

HERA

SISTEMA DE APOIO À DECISÃO SOBRE SELEÇÃO DE INVENTÁRIOS HIDRELÉTRICOS



1º Workshop de Inventários Hidrelétricos Participativos
ANEEL, 20 de setembro de 2018



- ▶ **Visão geral**
- ▶ Engenharia
 - Geração de alternativas
 - Dimensionamento
 - Cálculo de volumes & orçamento
 - Modelagem 3D de Arranjos
- ▶ Meio Ambiente
 - AAI & Blueprint de conservação
 - Métricas e restrições socioambientais
- ▶ Estudo de caso
- ▶ Conclusões

① Relatório final do P&D



AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
HIDROELÉTRICO E DAS ALTERNATIVAS DE DIVISÃO DE QUEDAS
CONSIDERANDO ASPECTOS ENERGÉTICOS E SOCIOAMBIENTAIS

Relatório final do Projeto P&D ANEEL 0678-0113/2013

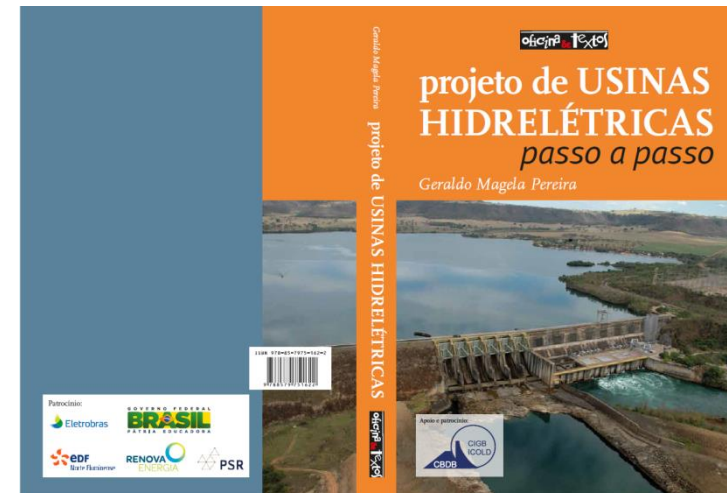
Empresa Proponente:



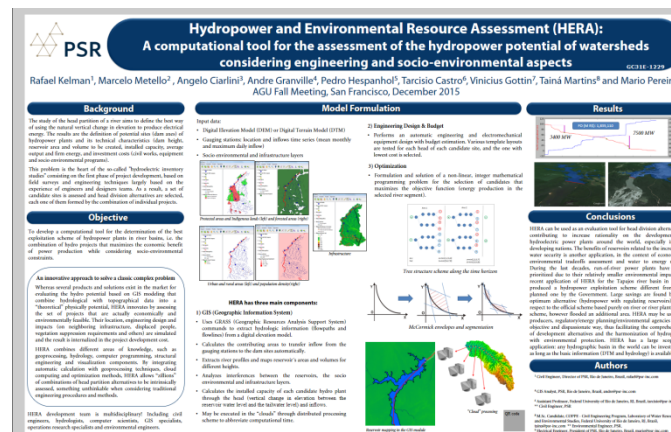
Empresa Executora
PSR Soluções e Consultoria em Energia Ltda.

Abril de 2015

② Livro



③ Poster AGU Annual Meeting



④ Prêmio Inovação



PSR:

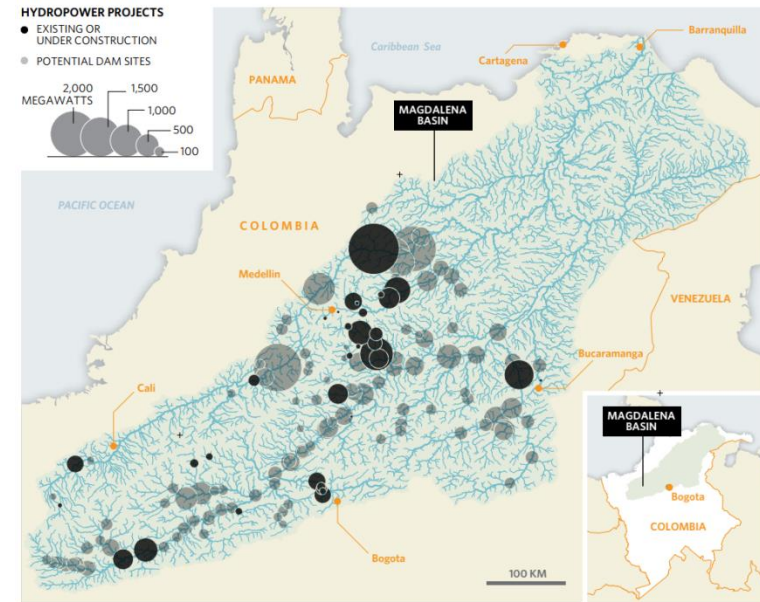
- ▶ Rafael Kelman
- ▶ Tarcisio Castro
- ▶ Marcelo Metello
- ▶ Luiz Rodolpho Albuquerque
- ▶ Tainá Martins
- ▶ Felipe Cruz
- ▶ André Granville

TNC:

- ▶ Edenise Garcia
- ▶ Pedro Bara
- ▶ Paulo Petry
- ▶ Leonardo Sotomayor
- ▶ Sidney Rodrigues
- ▶ David Harrison
- ▶ Justus Raeppe

Magdalena (Colômbia)

- ▶ Principal bacia hidrográfica da Colômbia, concentra a maior parte da população e do PIB do país, além do potencial hidroelétrico
- ▶ HERA usado em estudo de alternativas de divisão de quedas considerando
 - (1) “Business as Usual” (regra atual)
 - (2) Definição de alternativas com otimização para a bacia hidrográfica
 - (3) Otimização por bacia incorporando riscos de atrasos e sobrecustos dos projetos a partir de um indicador de sua complexidade socioambiental (integração do HERA com módulo financeiro OptFolio)

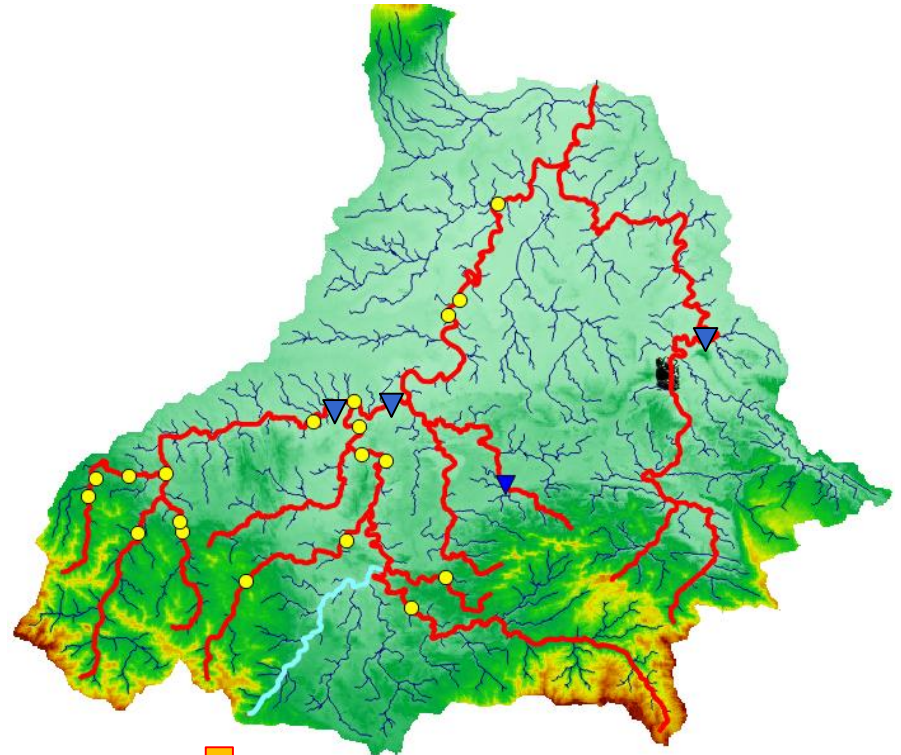
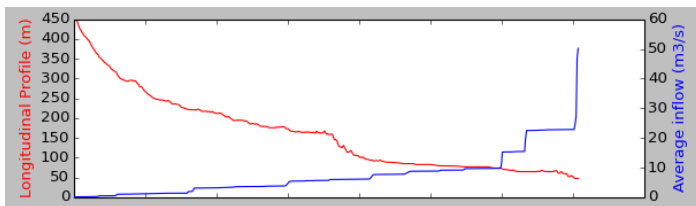
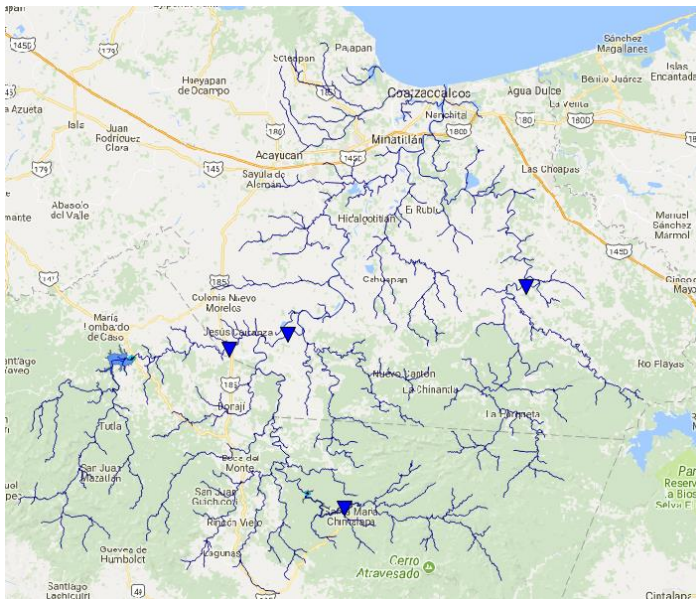


The Power of Rivers A Business Case

How system-scale planning and management of hydropower
can yield economic, financial and environmental benefits

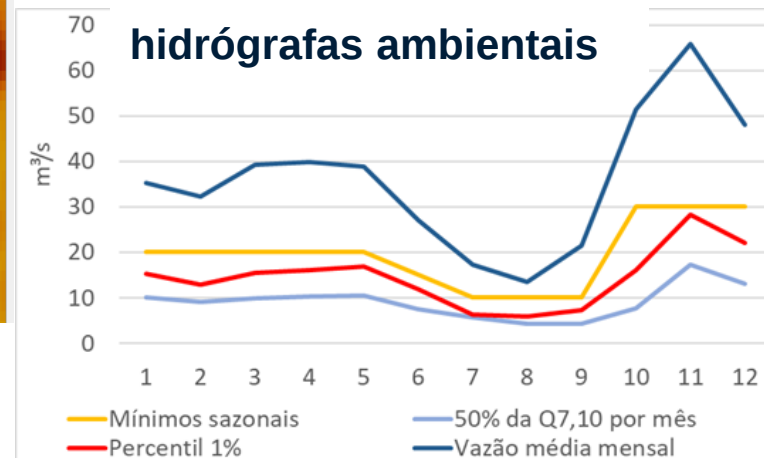
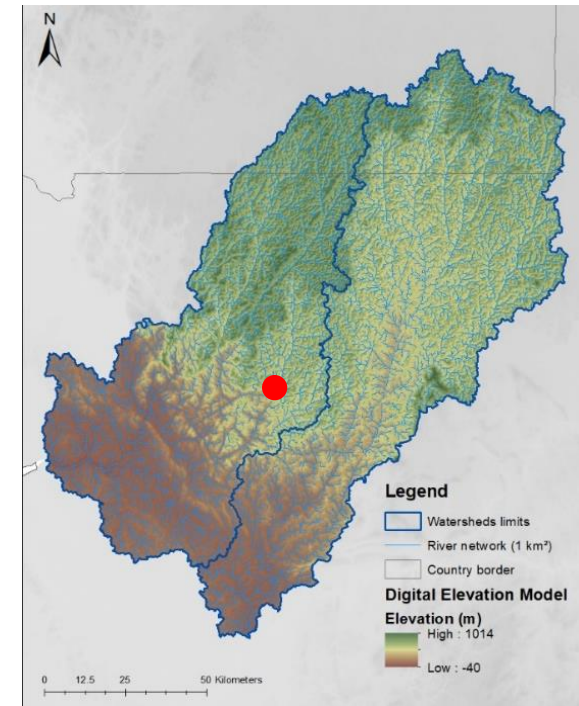
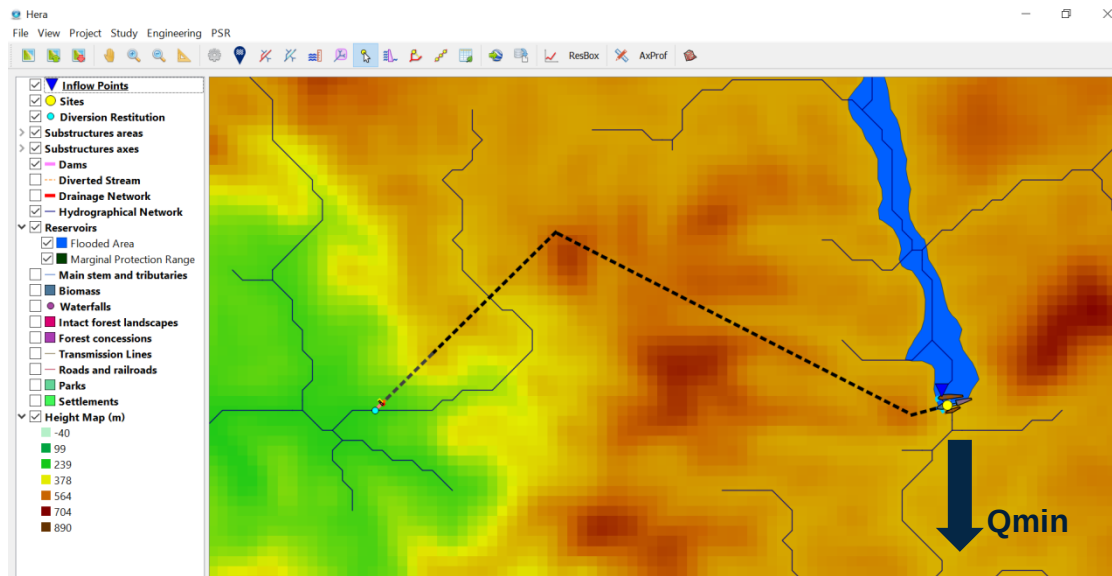
Coatzacoalcos (México)

- ▶ Trabalho em curso com apoio do BID, TNC, CFE, Universidade de Guadalajara e agencias governamentais mexicanas

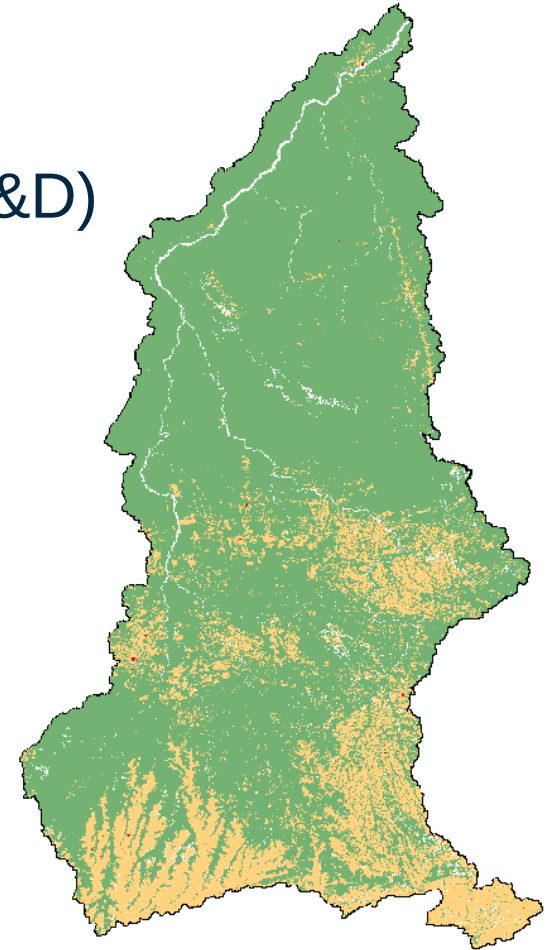


Mbé, Komo & Abanga (Gabão)

