com valores acima de 0,7 chegando a ultrapassar 0,8 para sedimentos e nitrogênio.

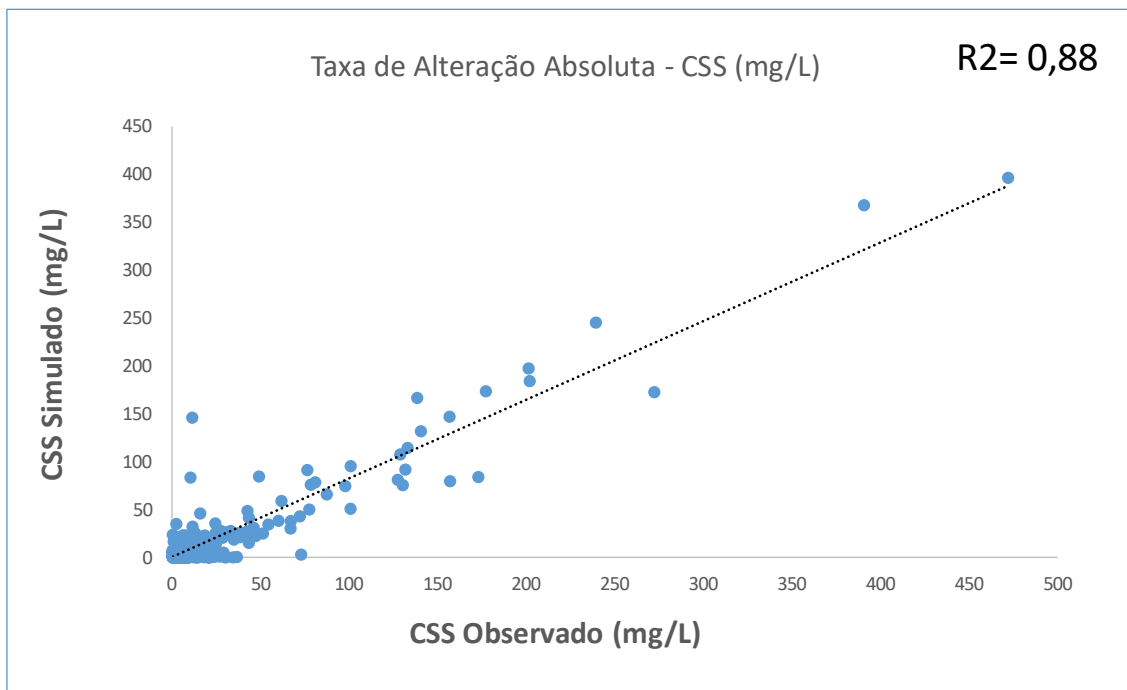


Figura 19. Relação entre dados observados e calculados do Modelo de CSS – Taxa de alteração absoluta da concentração de sedimento em suspensão.

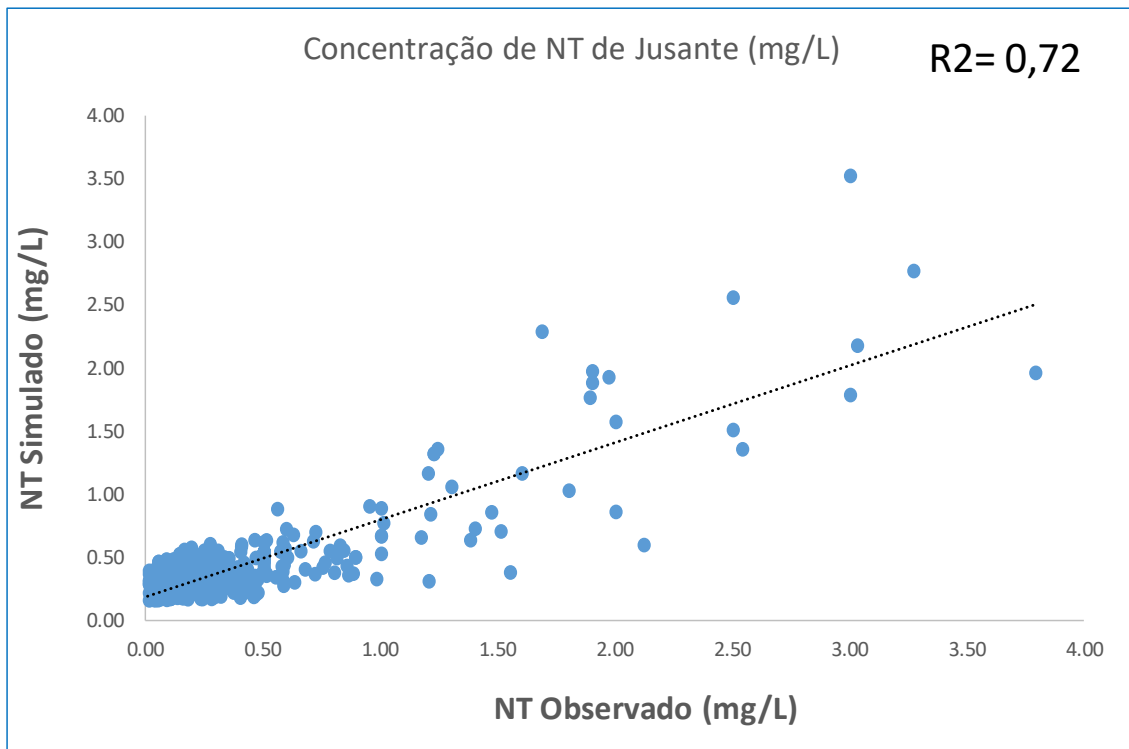


Figura 20. Relação entre dados observados e calculados do Modelo de N – Concentração do nitrogênio total de jusante.