- ▶ Avaliação de potencial hidroelétrico em três bacias hidrográficas no Gabão
- ▶ Projeto de transposição de bacias: estudo de alternativas para UHE Ngoulmendjim considerando varias hidrógrafas ambientais

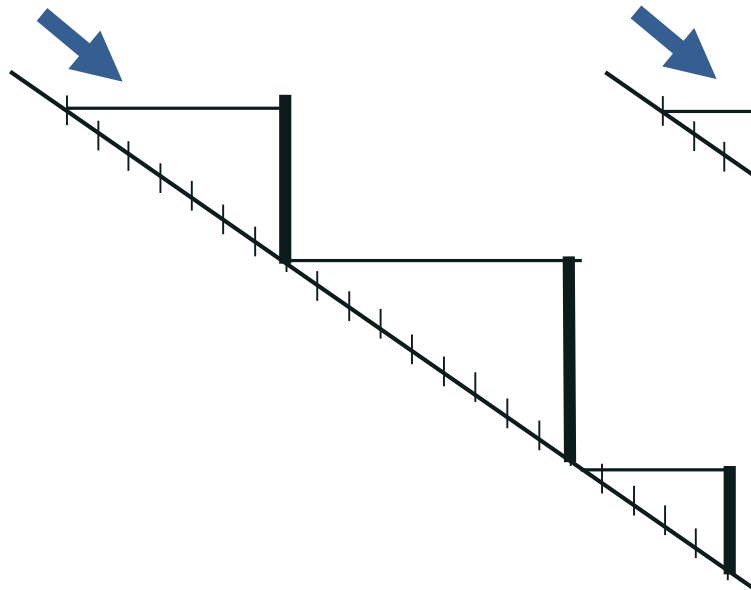


- ▶ Em curso, um estudo de caso por recomendação da EPE (fechamento do P&D)
- ▶ Definição de projetos candidatos
- ▶ Utilização de mapas da AAI para cálculo de métricas socioambientais pelo HERA
- ▶ Otimização de custos de engenharia e alternativas de divisão de quedas

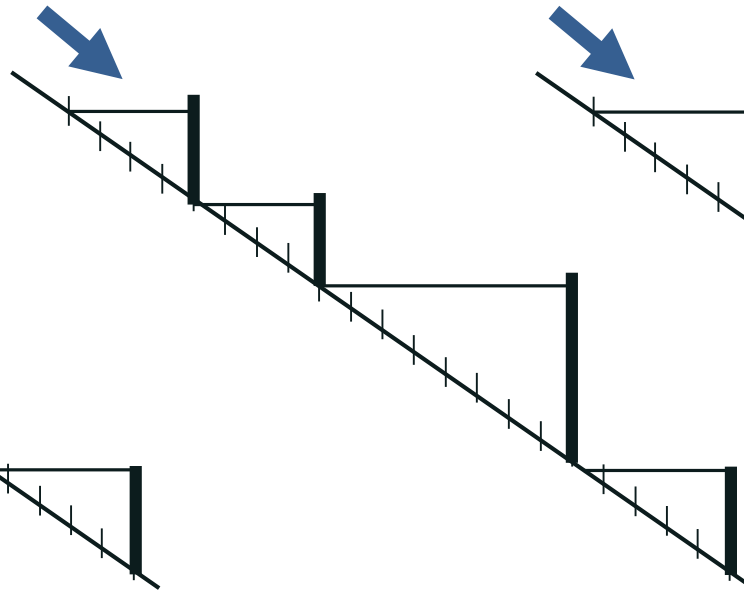


Problema de divisão de quedas

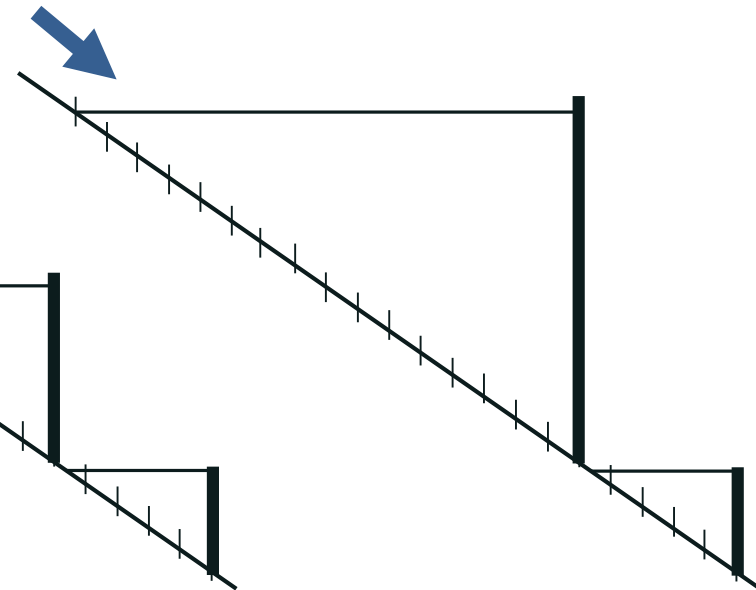
- ▶ Quais aproveitamentos escolher a partir do potencial hidroelétrico de uma bacia hidrográfica?
 - Problema complexo: questões técnicas, econômicas, sociais e ambientais



Alternativa A

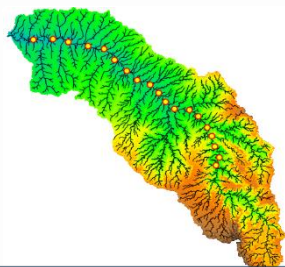


Alternativa B



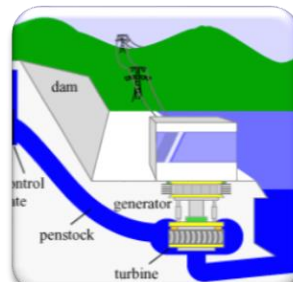
Alternativa C

Módulos do HERA



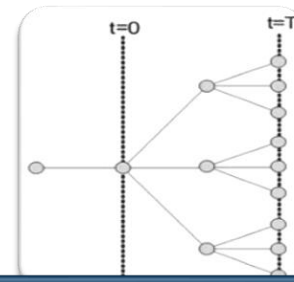
GIS

- Áreas de drenagem
- Seleção de candidatos
- Curvas cota x área x volume
- Regionalização de vazões
- Interferência dos projetos



Engenharia

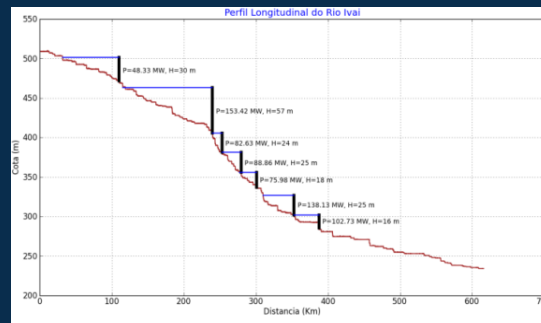
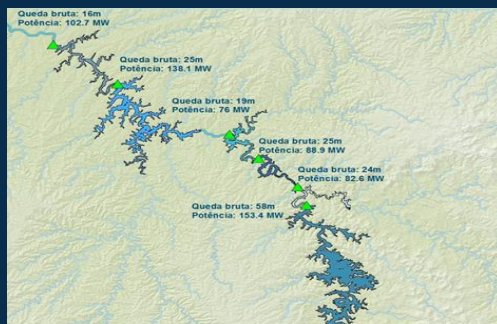
- Dimensionamento das estruturas (Manual de Inventário)
- Orçamentos dos projetos (inclusive Conta 10)



Otimização

- Seleção de projetos que maximizam função objetivo sujeito a restrições
- Problema não-linear, inteiro, multiestágio, estocástico

Resultados



► Camadas de informação (*shapefiles* diversos)

- **Topografia:** base de dados da NASA, levantamentos de campo, etc.
- **Hidrologia:** localização das estações fluviométricas (HidroWeb/ANA)
- **Geologia:** mapa geológico regional (interpretado)
- **Ambiental:** Áreas protegidas, compensações, *blueprint de conservação*
- **Social:** densidade populacional, custo de relocação e aquisição de área urbanas e rurais
- **Infraestrutura:** estradas, pontes, ferrovias, dutos na região dos aproveitamentos.

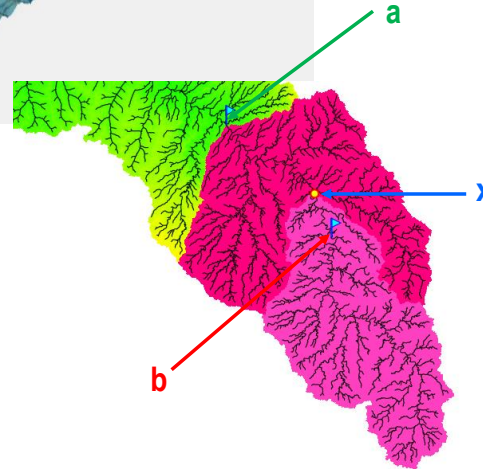
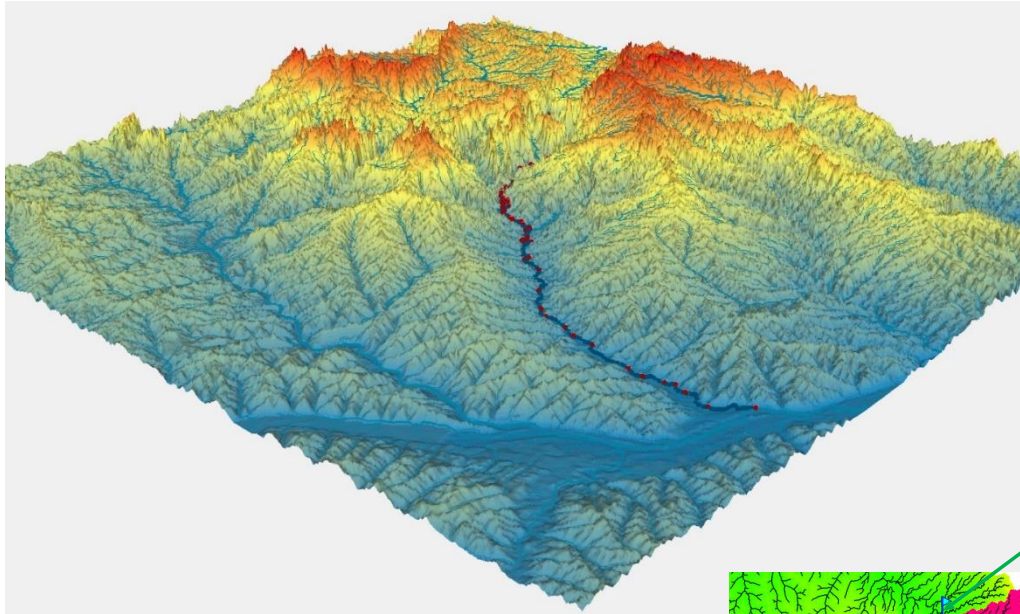
► Hidrologia

- Série de vazões históricas mensais e máximas diárias em estações fluviométricas (HidroWeb/ANA)

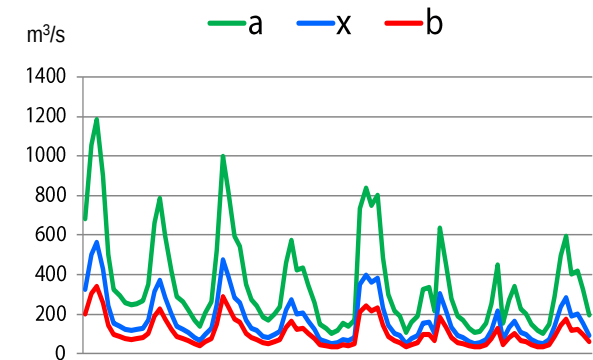
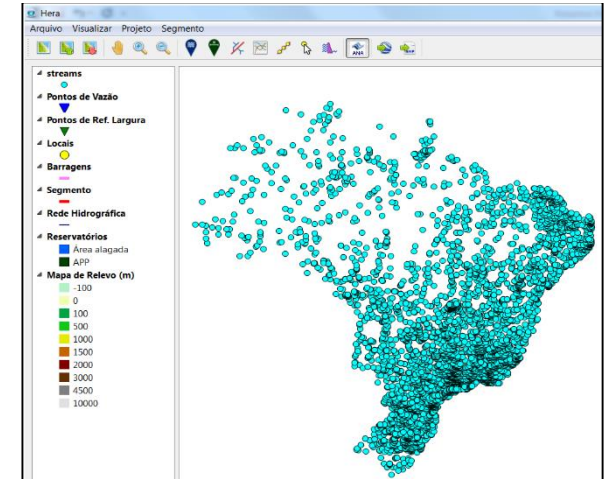
► Bancos de dados com custos unitários

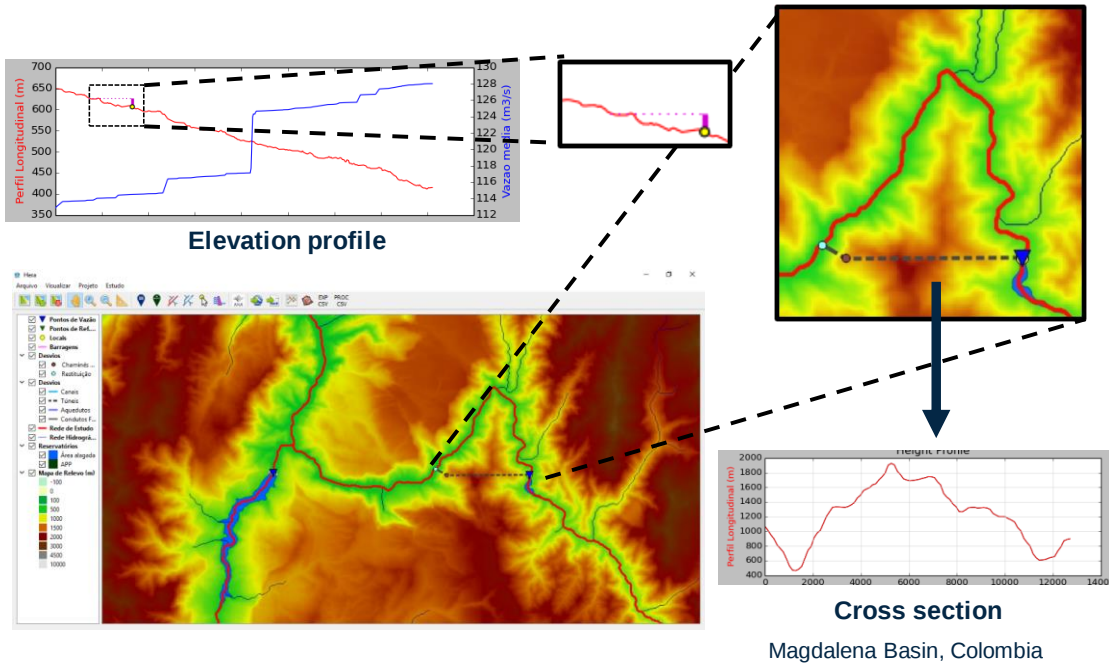
- Definição de orçamentos dos aproveitamentos

Modelo Digital (bacia do rio Ivaí, Paraná)