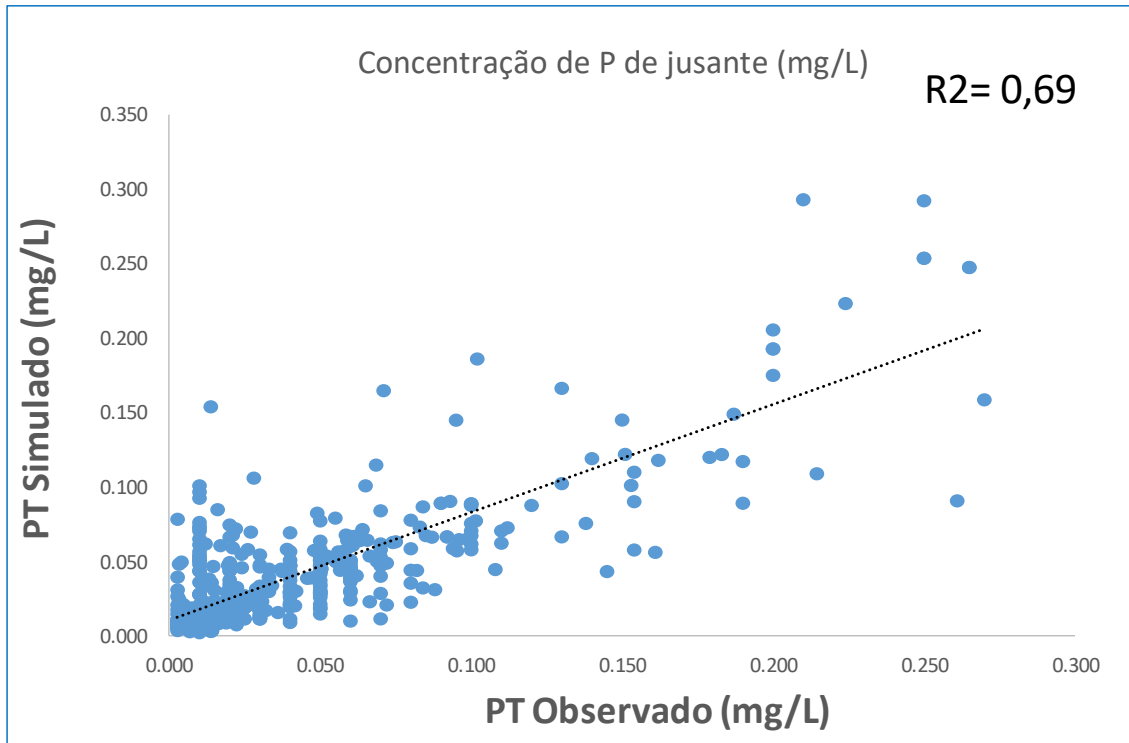


Figura 21. Relação entre dados observados e calculados do Modelo 02 – Taxa de alteração do fósforo total e jusante.

Considerações sobre os modelos desenvolvidos

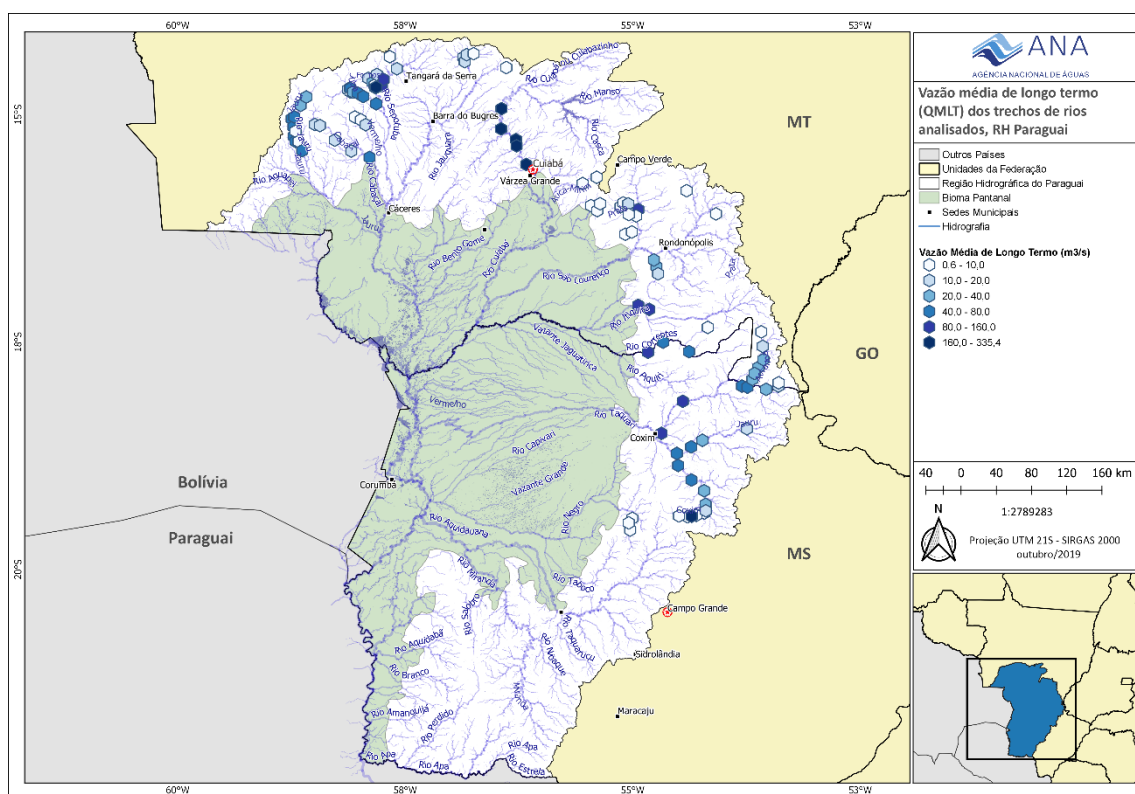
O desempenho observado nos modelos apresentados (treinamento e verificação) é satisfatório e mostra que é possível estimar a alteração causada por novos EHs na RH Paraguai a partir do conhecimento de características físicas dos empreendimentos e o conhecimento do parâmetro a montante do empreendimento. Melhorias são promovidas nos modelos de CSS quando classes de tipo de solo e de uso e ocupação do solo são inseridas como entrada. Porém, modelos sem estas variáveis também podem ser utilizados. Foram feitos também testes de modelos sem considerar o parâmetro de montante como entrada, mas os resultados foram muito ruins.

5. Resultados

5.1. Transporte de sedimentos, carbono, nutrientes (suspensos e do leito) e solutos dissolvidos nos rios da RHP, com empreendimentos hidrelétricos em operação e previstos

Vazão

Os pontos analisados representam trechos de rios com vazões médias de longo termo entre 0,5 a 374 m³/s, sendo que na maioria deles (56%) esta média é menor do que 25 m³/s (Figura 22). As maiores vazões são dos principais rios da RHP como o Taquari, Cuiabá e Sepotuba, em seções mais próximas dos limites da planície do Pantanal. Os rios com menor vazão foram os da região do Alto Paraguai (Paraguai, Santana, Maracanã e Sapo), os afluentes da margem esquerda do rio Cuiabá (Gloria, Mestre e Caeté), os afluentes do rio São Lourenço (Tenente Amaral, Prata e Ibó) e o rio Negro.



Dentre o conjunto de EHs em operação na RHP considerado neste estudo, 63% (24 PCHs) está instalado em seções de rios com vazão média menor do que 50 m³/s, principalmente nos rios da região do Alto Paraguai, rio Santana, afluentes da margem esquerda do rio Cuiabá e da margem direita do rio São Lourenço e na primeira PCH do Jauru. Porém, existe um grupo menor de EHs (13 PCHs) instalado em rios maiores (vazão entre 50 e 100 m³/s), que são os rios Jauru, Juba, São Lourenço, Itiquira e Correntes (Tabela 10).

Tabela 10. Vazão média de longo termo nos trechos de rios com empreendimentos hidrelétricos em operação (Fonte: Empreendedores).

Empreendimento	Rio	QMLT (m³/s)
PCH São Tadeu I	Aricá-Mirim	6,3
PCH Senador Jonas Pinheiro	Caeté	0,8
PCH Casca II	Casca	8,3
PCH Casca III	Casca	8,5
PCH Santa Gabriela	Correntes	54,2
UHE Ponte de Pedra	Correntes	80,7
PCH Aquarius	Correntes	14,0
PCH Ponte Alta	Coxim	5,9
PCH Sete Quedas Alta	Ibó	12,2
UHE Itiquira	Itiquira	72,9
PCH Antônio Brennand	Jauru	46,5
PCH Ombreiras	Jauru	60,0
PCH Indiavaí	Jauru	70,1
UHE Jauru	Jauru	85,5
PCH Figueirópolis	Jauru	102,0
PCH Salto	Jauru	79,9
UHE Juba I	Juba	55,2
UHE Juba II	Juba	61,3
PCH Graça Brennand	Juba	77,9
PCH Pampeana	Juba	80,0
PCH Maracanã	Maracanã	4,5
PCH Mestre	Mestre	1,1
PCH Santa Cecília	Mestre	1,5
PCH Alto Paraguai	Paraguai	7,1
PCH Eng. José Gelázio da Rocha	Ponte de Pedra	26,9
PCH Rondonópolis	Ponte de Pedra	28,6
PCH Poxoréu	Poxoréu	8,8
PCH Água Prata	Prata	9,9
PCH Água Brava	Prata	10,4
PCH Pequi	Saia Branca	10,2
PCH Sucupira	Saia Branca	11,0
PCH Diamante	Santana	12,9

PCH Santana	Santana	7,8
PCH São Lourenço	São Lourenço	108,0
PCH Rio do Sapo	Sapo	18,2
PCH Cambará	Tenente Amaral	10,0
PCH Embaúba	Tenente Amaral	10,0
PCH Cachoeir da Fumaça	Tenente Amaral	13,0

Dentre os EHs previstos, a maioria, 65% (52 PCHs), também está prevista em rios pequenos, com vazão média de até 25 m³/s, como nos rios Juba, Aricá, Prata, Santana, Maracanã, São Francisco de Paula, Paraguai, Tenente Amaral, Prata, Ibó, Beleza, Glória, Caeté, entre outros (Tabela 1 do Anexo I). Um segundo grupo de 17 PCHs (21%) está previsto nos rios com vazão média entre 25 e 100 m³/s, que são principalmente os afluentes do Taquari, rio Santana e Formoso; e um terceiro grupo com 11 PCHs em rios com vazão média acima de 100 m³/s, no qual estão os rios Taquari, Cuiabá e Sepotuba.

Condutividade elétrica

Nas águas dos rios estudados, a condutividade elétrica geralmente foi baixa, não ultrapassando 20 µS/cm na maioria dos rios (Figura 23). Nos rios Cabaçal, Jauru-MT foz, Cuiabá e Aquidauana a condutividade é em torno de 70 µS/cm e alcança mediana de até 200 µS/cm no rio Miranda. Oliveira et al. (2019) e Rezende et al. (2012) já mostraram esta diferenciação das águas na RHP, onde também verificaram pH levemente ácido, entre 6,0 e 7,0 na parte norte e média da bacia e menor do que 5,0 nos rios Juba, Jubinha, Prata e Ibó. Já nos rios Cuiabá, Tenente Amaral, Miranda e Aquidauana as medianas de pH mostram águas mais básicas, com pH superior a 7.

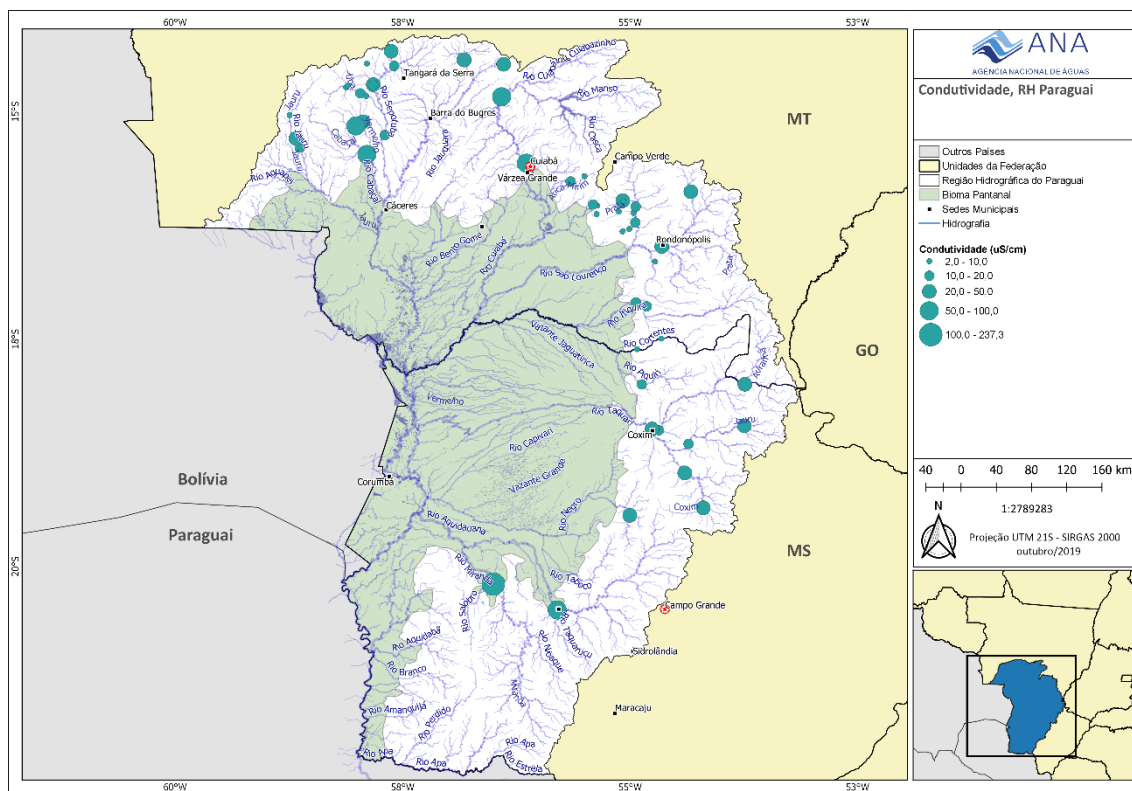


Figura 23. Mediana da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP

Sedimentos em suspensão (SS) e no leito

A contribuição dos pequenos rios para o transporte de SS para a RHP é geralmente reduzida, porém, de grande importância local em sub-bacias como a do Sepotuba, cujas águas são mais diluídas, ou seja, transportam pouco sedimento. Afluentes da margem esquerda do Cuiabá e da margem direita do rio São Lourenço (que fluem para o reservatório da PCH São Lourenço) também transportam baixas cargas de sedimento (Figura 24).