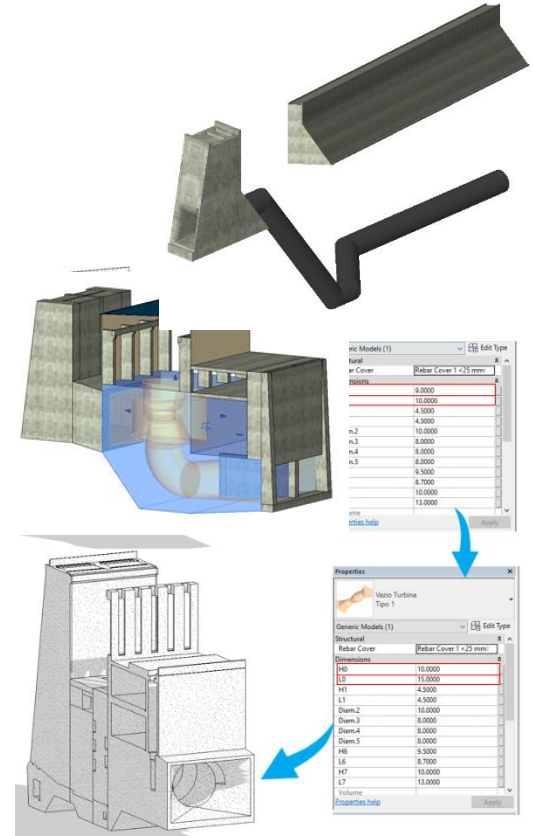


Integração com a rede fluviométrica brasileira (HidroWeb / ANA)

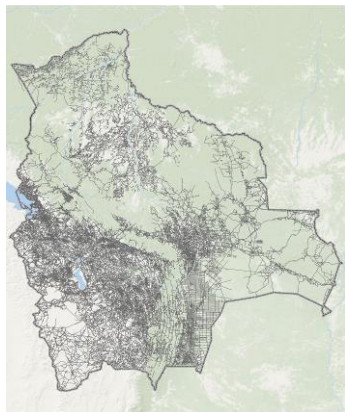




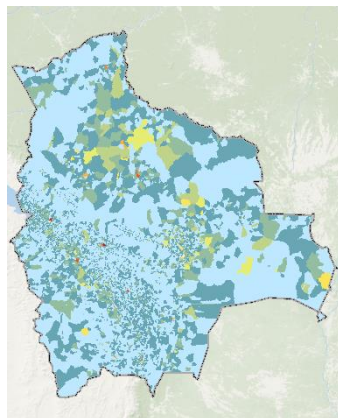
Componentes



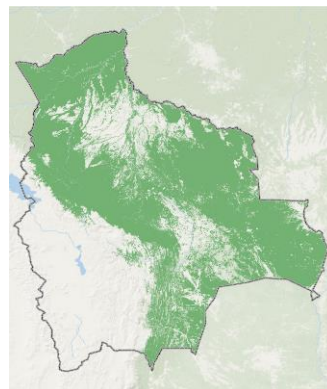
Exemplos de camadas (shapefiles) importados para o HERA (Bolívia)



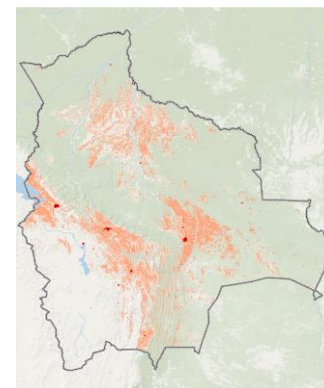
Infraestrutura



População

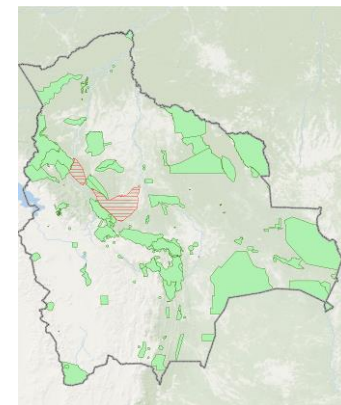


Vegetação



**TIs e áreas
protegidas**

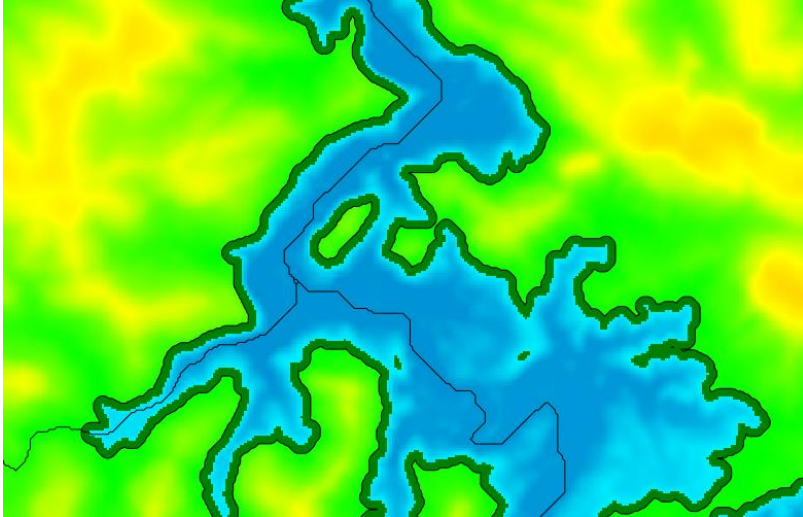
**Áreas rurais e
urbanas**



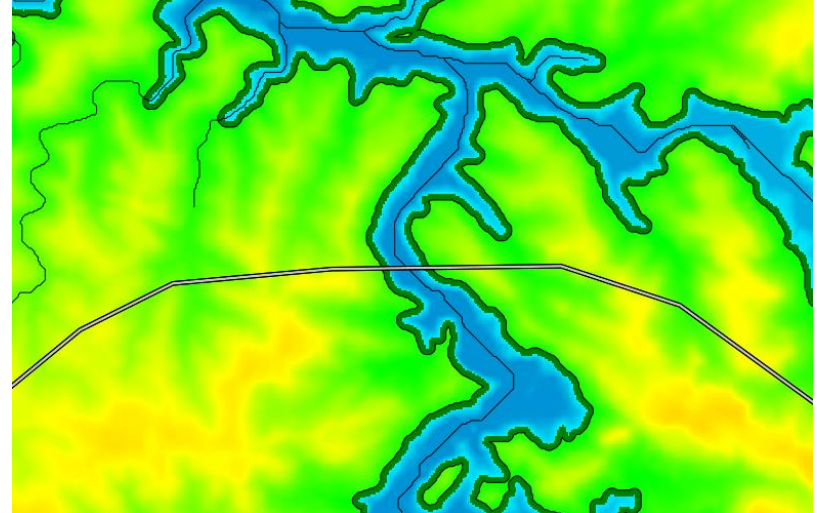
Informações usadas na avaliação de impactos dos
projetos candidatos

Interferências

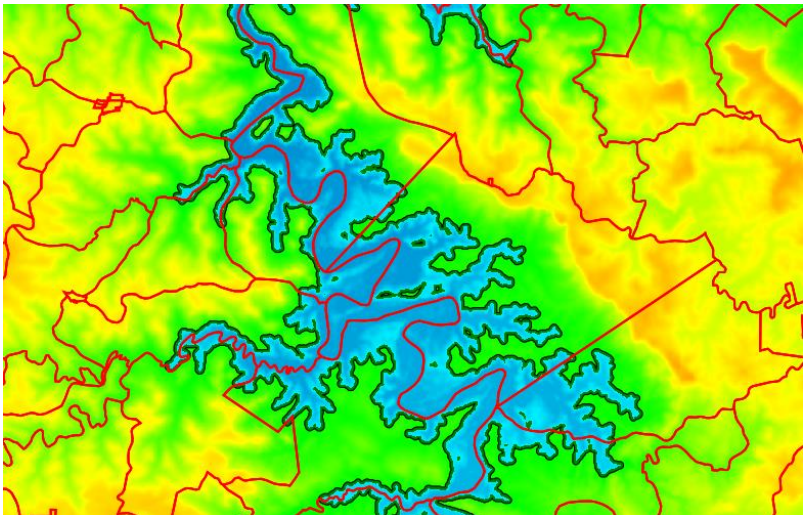
Supressão de vegetação



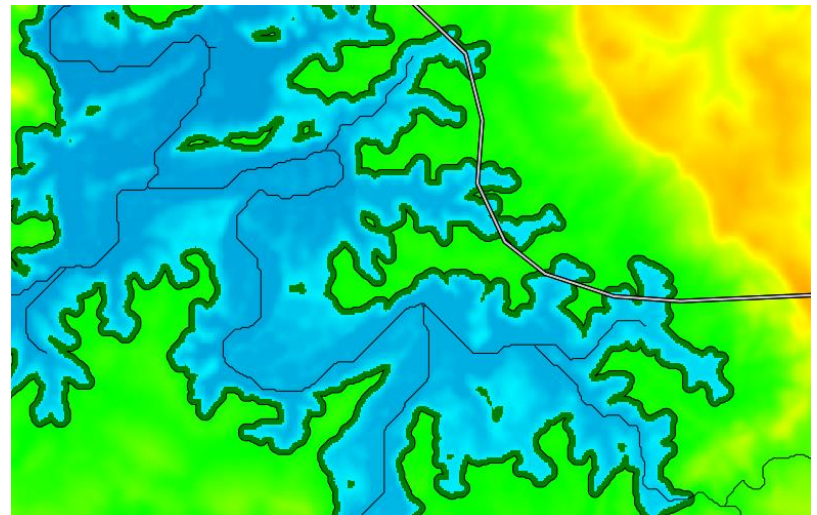
Pontes



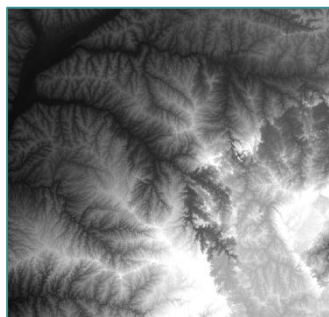
Realocação de população



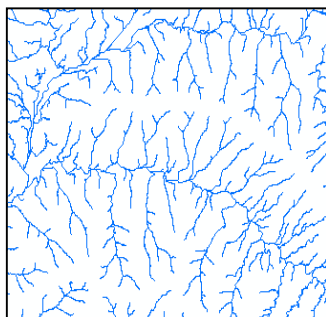
Impactos em infraestrutura viária



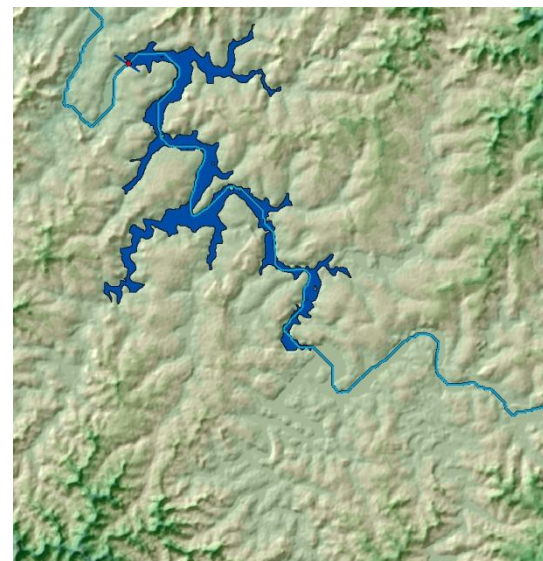
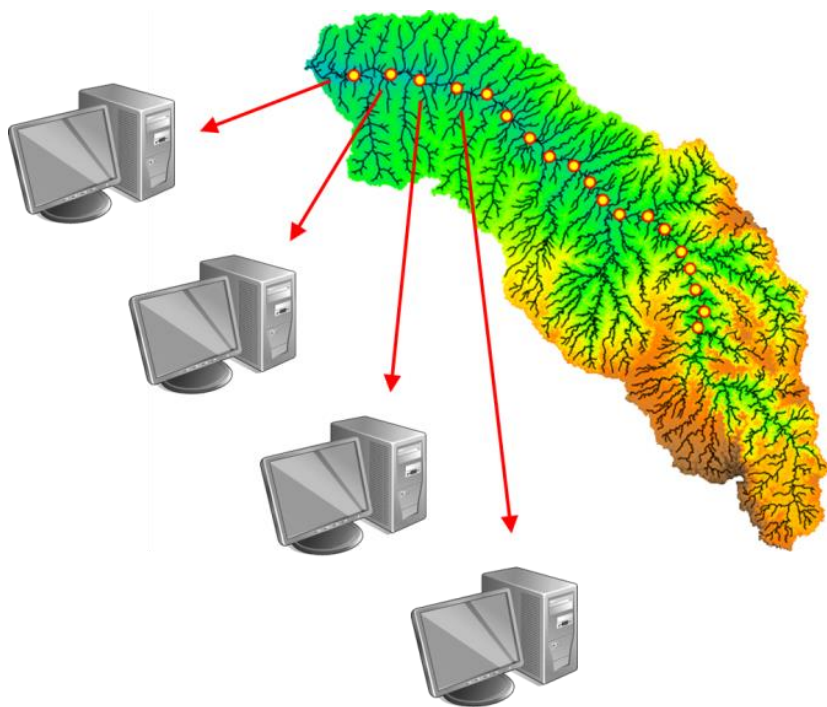
Processamento distribuído



MDT

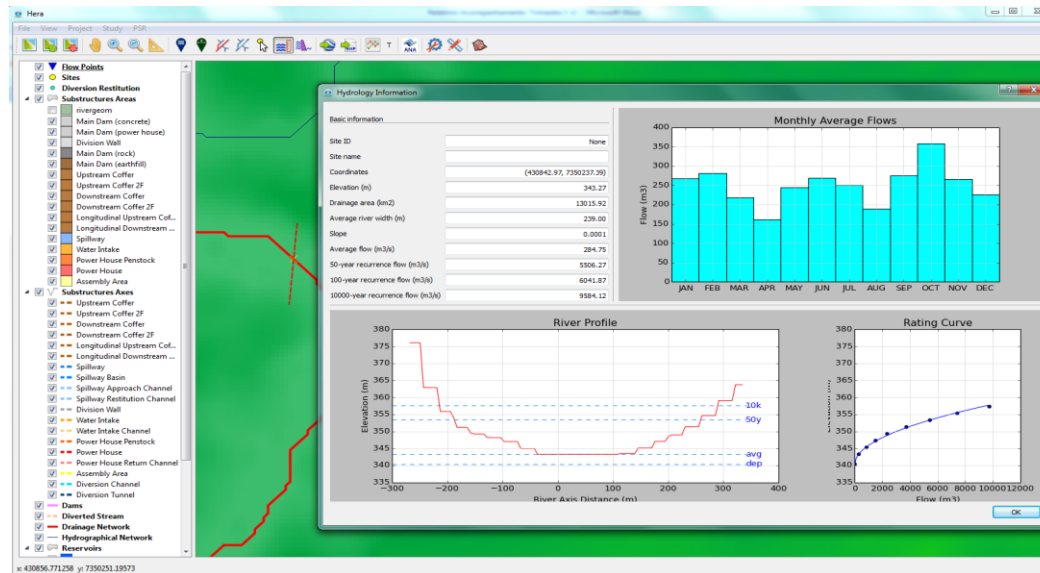
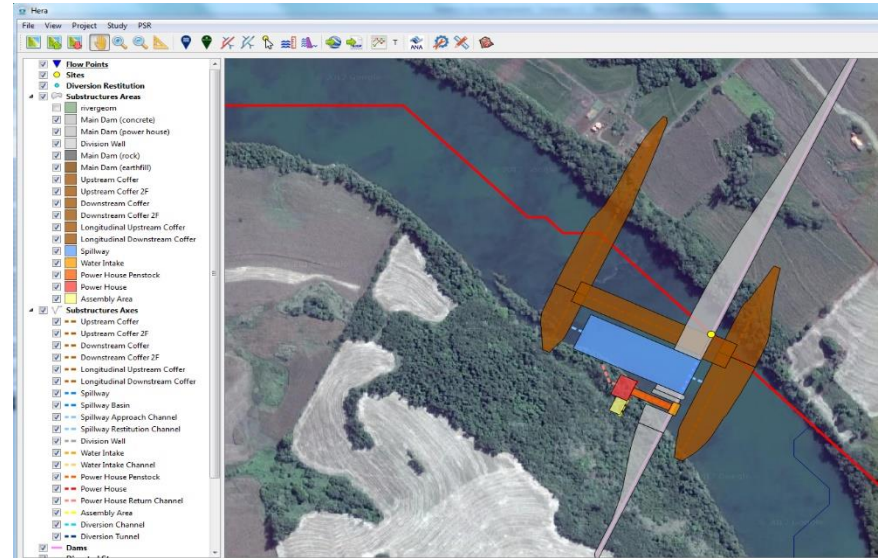
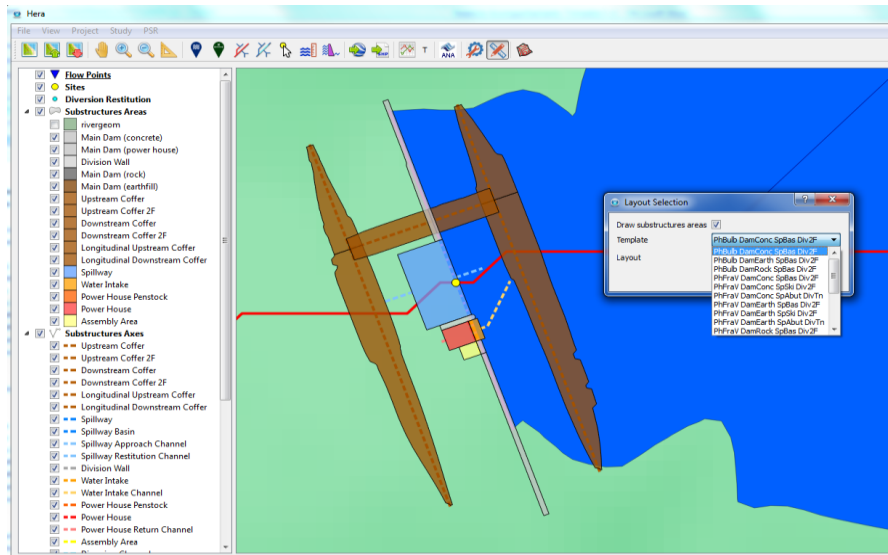


Drenagem

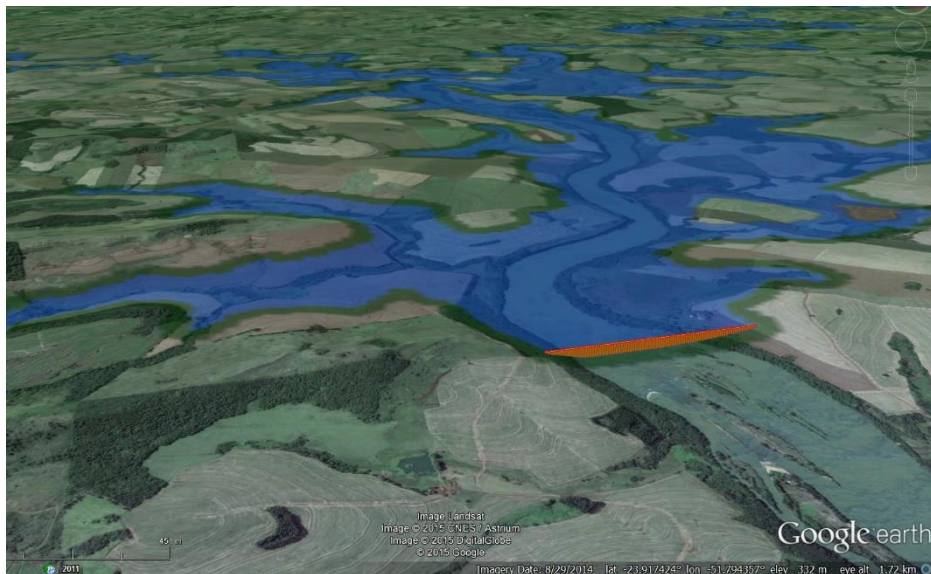


Reservatórios

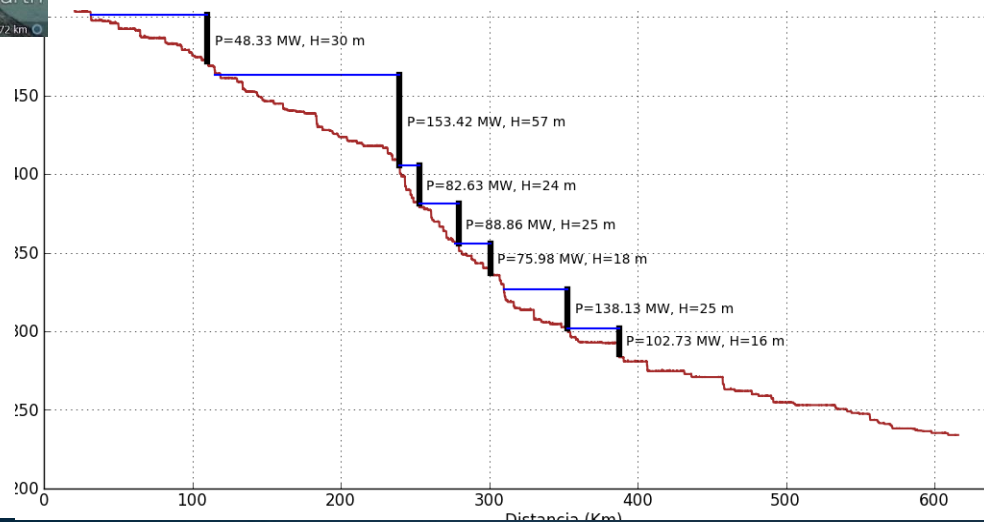
Interface do HERA



Arquivos KML para Google Earth



Perfis verticais com alternativa selecionada



Componentes Open-Source



HERA



GRASS



QGIS



TinyDB



PROJ.4

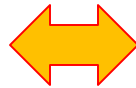
PyQt4



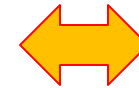
MPI4py

Pycel

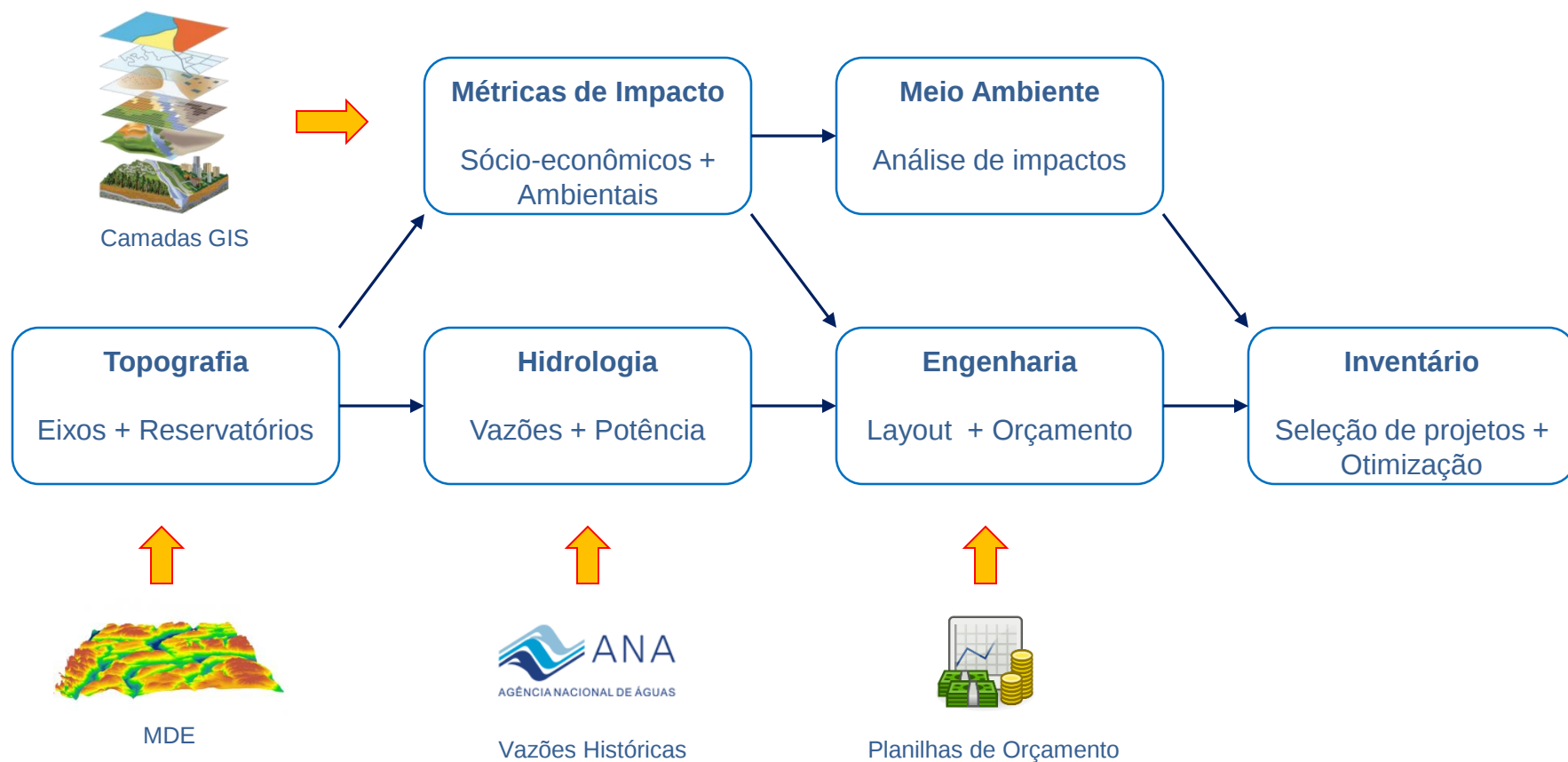
Colaboração com Softwares Comerciais



HERA



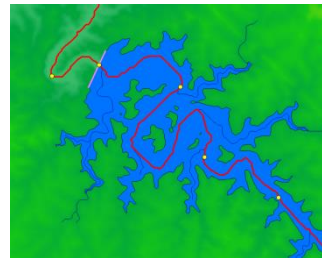
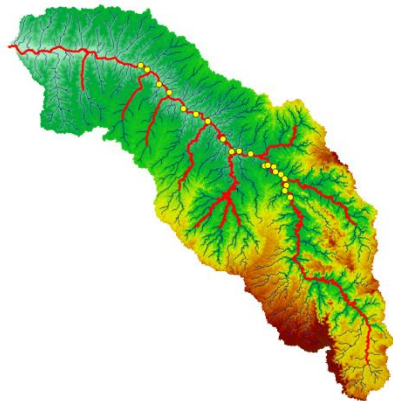
Fluxo de Processamento de Dados



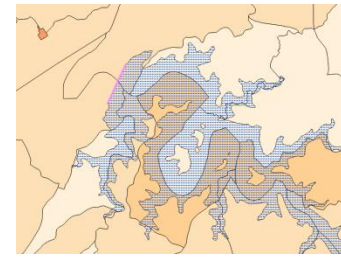
Demonstração no HERA



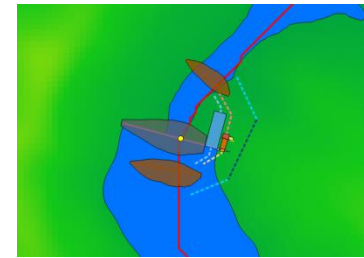
Processamento Distribuído



Reservatórios



Métricas de
Impacto



Engenharia

- ▶ Visão geral
- ▶ **Engenharia**
 - Geração de alternativas
 - Dimensionamento
 - Cálculo de volumes & orçamento
 - Modelagem 3D de Arranjos
- ▶ Meio Ambiente
 - AAI & Blueprint de conservação
 - Métricas e restrições socioambientais
- ▶ Estudo de caso
- ▶ Conclusões

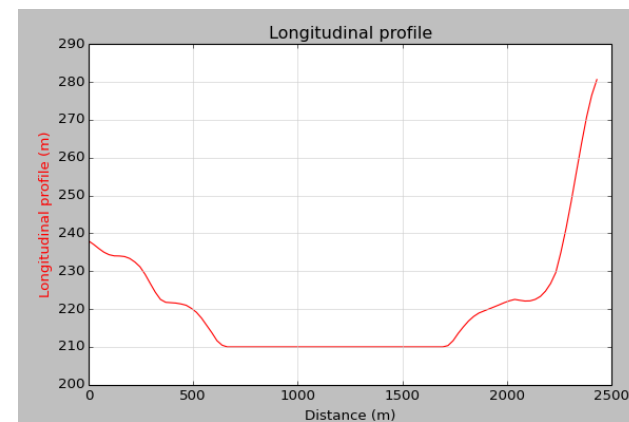
Seleção de Locais

Seleção Manual de Eixos Candidatos:



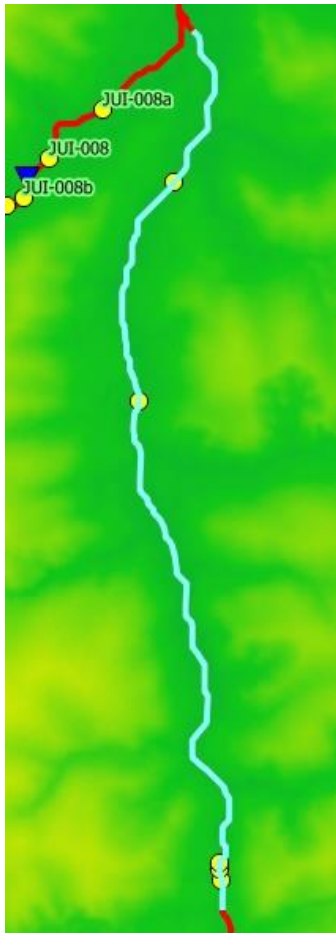
Ferramentas Auxiliares:

- Geração de Curvas de Nível
- Perfis Transversais
- Perfis Longitudinais pelo Rio