Na seção do rio Taquari selecionada para este estudo, localizada à montante da entrada dos rios Coxim e Jauru, a mediana da carga de sedimento foi próxima a 1.500 ton./dia e no trecho final dos rios Coxim e Jauru foi em torno de 500 ton./dia. Com maior volume de água e também altas concentrações de sedimento, a seção do rio Taquari a jusante da sede municipal de Coxim, tem a maior carga de sedimento transportada pelos principais rios da RHP, refletindo uma provável influência das cargas oriundas da área urbana. Nesta seção existem registros de 4 até 20.000 ton./dia de SS em estudos anteriores (SEMMELMANN et al., 1996, PADOVANI et al., 2005 e OLIVEIRA et al., 2019).

O rio Cuiabá tem menor concentração de SS, mas a segunda carga de SS da RHP, pelo seu volume de água (293 m³/s, QMLT), seguido pelo rio Vermelho, afluente da margem direita do rio São Lourenço, e pelo rio São Lourenço. Os rios Aquidauana e Miranda também contribuem com importantes cargas de sedimentos na RHP (Figura 24).

Nos rios da RHP predomina o transporte de sedimentos em suspensão, mas em alguns rios se destaca o transporte de leito, como se observou no rio Taquari, cuja mediana foi de 47,23 ton./dia, e seus afluentes, seguido pelos rios Itiquira-JUS UHE, São Lourenço, montante PCH, Vermelho afluente Jauru-MT, Formoso e Cuiabá (Figura 25).

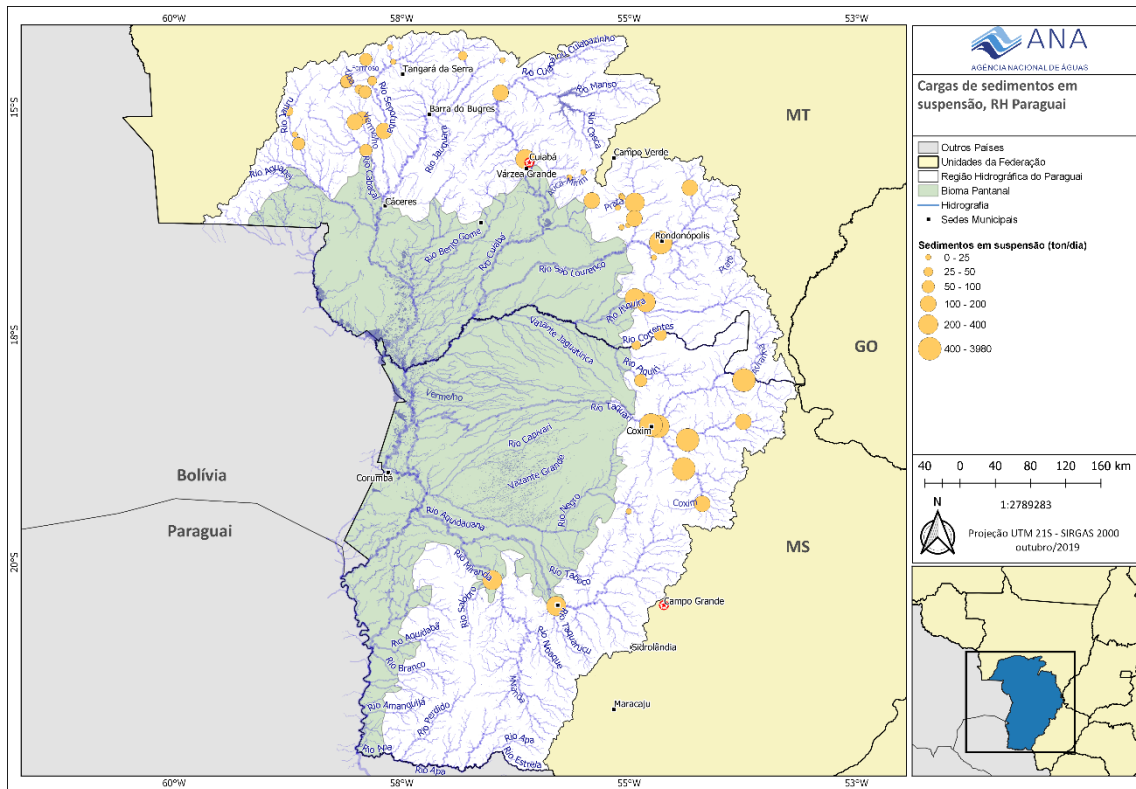


Figura 24. Mediana das cargas de sedimento em suspensão (ton./dia) transportada pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