Seleção de Locais

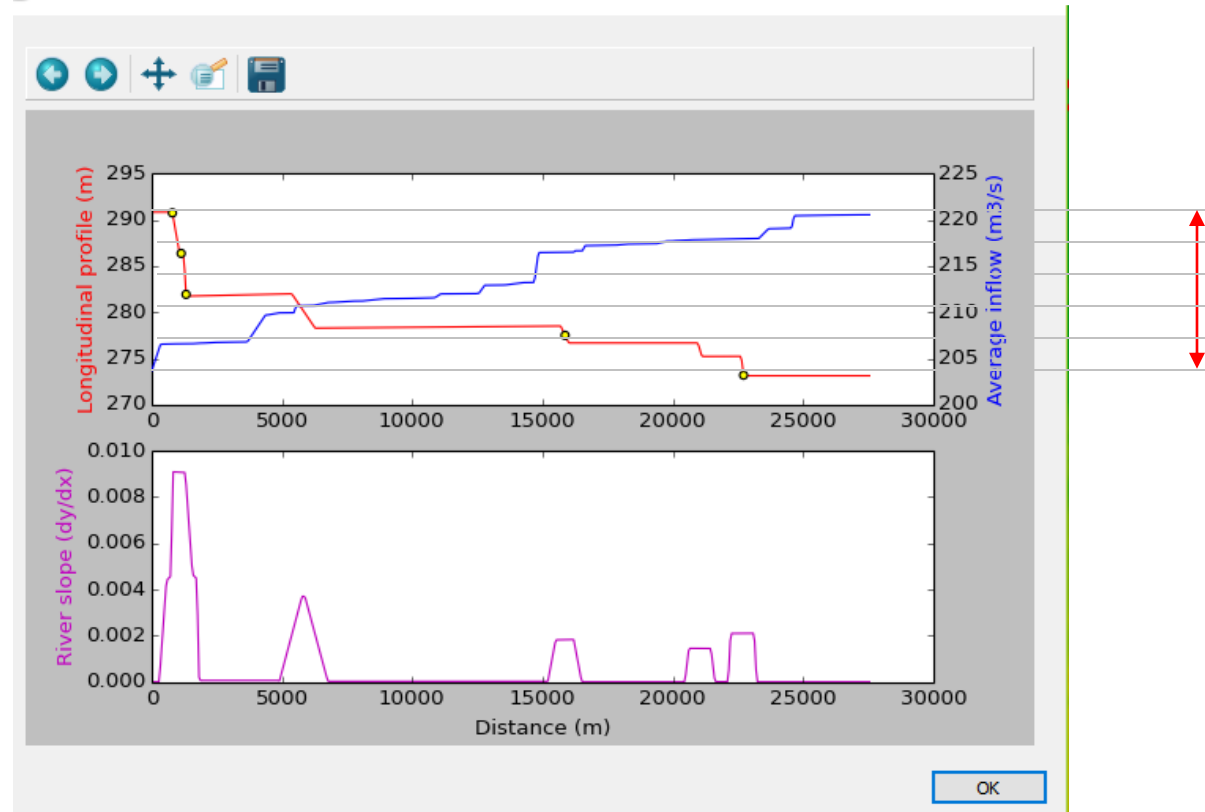
Seleção automática do HERA:



CrITÉrios:

- Usuário define a quantidade de pontos
- HERA distribui os locais mantendo quedas constantes

Profile chart



OK

Seleção de Quedas

Arranjos com Casa de Força ao Pé de Barragem

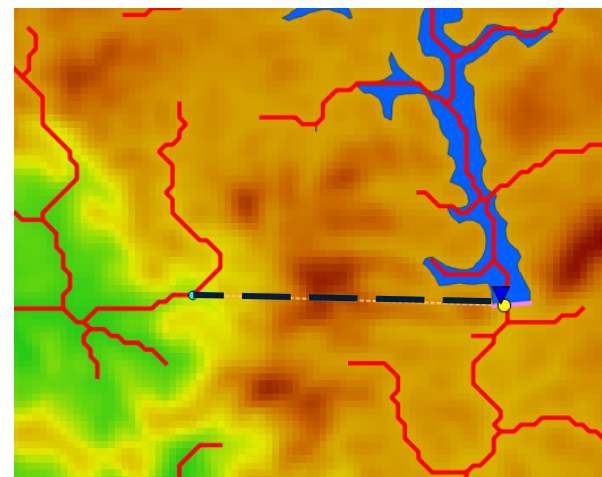
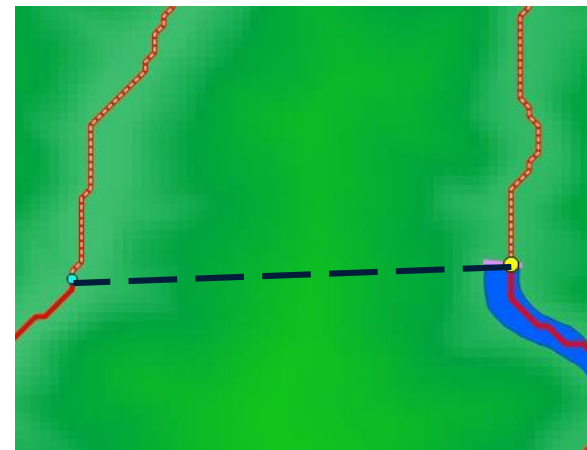
	Site name	Site ID	Site ID	Site name	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Restitution coord. X	Restitution coord. Y
1		152	1	152	616	U10D0	10.0	0.0		
			2	152	617	U15D0	15.0	0.0		

Arranjos com Circuito em Derivação por Canal ou Túnel

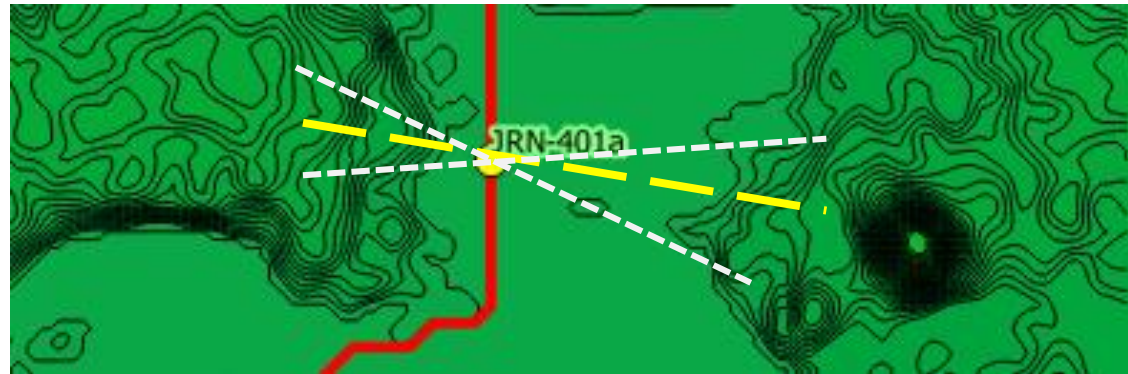
	Site name	Site ID	Site ID	Site name	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Restitution coord. X	Restitution coord. Y
1		10	1	10	54	U10D60	10.0	60.0		
			2	10	55	U15D60	15.0	60.0		

Arranjos com Transposição de Bacias

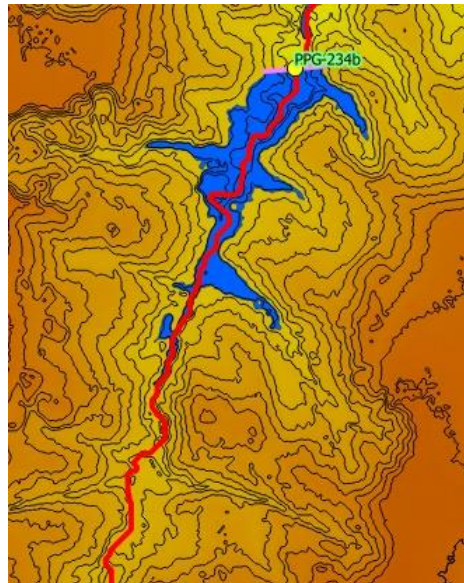
	Site name	Site ID	Site ID	Site name	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Restitution coord. X	Restitution coord. Y
1		16	1	16	380	U20D120T	20.0		672021.05	41563.31



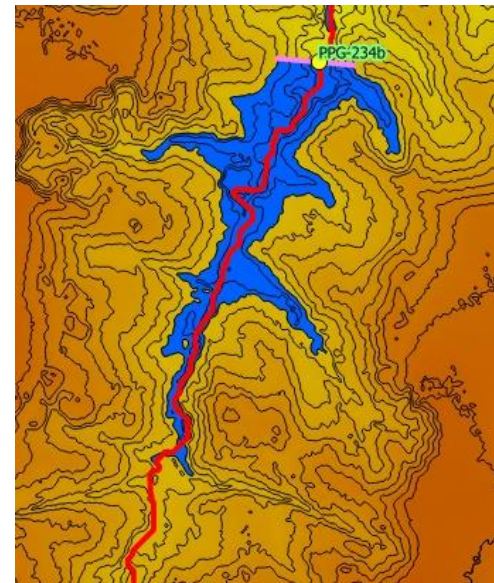
Definição do Eixo de Barramento



Reservatórios

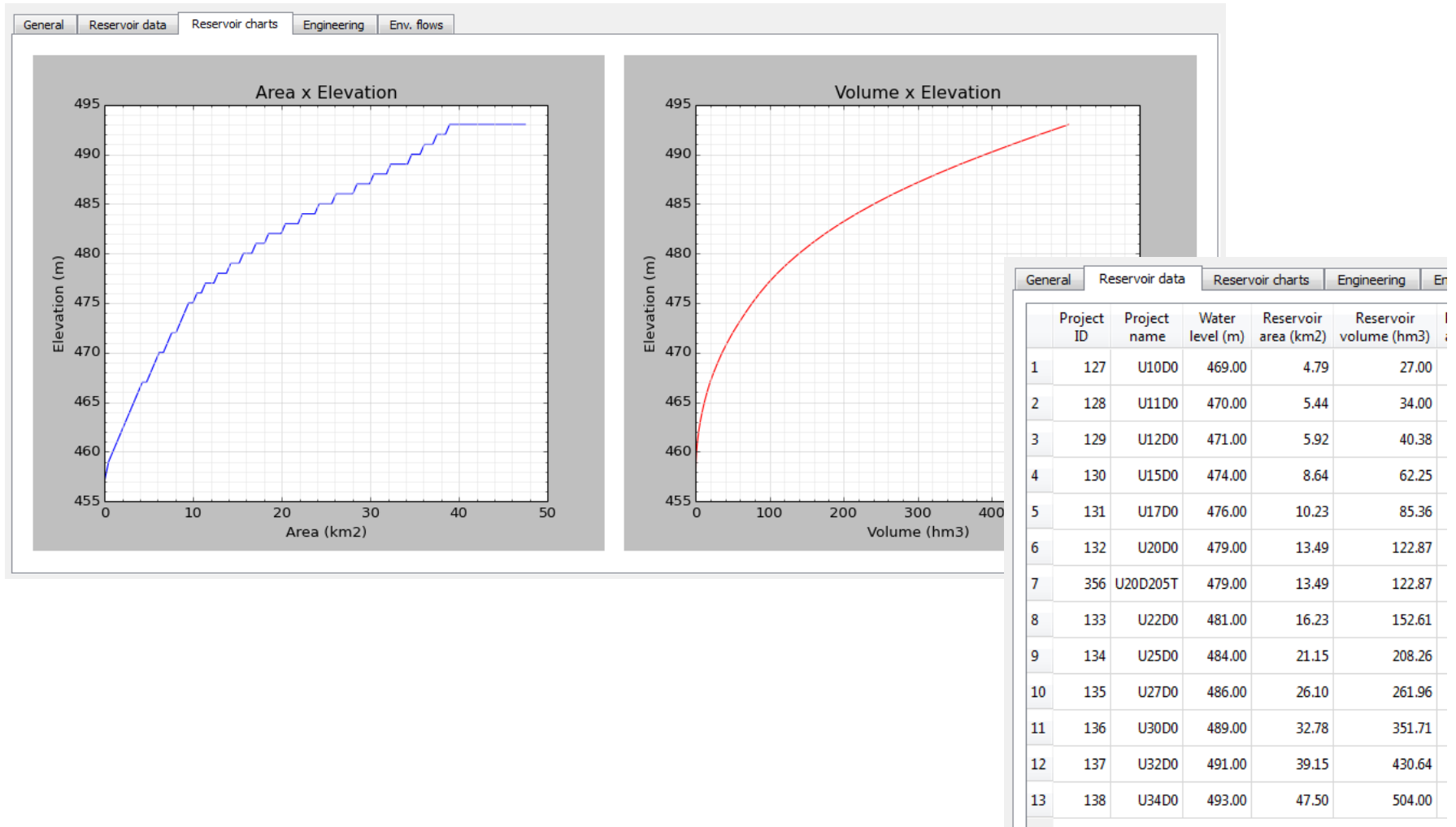


H = 27m



H = 35m

Propriedades de Reservatórios



Crítérios de Dimensionamento

Características Energéticas

Parameters

Delete existing non-selected hydro projects ☐

Rebuild dam and reservoir of existing projects ☐

Maximum acceptable dam length (m)

Calculate reservoir metrics ☐

Calculate flows ☒

Default capacity factor (0 to 1)

Starting date for energy studies (mm/yyyy)

Ending date for energy studies (mm/yyyy)

Recalculate projects cost ☐

Cost estimator

Filter Sites

Site name	Site ID	Site ID	Site name	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Restitution coord. X	Restitution coord. Y	Capacity factor (0 to 1)	Power (MW)	Water transfer project ID	Cost (MM \$)
1	PPG-234b	136	1	136	PPG-234b	556	U27D0	27.0	0.0				753.02
			2	136	PPG-234b	557	U31D0	31.0	0.0				0.00
			3	136	PPG-234b	558	U35D0	35.0	0.0				313.70

Default capacity factor (0 to 1)

Starting date for energy studies (mm/yyyy)

Ending date for energy studies (mm/yyyy)

Capacity factor (0 to 1)	Power (MW)
0.60	
0.58	
	50

CrITÉRIOS de Dimensionamento

Vazões de Projeto

Parameters

Delete existing non-selected hydro projects ☐

Rebuild dam and reservoir of existing projects ☐

Maximum acceptable dam length (m)

Calculate reservoir metrics ☐

Calculate flows ☒

Default capacity factor (0 to 1)

Starting date for energy studies (mm/yyyy)

Ending date for energy studies (mm/yyyy)

Recalculate projects cost ☐

Cost estimator

	Site name	Site ID	Site ID	Site name	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Restitution coord. X	Restitution coord. Y	Capacity factor (0 to 1)	Power (MW)	River transfer project ID	Cost (MM \$)
1	JUI-117a	87	1	87	JUI-117a	358	U10D21	10.0	21.0					147.60
2	87	JUI-117a	359	U19D21	19.0	21.0								227.86
3	87	JUI-117a	360	U22D21	22.0	21.0								254.67

Design flows

	Average inflow (m3/s)	Spillway (m3/s)	Stilling basin walls (m3/s)	1st phase diversion (m3/s)	2nd phase diversion (m3/s)	Powerhouse deck (m3/s)
1		152.99	128.40	131.61	128.40	152.99
2		152.99	128.40	131.61	128.40	152.99
3		152.99	128.40	131.61	128.40	152.99

Environmental parameters

Protection area Minimum flows

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	10	15										
2												
3												

CrITÉrios de Dimensionamento

Geologia

Geology

Soil thickness:

Riverbed (m)

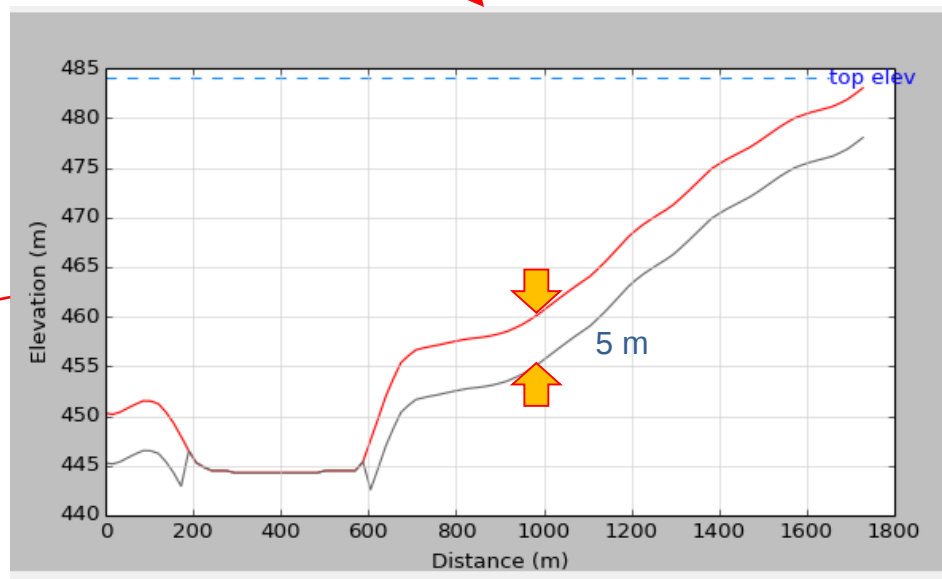
Right bank (m)