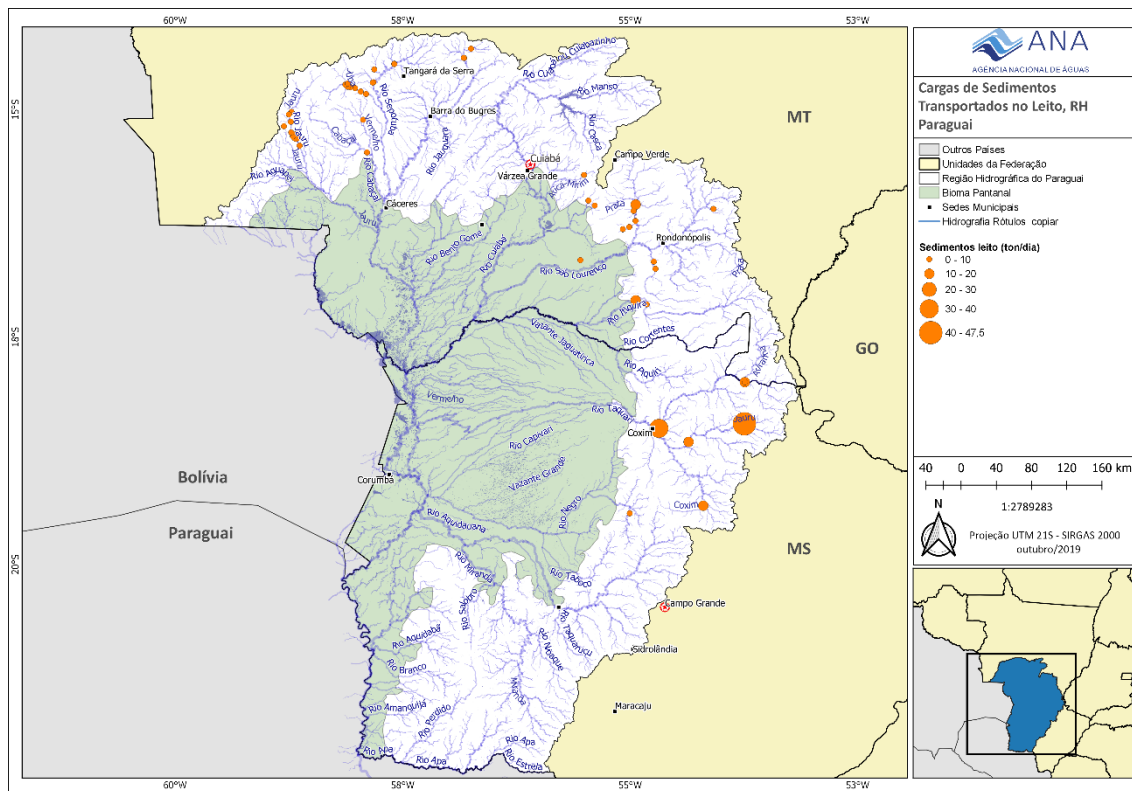


Figura 25. Mediana da carga de sedimentos (ton./dia) transportada no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

Turbidez

Em rios com maior transporte de sedimentos, observa-se tendência a águas mais turvas, como nos rios Taquari e seus afluentes, São Lourenço, Itiquira, Cabaçal, Juru-MT e Vermelho (afluente do Juru, em MT). Na parte norte da bacia, onde os rios têm menor concentração e carga de SS, a turbidez foi mais baixa, em geral menor que 10 NTU (Figura 26), com exceção do rio Cabaçal, Juru-MT, Vermelho e Aricá.

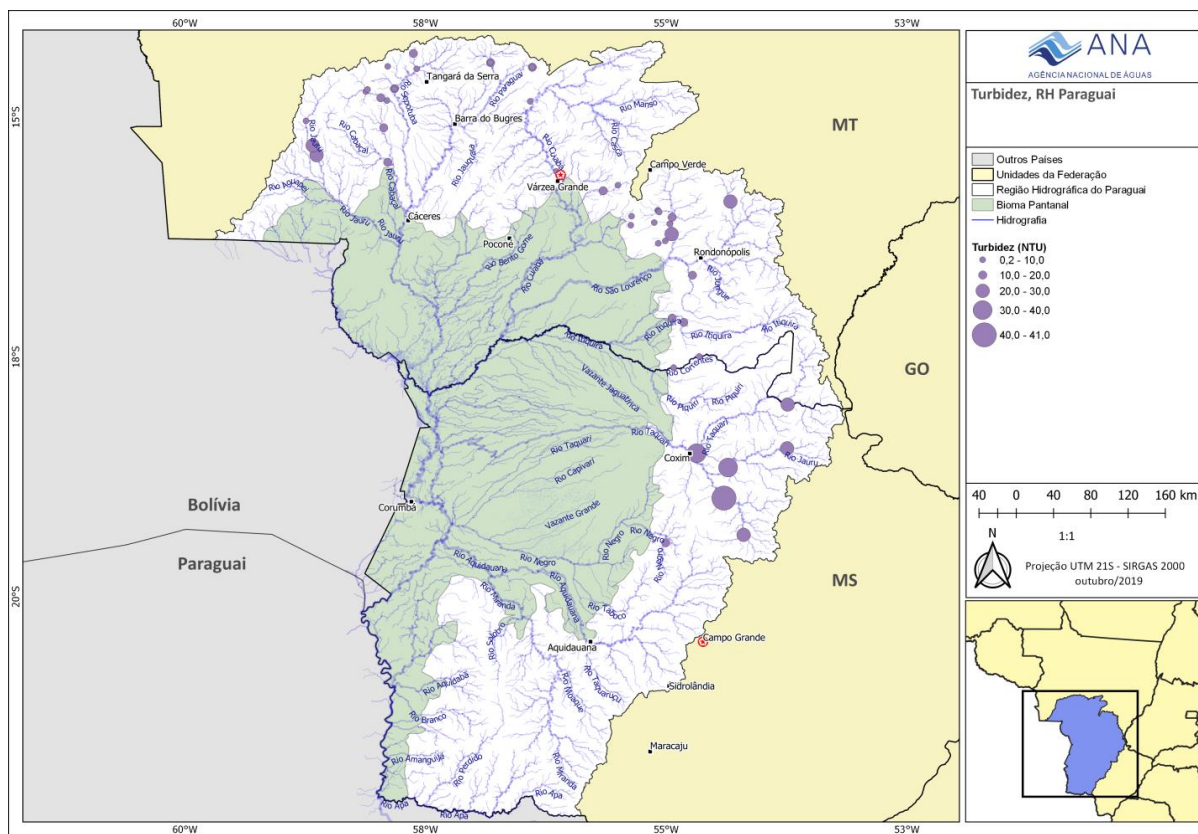


Figura 26. Medianas da turbidez (UNT) nos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

Carbono orgânico particulado (COP) em suspensão e carbono total (CT) no leito

Assim como ocorre com os sedimentos em suspensão no rio Taquari, o transporte mediano de COP em suspensão também é bem superior aos outros rios, chegando a 114.731 kg/dia, seguido pelo rio Cuiabá, Itiquira e São Lourenço (Figura 27).

O COP representa em média 5% dos sólidos em suspensão nos rios amostrados, variando entre 0,1 e 20%. Os rios Sepotuba, Cabaçal e Jauru, por exemplo, tem uma porcentagem de COP em suspensão maior do que nos rios Taquari e Itiquira, apresentado, portanto, águas mais ricas em matéria orgânica, o que reflete em valores expressivos de COP quando comparados ao baixo transporte de sedimentos em suspensão nestes rios (Figura 27).

Em relação às cargas de CT transportadas no leito (Figura 28), o rio Formoso se destaca, com mediana de 71,29 kg/dia, seguido pelos rios Taquari, Itiquira jusante UHE, Vermelho (afluente do Jauru, em MT) e São Lourenço-montante PCH. Rios de pequeno porte como o rio Jauru a montante da PCH Antônio Brennand, rios Maracanã, Juba, Jubinha, Prata e Ibó transportam pouco sedimento no leito, mas o transporte de CT se compara a outros rios de maior vazão.