Left bank (m)

Rock quality

Tipos de Revestimento em
Túneis de Desvio e Adução

Cálculo de Volumes



Planilhas do Manual de Inventário, 2007 = Referência

-  hera_bulb
-  hera_channel_fh
-  hera_channel_fv
-  hera_channel_ka
-  hera_dams
-  hera_diccionary
-  hera_diversion
-  hera_filter
-  hera_kc
-  hera_penstock_fh
-  hera_penstock_fv
-  hera_penstock_ka
-  hera_quant
-  hera_spillway
-  hera_tunnel_fh
-  hera_tunnel_fv
-  hera_tunnel_p
-  hera_up_costs

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Ministério de Minas e Energia – MME SECRETARIA EXECUTIVA			MANUAL DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS						
2									Projetos e Consultorias de Engenharia	ENERGETICA-TECH CONSULTORIA LTDA	
3		TÍTULO: CASA DE FORÇA -TURBINAS KAPLAN COM CAIXA ESPIRAL DE AÇO			ARQUIVO	572ka.xls			REVISÃO.:	2007	
4											
5								posição do circuito	espessura do solo		
6								l	3.00		
7								b	1.00		
8								r	2.00		
9											
10		1. DADOS BÁSICOS:									
11		Dados para o dimensionamento									
12		P' =	300.00	MW	(Potência instalada inicial)						
13		N _g =	0	unidades	(Número de unidades geradoras - não o conhecendo, digitar o valor zero; será adotado o valor calculado)						
14											
15		NA _{max} =	309.00		(Nível de água máximo normal do reservatório)						
16		NA _{med} =	309.00		(Nível de água médio do reservatório)				NA revistos		
17		NA _{fu} =	286.00		(Nível de água normal do canal de fuga)				292.15	qmaxturb =	1,536.01 m³/s
18		NA _{nfu} =	285.00		(Nível de água mínimo no canal de fuga)				287.99	qmin1maq =	512.00 m³/s
19		h _p % =	3.00	%	(Perda de carga na adução, em % de H _{b1})						
20											

iohska1	hska1intake	hska1penstock	hska1phouse	hska1tailrace	convert
iohska1	hska1intake	hska1penstock	hska1phouse	hska1tailrace	convert

Integração entre o HERA e o Excel = Flexibilidade

Valores preenchidos
pelo HERA

Planilha de
Dimensionamento

Valores lidos e
processados pelo HERA

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	~IN							~OUT					
2	spw_strc_dfld_q	100 m³/s	1	Qv	vazão de projeto para dimensionamento do vertedouro			spw_dims_head_h	1.50 m	2			carga hidráulica do vertedouro (Hd)
3	spw_edis_dfld_q	50 m³/s	1	Qc	vazão de projeto para o muro da estrutura de dissipação			spw_ogee_pilr_n	2	1			quantidade de pilares
4	res_mmax_rise_h	3 m	1		sobrelevação máxima			spw_ogee_pilr_th	2.58 m	2	e _{pl}		espessura dos pilares extremos
5	res_max0_0000_wl	290.00 m	1	NA _{max}	nível máximo normal do reservatório			spw_strc_totl_w	30.15 m	1	B _{vt}		largura total do vertedouro
6	geo_qual_rock_x	3	1		qualidade da rocha			spw_edis_totl_w	24.97 m	2	B _{bd}		largura da bacia de dissipação
7	geo_soil_lbnk_th	2.00 m	1	e _{te}	espessura de solo na margem esquerda			spw_chan_appr_el	284.00 m	2	El _{cv}		elevação do canal de aproximação
8	geo_soil_rbed_th	1.00 m	1	e _{te}	espessura de solo no leito			spw_ogee_gate_n	1	3	N _{cp}		quantidade de vãos do vertedouro (aqui, sempre igual a 1)
9	geo_soil_rbnk_th	3.00 m	1	e _{te}	espessura de solo na margem direita			spw_ogee_gate_w	24.97 m	3	B _{cp}		largura de um vão do vertedouro
10	rtc_dam0_zero_wl	275.00 m	1		zero da equação da curva-chave no eixo de barramento			spw_ogee_sill_el	290.00 m	2			elevação da ogiva do vertedouro
11	rtc_dam0_a0cf_k	0.24	1		coeficiente da equação da curva-chave no eixo de barramento			spw_edis_sill_el	285.00 m	1	El _{bd}		elevação da soleira da bacia de dissipação
12	rtc_dam0_b0cf_k	0.48	1		expoente da equação da curva-chave no eixo de barramento			spw_edis_wall_el	277.57 m	2			elevação do muro da bacia de dissipação
13	lay_spw0_lctn_x	b	2		posição do vertedouro no eixo (r - margem direita; b - leito; l - margem esquerda)			spw_chan_rest_el	275.00 m	2	El _{cr}		elevação do canal de restituição
14	spw_ogee_cter_el	285.00 m	2		elevação obtida da topografia, valor inicial é zero			spw_ogee_sill_l	5.63 m	2	L _{ov}		comprimento da ogiva do vertedouro
15	spw_edis_sill_el	275.00 m	2		elevação da soleira da bacia de dissipação, valor inicial é zero			spw_edis_totl_l	10.71 m	2	L _{bd}		comprimento da bacia de dissipação
16	hyd_rver_axis_w	30.00 m	1		largura do rio no eixo do barramento			spw_geom_000a_i	0.75	2			geometria da crista HDC 111-20, plate 3-2, inclinação "a" da reta d
17	dam_mxwl_axis_w	150.00 m	1		extensão do eixo do barramento no NA normal			spw_strc_totl_l	16.34 m	2	L _{vt}		comprimento total do vertedouro
18								spw_edis_curv_r	1.12 m	2	R _{bd}		raio de curvatura na entrada da bacia
19								res_max0_max0_wl	291.50 m	1	NA _{mxm}		nível máximo maximum do reservatório



hera_spillway

iosp4

sp4uhosb

Padronização das Variáveis

 **hera_diccionario**

Articulação
com o
HERA

	Código	Unidade										Definição
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
35	dam_crst_0000_el	DAM		CRST		0000		EL	m		X	dam crest elevation
36	dam_crst_0000_l	DAM		CRST		0000		L	m		X	dam crest width
37	dam_crst_max0_h	DAM		CRST		MAX0		H	m			maximum dam height
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	M
320	pwh_genr_0000_ct	PWH		GENR		0000		CT	\$			custo de um gerador
321	pwh_genr_hous_d	PWH		GENR		HOUS		D	m	D _{pg}	X	diâmetro do poço do gerador
322	pwh_genr_totl_n	PWH		GENR		TOTL		N			X	quantidade de geradores
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	N
71	div_cfdl_dfld_q	DIV		CFD1		DFLD		Q			X	caudal de diseño para las estructuras de la primera fase del desvío
72	div_cfdl_dwst_el	DIV		CFD1		DWST		EL	m			elevación de la cresta de la ataguía de 1a fase aguas abajo
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	O
412	spw_strc_dfld_q	SPW		STRC		DFLD		Q			X	débit de projet pour dimmensioner l'évacuateur de crues
413	spw_strc_totl_l	SPW		STRC		TOTL		L	m	L _{vt}	X	longueur totale du évacuateur de crues
414	spw_strc_totl_w	SPW		STRC		TOTL		W	m	B _{vt}	X	largeur totale du évacuateur de crues

35 dam_crst_0000_el

322 pwh_genr_totl_n

Integração das Planilhas do Manual

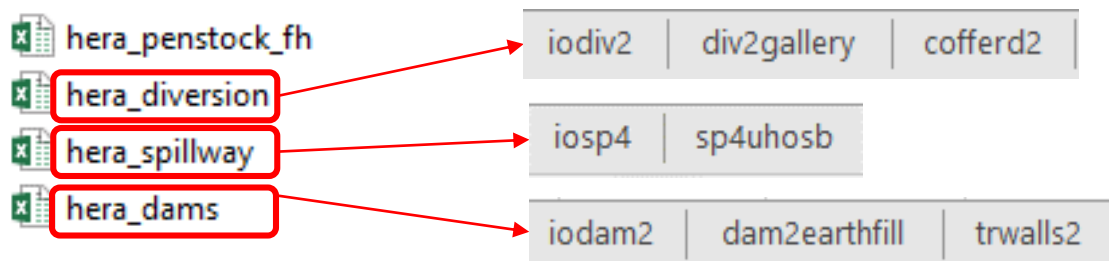
- ✓ Dimensionamento articulado das estruturas do circuito de geração em um único arquivo;

Exemplo: Circuito longo com derivação em túnel de adução e turbina Francis Vertical

iohsfv2	hsfv2route	hsfv2intake	hsfv2tunnel	hsfv2stank	hsfv2phouse	hsfv2tailrace	convert
----------------	------------	-------------	-------------	------------	-------------	---------------	---------

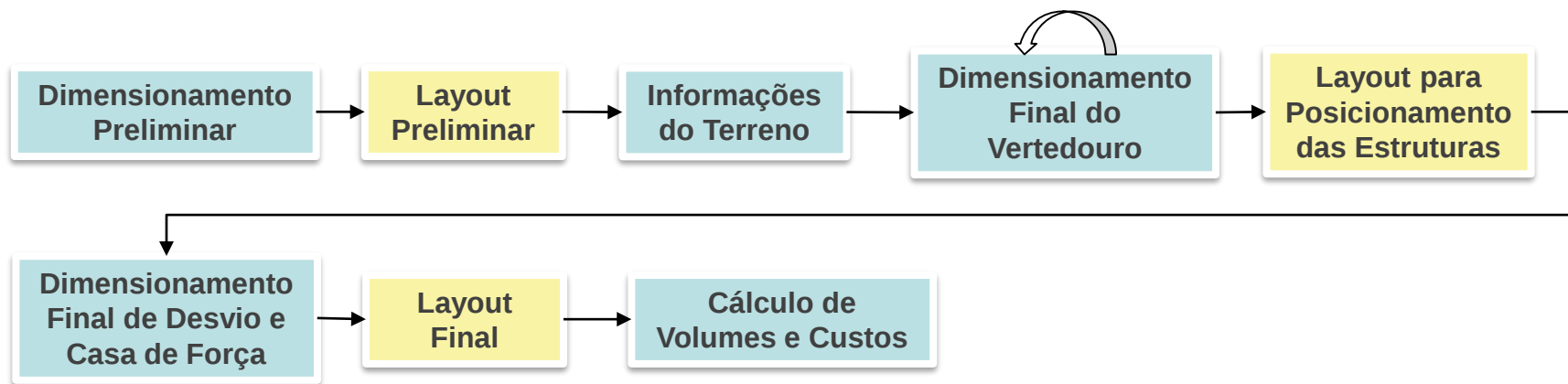
- ✓ Composição de arranjos a partir da integração das planilhas de desvio, vertedouro, barragem e circuitos de geração no workflow do HERA.

Exemplo: Arranjo com desvio por galeria, vertedouro livre, barragem de terra e circuito curto com Francis Horizontal



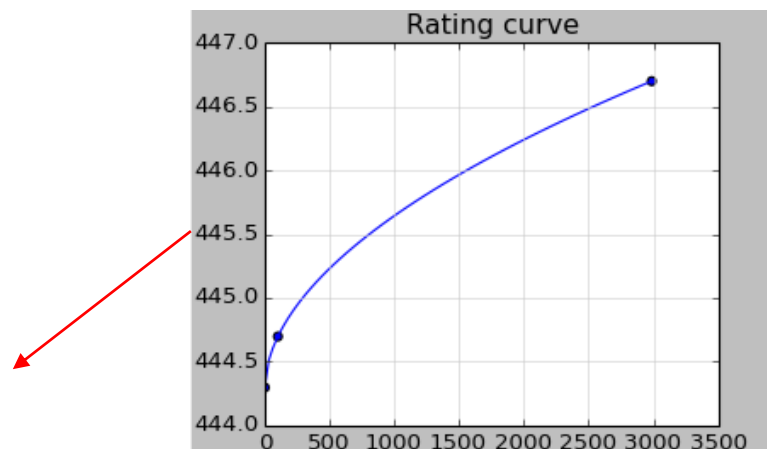
Adaptações e Melhorias

- ✓ Soluções para cálculos iterativos no workflow do HERA.



- ✓ Definição pelo HERA de curva-chave para os locais de interesse;

Definição de Níveis
d'Água para as
Vazões de Projeto



“Templates”

Alternativas de Conjunto de Estruturas Disponíveis
63 alternativas

	A	BCDEFGH	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	BBBBBBBBBBBBBBBBBBBB					
1	Estruturas	Templates																									
2																											
3	Casa de Força																										
4	Bulbo																										
5	Kaplan Concreto																										
6	Kaplan Aço																										
7	Francis Vertical																										
8	Francis Horizontal																										
9	Pelton																										
10																											
11	Circuito																										
12	Compacto																										
13	Curto com Condutos																										
14	Longo com Túnel																										
15	Longo com Canal																										
16																											
17	Desvio																										
18	2 Fases no Leito sem Adufas																										
19	2 Fases no Leito com Adufas																										
20	Túnel																										
21	Galeria																										
22																											
23	Vertedouro																										
24	Controlado com Bacia																										
25	Controlado com Salto de Esqui																										
26	Controlado de Encosta																										
27	Livre com Bacia																										
28																											
29	Barragem																										
30	Concreto																										
31	Terra																										
32	Enrocamento																										
33	Muros de Transição																										

“Layouts”

	A	BCDEFGH I JKLMNCPGRSTUVWXY ZAAABBBBBBBBBBBBBBBE
34		
35	Layout	
36		
37	VT e TA no Leito do Rio	
38		
39	Vertedouro a direita do centro	
40	Tomada d'Água a direita do VT	
41		
42	Vertedouro a esquerda do centro	
43	Tomada d'Água a esquerda do VT	
44		
45	Estruturas nas Margens	
46		
47	Vertedouro na M Direita	
48	Tomada d'Água na M Esquerda	
49		
50	Vertedouro na M Esquerda	
51	Tomada d'Água na M Direita	
52		
53	Vertedouro na M Direita	
54	Tomada d'Água na M Direita	
55		
56	Vertedouro na M Esquerda	
57	Tomada d'Água na M Esquerda	
58		
59	VT no Leito e TA na Margem	
60		
61	Vertedouro no centro	
62	Tomada d'Água na M Esquerda	
63		
64	Vertedouro no centro	
65	Tomada d'Água na M Direita	

templates x layouts
162 combinações

Alternativas de posicionamento das estruturas ao longo do eixo da barragem

16 alternativas

Filtros

Evitam a simulação de alternativas tecnicamente inviáveis

Arranjo em derivação com queda total de 45m

3	enr_head_upst_h	10.0 m
4	enr_head_dwst_h	35.0 m

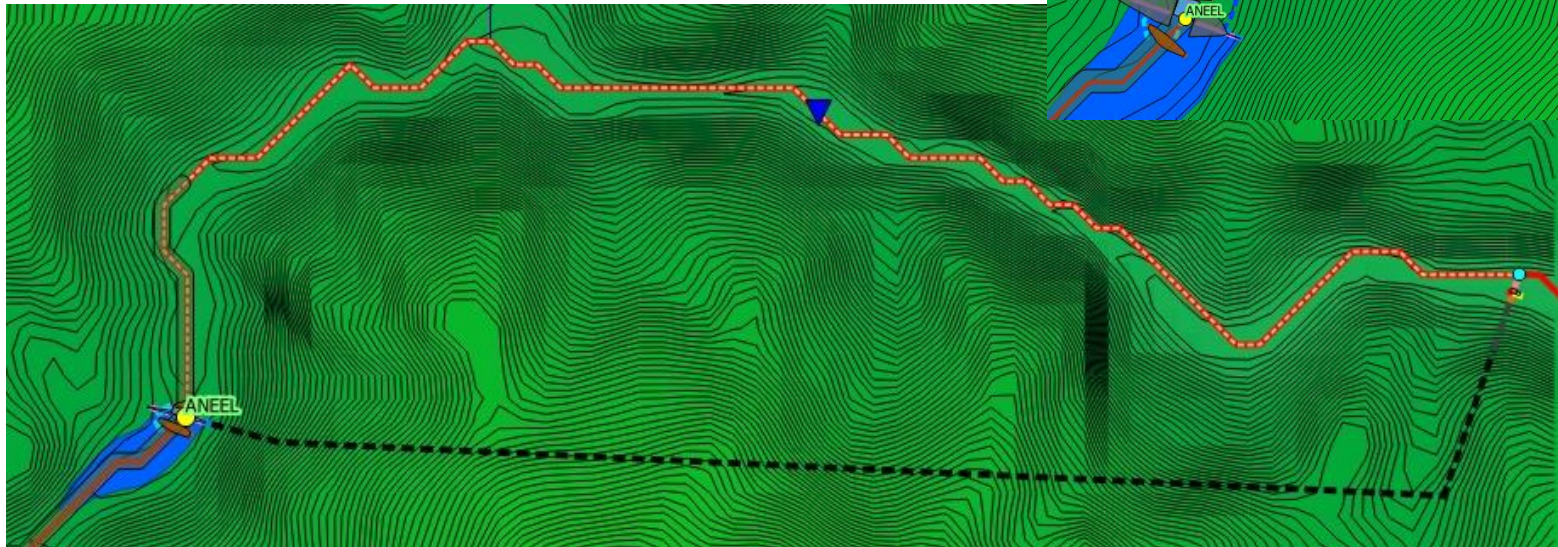
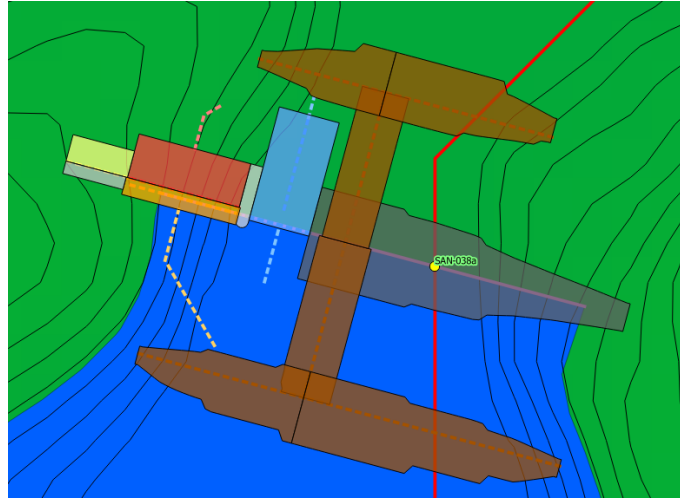
Alternativas ao pé da barragem e de túnel com turbina Pelton eliminadas

fil_bulb_foot_x	FALSO
fil_frvt_foot_x	FALSO
fil_frvt_tunl_x	VERDADEIRO
fil_frvt_chan_x	VERDADEIRO
fil_frhz_foot_x	FALSO
fil_frhz_tunl_x	VERDADEIRO
fil_frhz_chan_x	VERDADEIRO
fil_kapc_foot_x	FALSO
fil_kaps_foot_x	FALSO
fil_kaps_chan_x	VERDADEIRO
fil_pelt_tunl_x	FALSO

 hera_filter

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	~IN							~OUT			
2	enr_inst_cpcy_p	30.0 MW		P'		potência instalada		fil_bulb_foot_x	FALSO		filtro para seleção de turbina bulbo ao pé da barragem
3	enr_head_upst_h	10.0 m				queda bruta resultante do barramento		fil_frvt_foot_x	FALSO		filtro para seleção de turbina francis vertical ao pé da barragem
4	enr_head_dwst_h	35.0 m				queda bruta resultante da derivação em circuito longo		fil_frvt_tunl_x	VERDADEIRO		filtro para seleção de turbina francis vertical com circuito em túnel
5	spw_strc_dfld_q	7577.6 m³/s		Qv		vazão para cheia de TR10000		fil_frvt_chan_x	VERDADEIRO		filtro para seleção de turbina francis vertical com circuito em canal
6	div_cfd2_dfld_q	120.0 m³/s		Q _k		vazão de projeto para as estruturas da 2a fase de desvio		fil_frhz_foot_x	FALSO		filtro para seleção de turbina francis horizontal ao pé da barragem
7	geo_qual_rock_x	1				qualidade da rocha		fil_frhz_tunl_x	VERDADEIRO		filtro para seleção de turbina francis horizontal com circuito em túnel
8	res_max0_0000_wl	458.00 m		NA _{max}		nível máximo normal do reservatório		fil_frhz_chan_x	VERDADEIRO		filtro para seleção de turbina francis horizontal com circuito em canal
9	hyd_dam0_rbnk_el	414.00 m		1 Na _{fu}		elevação das margens no local do eixo da barragem		fil_kapc_foot_x	FALSO		filtro para seleção de turbina kaplan concreto ao pé da barragem
10								fil_kaps_foot_x	FALSO		filtro para seleção de turbina kaplan aço ao pé da barragem
11								fil_kaps_chan_x	VERDADEIRO		filtro para seleção de turbina kaplan aço com circuito em canal
12								fil_pelt_tunl_x	FALSO		filtro para seleção de turbina pelton com circuito em túnel

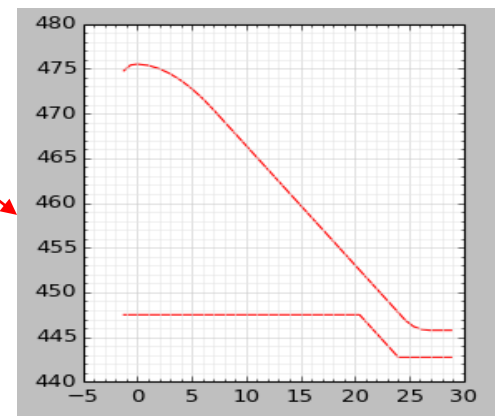
Exemplos





Aspectos Inovadores

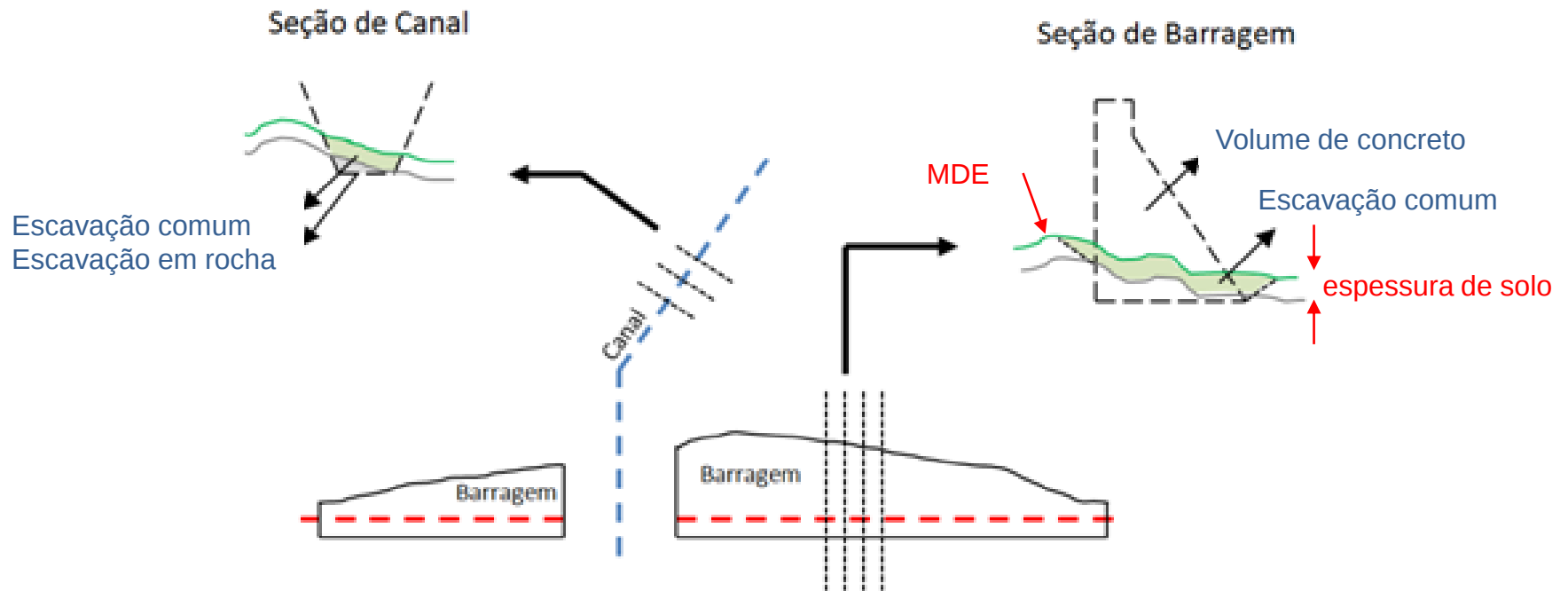
- ✓ Determinação pelo HERA de quantitativos de corte e aterro por integração;
- ✓ Alternativas de Revestimento para túneis de desvio e adução;
- ✓ Definição simplificada do volume de concreto de casas de força;
- ✓ **Cálculo da geometria da ogiva do vertedouro;**
- ✓ Balanceamento simplificado de materiais para composição de custos.



Aspectos Inovadores

Quantitativos calculados no ambiente do HERA por integração numérica:

HERA →  hera_quant

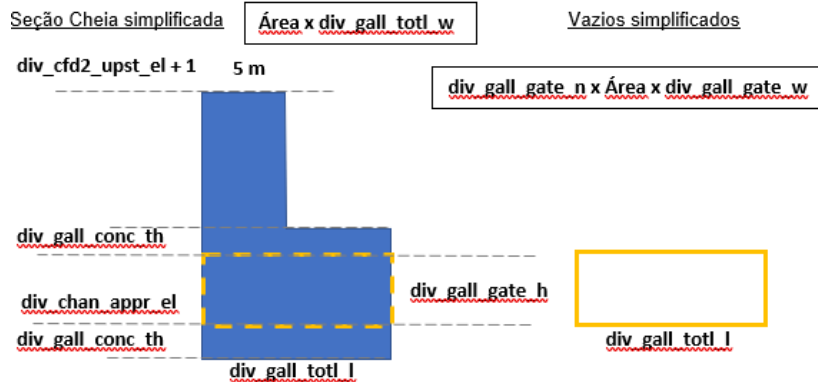


Aspectos Inovadores

Quantitativos calculados em planilha:



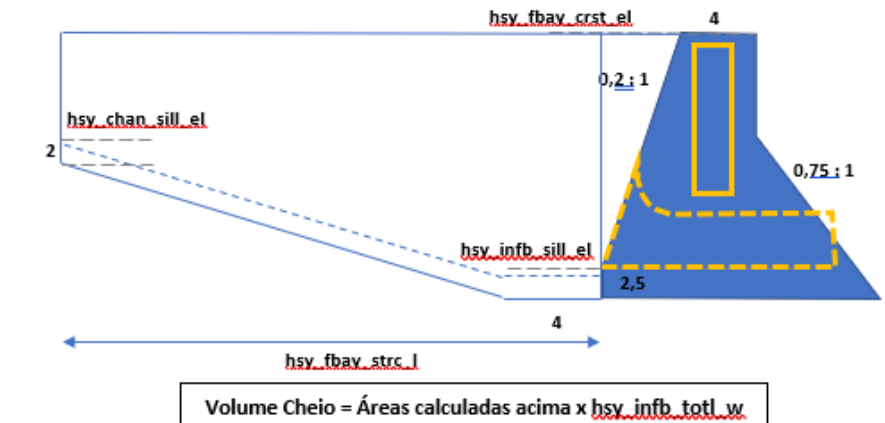
Galeria de Desvio:



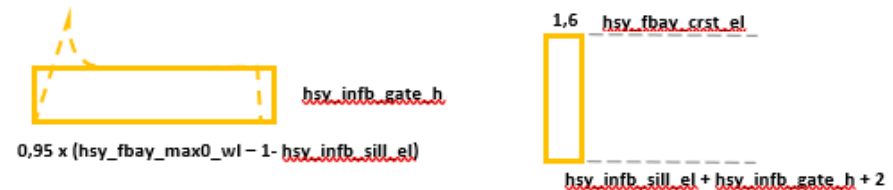
Tampão: $\text{div_gall_gate_n} \times [1,5 \times (\text{div_gall_gate_h}^2 \times \text{div_gall_gate_w})]$, em m³

Câmara de Carga e Tomada dos Conduitos:

Seção Cheia simplificada



Vazios simplificados



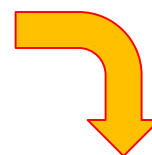
Aspectos Inovadores

Balanceamento de Materiais:

32	QUANTITIES SUMMARY		
33			
34			
35	ITEM	UNIT	QUANTITY
36	Common excavation	m³	9,300
37	Surface rock excavation	m³	21,400
38	Underground rock excavation	m³	10,600
39	Borrow soil	m³	0
40	Quarry rock	m³	12,000
41	Foundation cleaning and treatment - dam earthworks	m²	0
42	Foundation cleaning and treatment - concrete structures	m²	6,300
43	Cofferdam removal	m³	500
44	Cofferdam - 1st phase	m³	0
45	Cofferdam - 2nd phase	m³	1,000
46	Compacted earthfill	m³	0
47	Clay core	m³	8,000
48	Rockfill	m³	16,000
49	Filters and transitions	m³	0
50	Rip-rap or rockfill protection	m³	0
51	Downstream face protection (grass)	m²	0
52	Cement	t	8,088
53	Structural concrete	m³	26,100
54	Roller-compacted or mass concrete	m³	500
55	Shotcrete	m³	1,900
56	Reinforcement steel	t	1,996
57	Steel lining of penstocks	t	589
58			
59			