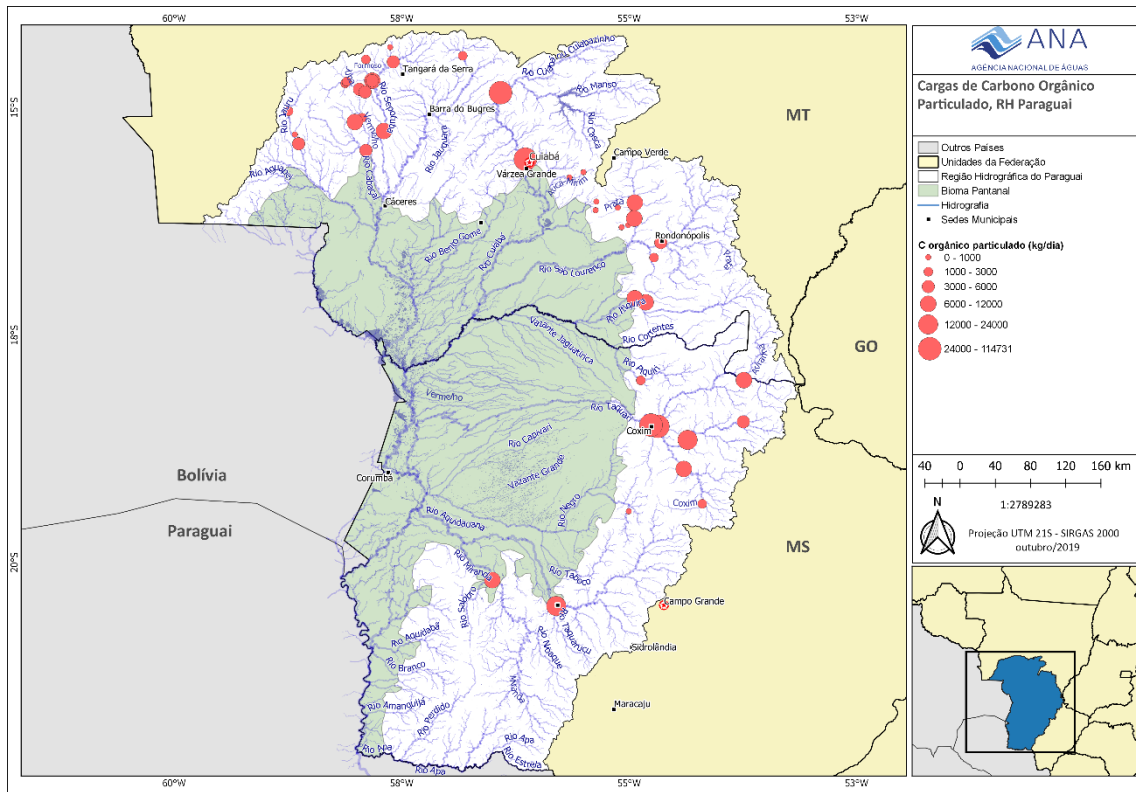


Figura 27. Mediana da carga de carbono orgânico particulado em suspensão (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

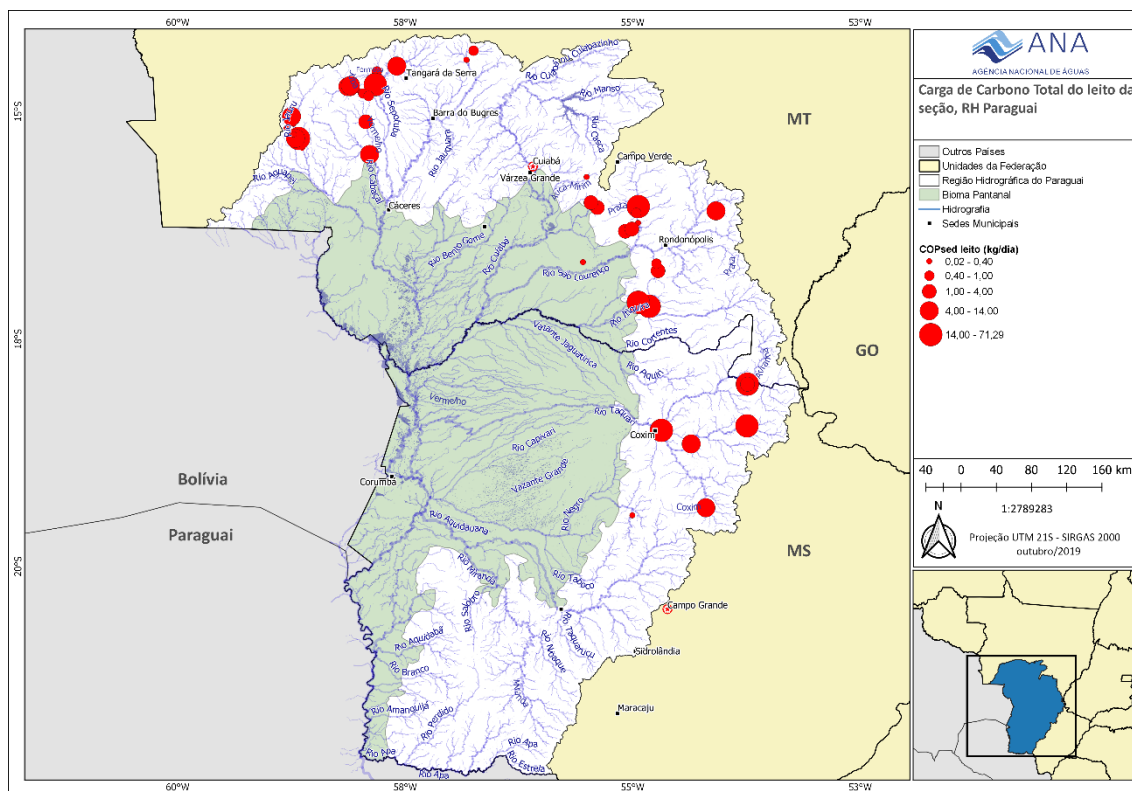


Figura 28. Mediana da carga de carbono total (kg/dia) transportado no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

Fósforo total (PT) transportado em suspensão e no leito

O transporte de fósforo total (PT) predomina nos rios Cuiabá e Taquari, seguidos pelos rios Correntes, Miranda, Aquidauana e na foz do Sepotuba. Os rios São Lourenço e Itiquira possuem cargas parecidas, próximas de 100 kg/dia. O rio Vermelho (afluente do São Lourenço) se destaca com uma importante contribuição de PT, bem como de SS e COP, como mencionado anteriormente (Figura 29).

Na região do Alto Paraguai, o transporte de PT é baixo, assim como observado para SS e COP, com maior carga na foz do rio Sepotuba, no ponto de amostragem do rio Cabaçal e no Jauru, a jusante da PCH Figueirópolis. Nos tributários do rio Cuiabá (Aricá, Glória, Mestre e Caeté) e afluentes da margem direita do rio São Lourenço (rios Prata e Ibó) foram observadas cargas bastante reduzidas de PT.

No transporte de PT pelo leito, se destacam os rios Vermelho, afluente do Jauru (MT), Formoso, Taquari, Itiquira (a jusante da UHE Itiquira), Coxim e São Lourenço (a montante PCH São Lourenço) (Figura 30).

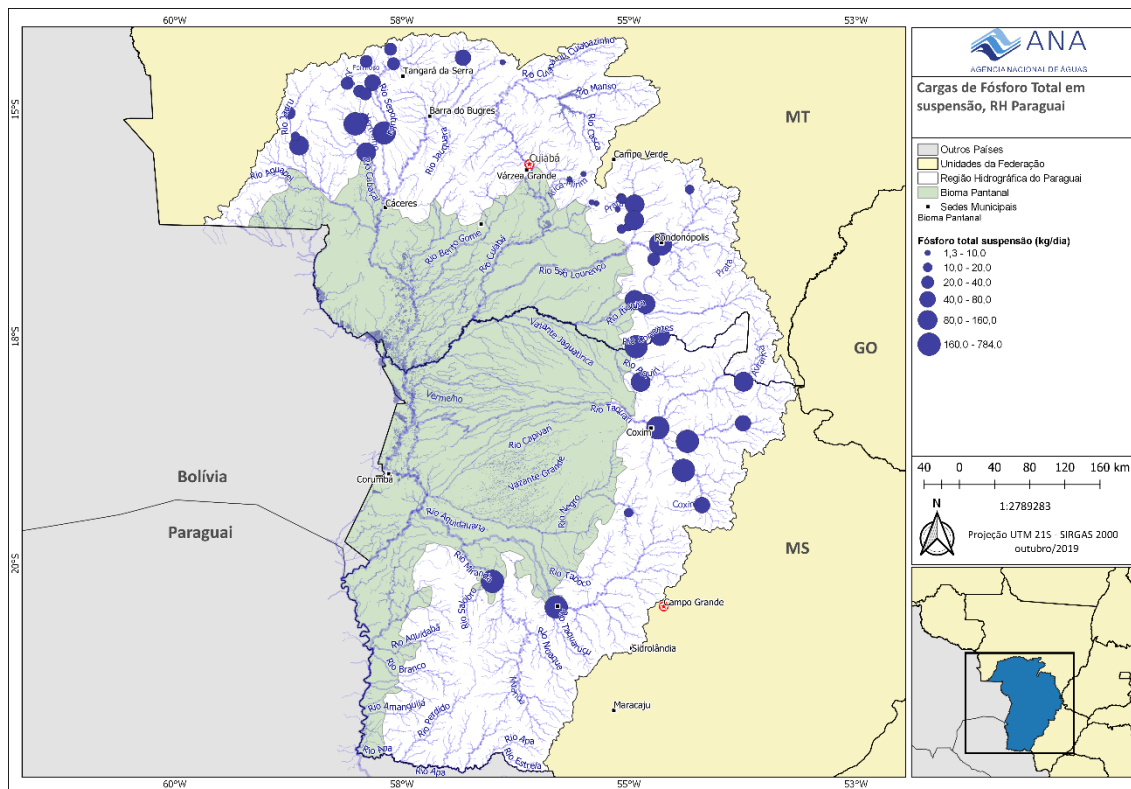


Figura 29. Mediana da carga de fósforo total em suspensão (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

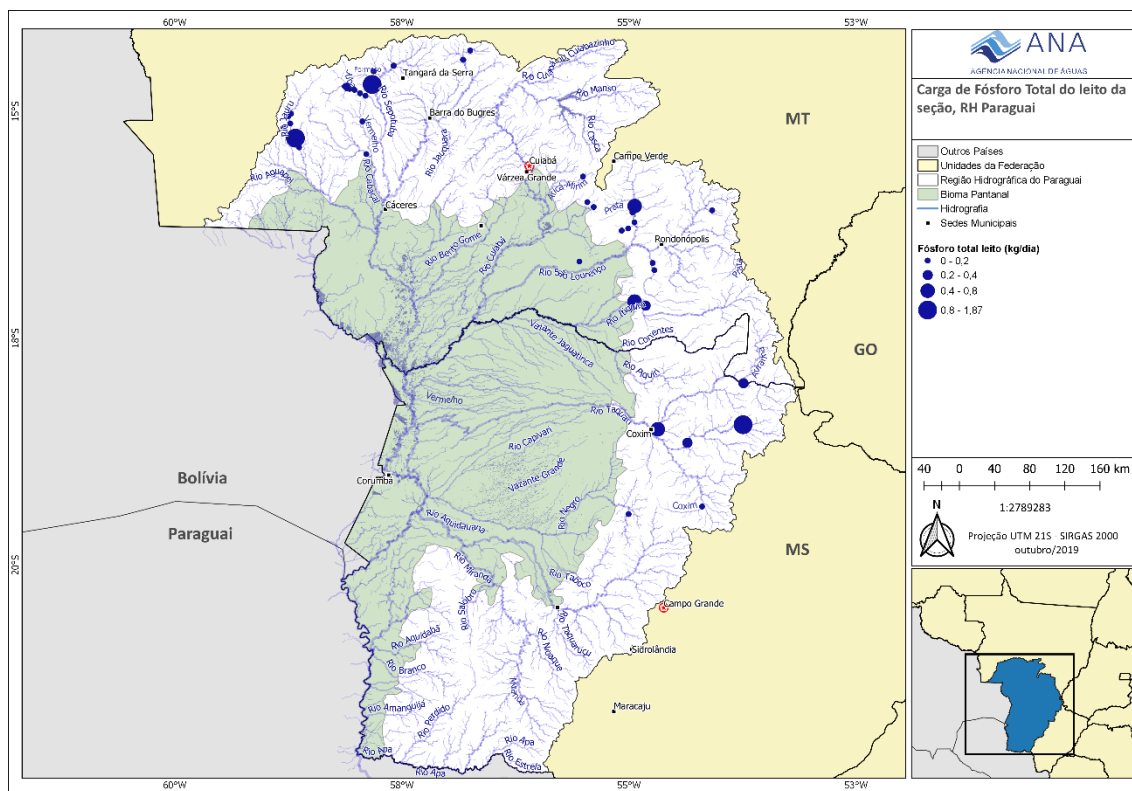


Figura 30. Mediana da carga de fósforo total (kg/dia) transportado no leito dos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

Formas de Nitrogênio (NT e ND)

A maior carga de nitrogênio total (NT) em suspensão também é transportada pelo rio Taquari, seguido pelos rios Sepotuba e Cuiabá, seções próximas à foz, bem como pelos rios Jauru-MT, Vermelho/SLO, Miranda e Aquidauana. Na região do Alto Paraguai o transporte de NT também é baixo como o PT, com cargas maiores nos rios Sepotuba na foz, Cabaçal e Jauru após a PCH Figueirópolis (Figura 31). Os demais rios possuem cargas bastante reduzidas, assim como tributários do Cuiabá (Aricá, Glória, Mestre e Caeté) e afluentes da margem direita do rio São Lourenço (rios Tenente Amaral, Prata e Ibó).

Embora o transporte de NT tenha sido maior no rio Taquari, o transporte do ND foi maior no rio Cuiabá. Os rios Sepotuba e Cabaçal também representam importantes fontes de ND na região do Alto Paraguai e os rios Correntes e São Lourenço na região mediana da bacia (Figura 32).

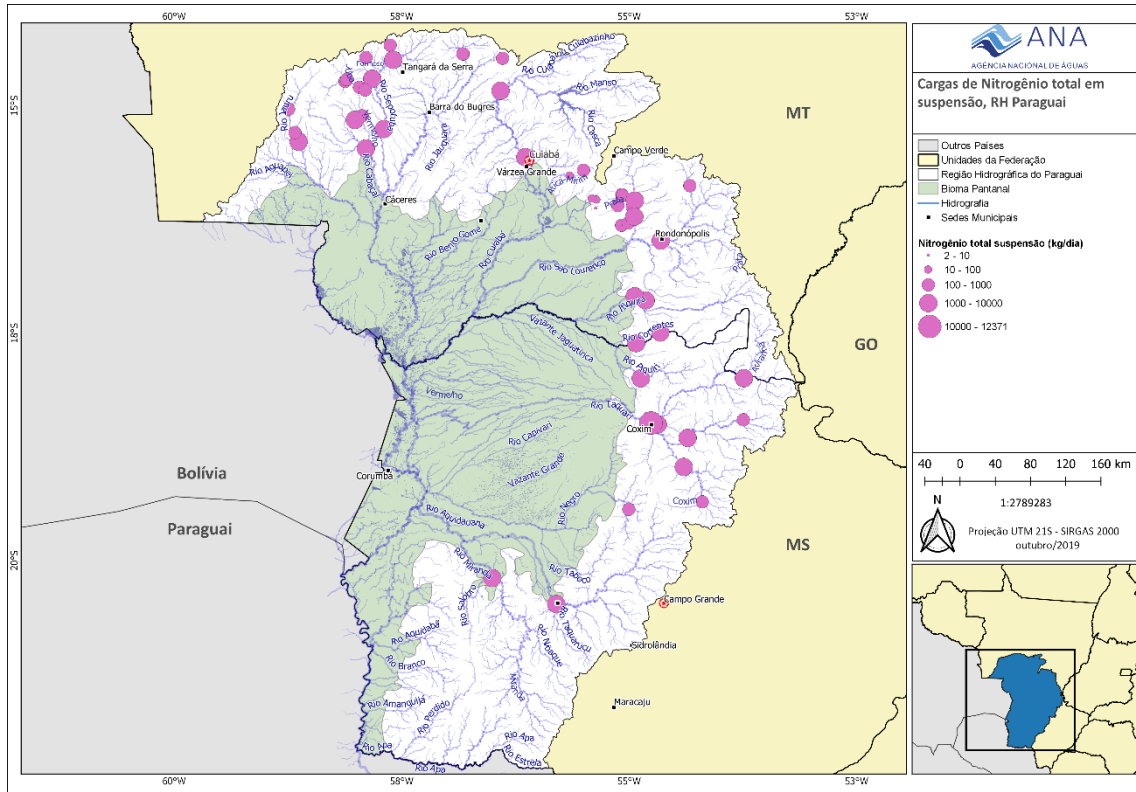


Figura 31. Mediana da carga de nitrogênio total em suspensão (kg/dia) transportado pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.

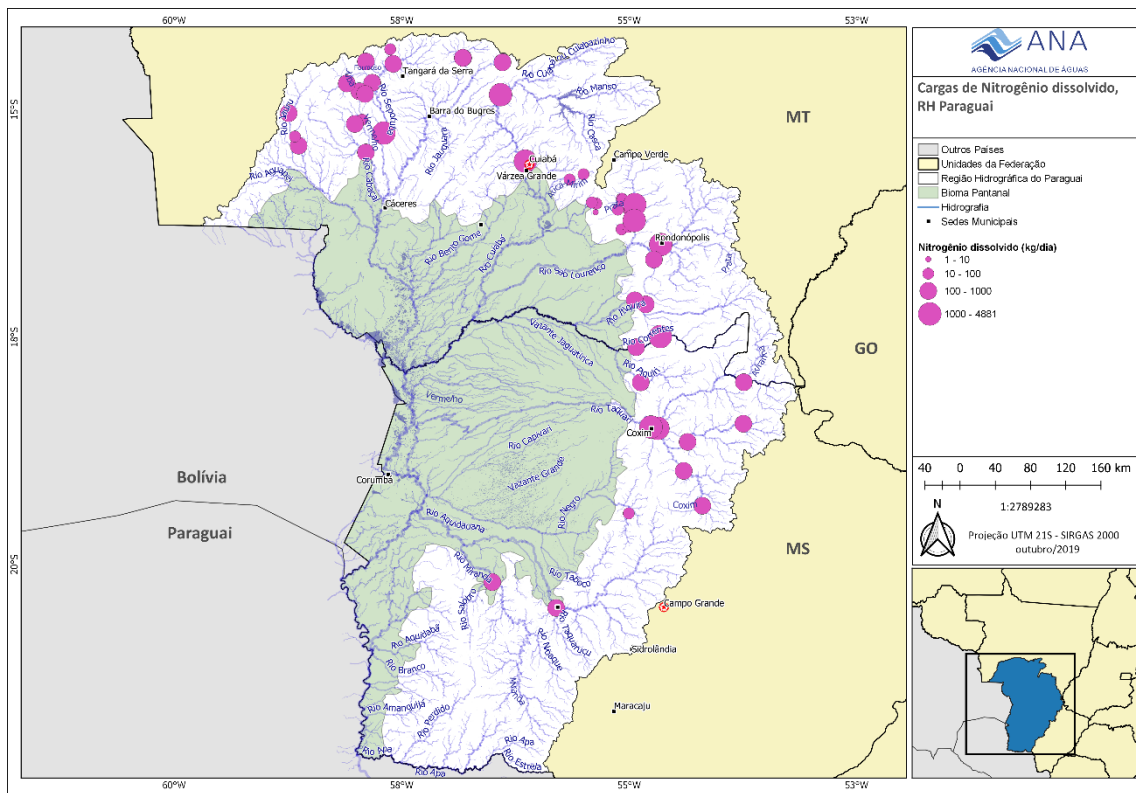


Figura 32. Medianas da carga de nitrogênio dissolvido (kg/dia) transportada pelos rios com empreendimentos hidrelétricos em operação ou previstos na RHP.