◀ ▶
iocosts
unit_prices
summary
balance
budget

 hera_up_costs



1	CUT AND FILL VOLUMES		
2		Unit	Volume
3	Rock Excavation	m³	32,000
4	Required Rockfill and Aggregates	m³	43,112
5	Cofferdam - 1st phase	m³	0
6	Cofferdam - 2nd phase	m³	293
7	Rockfill	m³	14,960
8	Filters and transitions	m³	0
9	Rip-rap or rockfill protection	m³	0
10	Concrete	m³	27,859
11	Quarry rock	m³	12,000
12			
13	Common Excavation	m³	9,300
14	Required Earthfill	m³	880
15	Cofferdam - 1st phase	m³	0
16	Cofferdam - 2nd phase	m³	880
17	Compacted earthfill	m³	0
18	Clay core	m³	0
19	Borrow soil	m³	0

iocosts
unit_prices
summary
balance
budget

Sistema de Contas do Manual de Inventário = Referência

 hera_up_costs

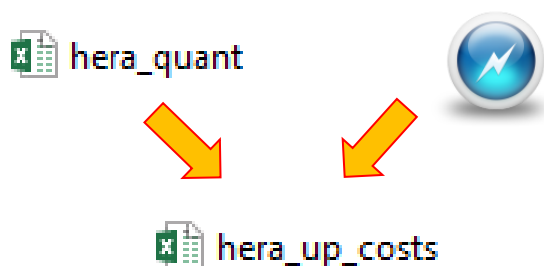
	A	B	C	D	E	F
61	.10.15.47.17	Other costs	gl			0.00
62	.10.15.48	MULTIPLE USES	gl			0.00
63	.10.15.13	OTHER COSTS	gl			0.00
64		Subtotal of account .10				0.00
65	.10.27	MISCELLANEOUS ITEMS FROM ACCOUNT .10	%	20.00	0.00	0.00
66						
67	.11.	POWERHOUSE (CIVIL CONSTRUCTION) AND RELATED LAND DEVELOPMENTS				7,612.20
68	.11.12	LAND DEVELOPMENTS IN THE PLANT AREA	gl	1	929,000.00	929.00
69	.11.13	POWERHOUSE				5,414.50
70	.11.13.00.12	Excavation	gl			274.00
71	.11.13.00.12.10	Common	m³	4,000	8.50	34.00
72	.11.13.00.12.11	Surface rock	m³	10,000	24.00	240.00
73	.11.13.00.12.12	Underground rock	m³	0	139.00	0.00
74	.11.13.00.13	Foundation cleaning and treatment	m²	500	37.00	18.50
75	.11.13.00.14	Concrete	gl			3,872.00
76	.11.13.00.14.13	Cement	t	2,400	180.00	432.00
77	.11.13.00.14.14	Concrete without cement	m³	8,000	220.00	1,760.00
78	.11.13.00.14.15	Reinforcement steel	t	600	2,800.00	1,680.00
79	.11.13.00.15	Installations and final works	gl	1	1,250,000.00	1,250.00
80		Subtotal of Account .11				6,343.50
81	.11.27	MISCELLANEOUS ITEMS FROM ACCOUNT .11	%	20	6,343,500.00	1,268.70
82						
83	.12.	DAMS AND INTAKES				29,620.38
84	.12.16	RIVER DIVERSION				1,658.44
85	.12.16.22	COFFERDAMS	m³			14.78
86	.12.16.22.12	Concrete for deflector baffle	gl			0.00
87	.12.16.22.19	Earth-rock cofferdam 1st Phase	m³	0	8.50	0.00
88						

[iocosts](#)
[unit_prices](#)
[summary](#)
[balance](#)
[budget](#)



1

Custos de Obras Civas



	A	B	C
1	~IN		
2	enr_inst_cpcy_p	100 MW	
3	pwh_strc_slex_m3	4000 m³	
4	pwh_strc_rkex_m3	10000 m³	
5	pwh_strc_ugex_m3	0 m³	
6	pwh_strc_trtm_m2	500 m²	
7	pwh_strc_conc_m3	8000 m³	
8	pwh_misc_ldev_ct	929,000 \$	
9	pwh_misc_inst_ct	1,250,000 \$	
10	pwh_turb_totl_n	2	
11	pwh_turb_0000_ct	7,180,000 \$	



	A	B	C	D
1	UNIT PRICES SUMMARY			
2				
3		ITEMS	UNIT	UNIT PRICE
4				
5		Common excavation	m³	3.82
6		Surface rock excavation	m³	10.57
7		Underground rock excavation	m³	70.43
8		Borrow soil	m³	7.87
9		Quarry rock	m³	10.77
10		Foundation cleaning and treatment - dam earthworks	m²	3.74
11		Foundation cleaning and treatment - concrete structures	m²	29.96
12		Cofferdam removal	m³	3.32
13		Cofferdam - 1st phase	m³	1.91
14		Cofferdam - 2nd phase	m³	1.66
15		Compacted earthfill	m³	1.35
16		Clay core	m³	5.58
17		Rockfill	m³	5.23
18		Filters and transitions	m³	13.08
19		Rip-rap or rockfill protection	m³	6.49
20		Downstream face protection (grass)	m²	2.97
21		Cement	t	175.08
22		Structural concrete	m³	100.62
23		Roller-compacted or mass concrete	m³	56.85
24		Shotcrete	m³	190.17
25		Reinforcement steel	t	2,176.91
26		Steel lining of penstocks	t	3,004.18
27		Local access	km	217,338.54
28		Local bridge access	m	25,154.92
29				
30				

unit_prices

summary

balance

budget

Custos de Equipamentos

hera_tunnel_fv

hera_up_costs

10	pwh_turb_totl_n	2
11	pwh_turb_0000_ct	7,180,000 \$
12	pwh_genr_totl_n	2
13	pwh_genr_0000_ct	12,580,000 \$
14	pwh_dtub_slog_n	2
15	pwh_dtub_slog_ct	84,000 \$

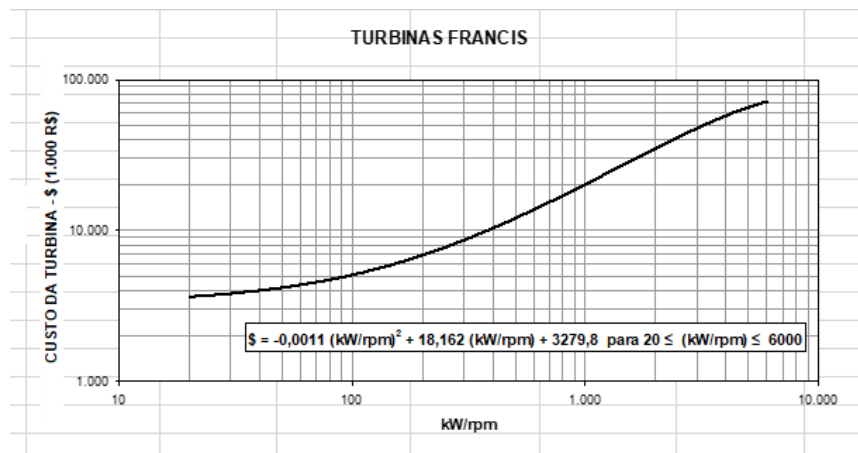


Gráfico do Manual de Inventário, 2007

iocosts	unit_prices	summary	balance	budget
----------------	-------------	---------	---------	--------

	A	B	C	D	E	F
319	.13.	TURBINES E GENERATORS				48,146.40
320	.13.13.00.23.17	Fixed wheel gates	un	2	84,000	168.00
321	.13.13.00.23.20	Crane	un			0.00
322	.13.13.00.23.28	Turbines	un	2	7,180,000	14,360.00
323	.13.13.00.23.29	Generators	un	2	12,580,000	25,160.00
324	.13.13.00.23.56	Other embeded parts	gl	1	434,000	434.00
325		Subtotal of Account .13				40,122.00
326	.13.27	EVENTUAIS DA CONTA .13	%	20	40,122,000.00	8,024.40
327						

iocosts	unit_prices	summary	balance	budget
---------	-------------	---------	---------	---------------

Conta 10

 hera_up_costs



	A	B	C	D
152	hera_env_res0_rurl_a	3867.1018	ha	rural properties affected by the reservoir
153	hera_env_res0_urbn_a	0	ha	urban properties affected by the reservoir
154	hera_env_res0_clea_a	3093.6814	ha	reservoir cleaning area
155	hera_env_res0_ppa0_a	0	ha	permanent preservation areas
156	hera_env_relc_road_l	0	km	length of roads to be relocated
157	hera_env_relc_rail_l	0	km	length of railways to be relocated
158	hera_env_relc_brdg_l	0	m	length of bridges to be relocated
159	hera_env_relc_tlin_l	0	km	length of transmission lines to be relocated
160	hera_env_inhb_rurl_n	0		number of inhabitants affected by the reservoir in rural areas
161	hera_env_inhb_urbn_n	0		number of inhabitants affected by the reservoir in urban areas

iocosts
unit_prices
summary
balance
budget

	A	B	C	D	E	F
1		INVENTORY STUDIES				
2		COST ESTIMATE SPREADSHEET				
3						
4						
5	ACCOUNT	ITEM	UNIT	UNIT PRICE		COSTS
6				QUANTITY	\$	\$ 10³
7	.10.	LANDS, RESETTLEMENTS, RELOCATIONS AND OTHER SOCIOENVIRONMENTAL ACTIONS				13,768.28
8	.10.10	LAND ACQUISITIONS AND LAND DEVELOPMENTS				665.14
9	.10.10.10	URBAN REAL ESTATE	m²			0.00
10	.10.10.10.10	Reservoir	ha	0	2,991.45	0.00
11	.10.10.10.11	Construction site, workers' camp, borrow areas, etc.	ha			0.00
12	.10.10.10.40	Conservation Areas and Permanent Preservation Areas	ha			0.00
13	.10.10.10.43	Towns and villages	gl			0.00
14	.10.10.10.44	Isolated social and economic infrastructure	gl			0.00
15	.10.10.10.17	Other costs	gl			0.00
16	.10.10.11	RURAL REAL ESTATE	gl			604.67
17	.10.10.11.10	Reservoir	ha	3,867	156.36	604.67
18	.10.10.11.11	Construction site, workers' camp, borrow areas, etc.	ha			0.00

iocosts unit_prices summary balance **budget**

Resultados

Engineering model build results

Layout DtrBnkDsch SpCbed invalidated: Coffor height greater than 80% of dam height

Template PhFrhz HsTunl DmRock SpUbas DvGall:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 190455099.608

Template PhFrvt HsChnl DmConc SpCbas DvSlui:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 203213653.503

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 235533698.177

Template PhFrvt HsChnl DmConc SpUbas DvGall:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 199834176.357

Template PhFrvt HsChnl DmEart SpCbas DvSlui:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 201885624.587

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 234083507.291

Template PhFrvt HsChnl DmEart SpUbas DvGall:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 203273276.708

Template PhFrvt HsChnl DmRock SpCbas DvSlui:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 201330526.553

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 233594398.559

Template PhFrvt HsChnl DmRock SpUbas DvGall:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 200852901.942

Template PhFrvt HsTunl DmConc SpUbas DvTunl:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 197519096.252

Template PhFrvt HsTunl DmConc SpUbas DvGall:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 197091833.179

Template PhFrvt HsTunl DmEart SpUbas DvTunl:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 196772366.379

Template PhFrvt HsTunl DmRock SpUbas DvTunl:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 196620835.242

Template PhKaps HsChnl DmConc SpCbas DvSlui:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 152432408.282

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 160855680.242

Template PhKaps HsChnl DmEart SpCbas DvSlui:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 151083142.803

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 159384252.793

Template PhKaps HsChnl DmRock SpCbas DvSlui:

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 150539586.491

Layout DtrBnkDsch SpCbed built with cost = 158906685.784

	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Gross head (m)	Turbined inflow (m3/s)	Capacity factor (0 to 1)	Power (MW)	Annual production (GWh)	Total cost (MM \$)	Unit cost (\$/kW)	Water level (m)	Reservoir area (km2)
1	584	U10D15	10.00	15.00	25.00	281.24	0.55	58.88	283.6	139.56	2370.37	335.00	0.53
2	586	U15D15	15.00	15.00	30.00	281.24	0.55	70.65	340.4	150.54	2130.74	340.00	1.17
3	518	U18D0	18.00	0.00	18.00	324.87	0.55	49.89	240.3	123.51	2475.65	343.00	1.77
4	519	U20D0	20.00	0.00	20.00	324.87	0.55	55.33	266.5	129.00	2331.47	345.00	2.04
5	520	U22D0	22.00	0.00	22.00	324.87	0.55	60.77	292.7	137.94	2269.90	347.00	2.54
6	585	U5D15	5.00	15.00	20.00	281.24	0.55	47.10	226.9	128.78	2734.19	330.00	0.37

--- Summary ---

Total cost for project U18D0(518) - template PhKaps HsComp DmRock SpCbas DvRbed - layout FtrBnkDsch SpLbed InLspw = 123505653.834

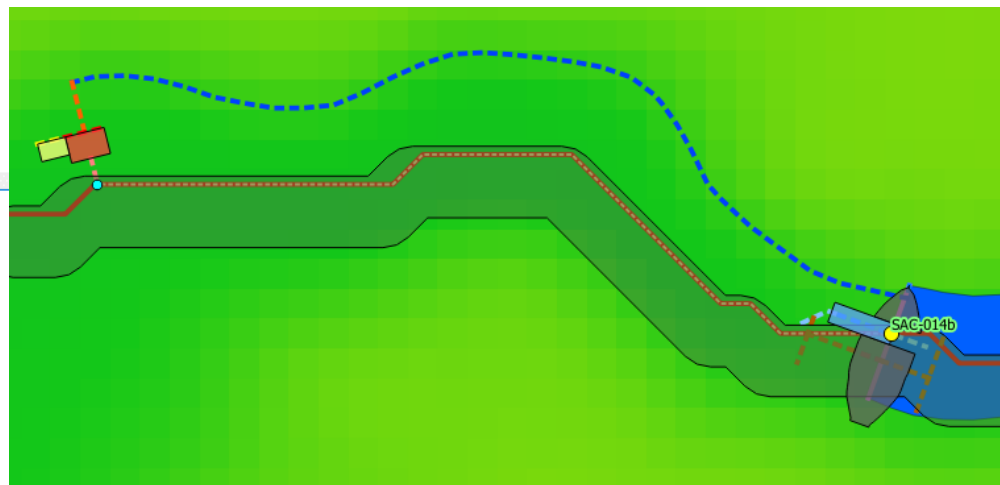
Total cost for project U20D0(519) - template PhKaps HsComp DmRock SpCbas DvRbed - layout FtrBnkDsch SpLbed InLspw = 128998206.925

Total cost for project U22D0(520) - template PhKaps HsComp DmRock SpCbas DvRbed - layout FtrBnkDsch SpLbed InLspw = 137941514.4

Total cost for project U5D15(585) - template PhKaps HsChnl DmRock SpCbas DvSlui - layout DtrBnkDsch SpRbed InRbnk = 128783143.499

Total cost for project U15D15(586) - template PhKaps HsChnl DmRock SpCbas DvSlui - layout DtrBnkDsch SpRbed InRbnk = 150539586.491

Total cost for project U10D15(584) - template PhKaps HsChnl DmRock SpCbas DvSlui - layout DtrBnkDsch SpRbed InRbnk = 139558590.575





Integração com Ferramentas BIM (Building Information Model)

- Desenvolvimento dos modelos parametrizados das estruturas:



- Programação para montagem automatizada dos arranjos selecionados dentro do ambiente Revit:



Computational Design for BIM

- Apresentação conceitual do empreendimento:



Estrutura dos Modelos

Exemplo: Casa de Força com turbina Bulbo

Parâmetros de entrada:

Tipos de famílias

Digite o nome:

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula	Bloquear
Materiais e acabamentos			
Cotas			
dam_crst_0000_el (padrão)	63.5000	=	☒
pwh_strc_deck_el (padrão)	53.8000	=	☒
pwh_turb_clin_el (padrão)	29.7300	=	☒
pwh_turb_rottr_d (padrão)	7.1000	=	☒
dam_crst_0000_l (padrão)	10.0000	=	☐
Mecânico			
A (padrão)	15.9750	= 2.25 * pwh_turb_rottr_d	☒
B (padrão)	14.2000	= 2 * pwh_turb_rottr_d	☒
L (padrão)	17.0400	= 2.4 * pwh_turb_rottr_d	☒
Q (padrão)	11.2180	= 1.58 * pwh_turb_rottr_d	☒
R (padrão)	11.2180	= 1.58 * pwh_turb_rottr_d	☒
S (padrão)	36.3520	= 5.12 * pwh_turb_rottr_d	☒
T (padrão)	20.3770	= 2.87 * pwh_turb_rottr_d	☒
X (padrão)	14.9100	= 2.1 * pwh_turb_rottr_d	☒
Outros			
dynm_lay_algn_000x_c (padrão)	0.0000	= 0 m	☐
dynm_lay_algn_000y_c (padrão)	0.0000	= 0 m	☐
dynm_lay_algn_000z_c (padrão)	33.7700	= Eixo_bulbo	☒

Gerenciar tabelas de pesquisa...

OK Cancelar Aplicar

Parâmetros de entrada (HERA)

Parâmetros de dimensionamento da turbina
(Manual de Inventário Hidrelétrico – ELETROBRÁS)

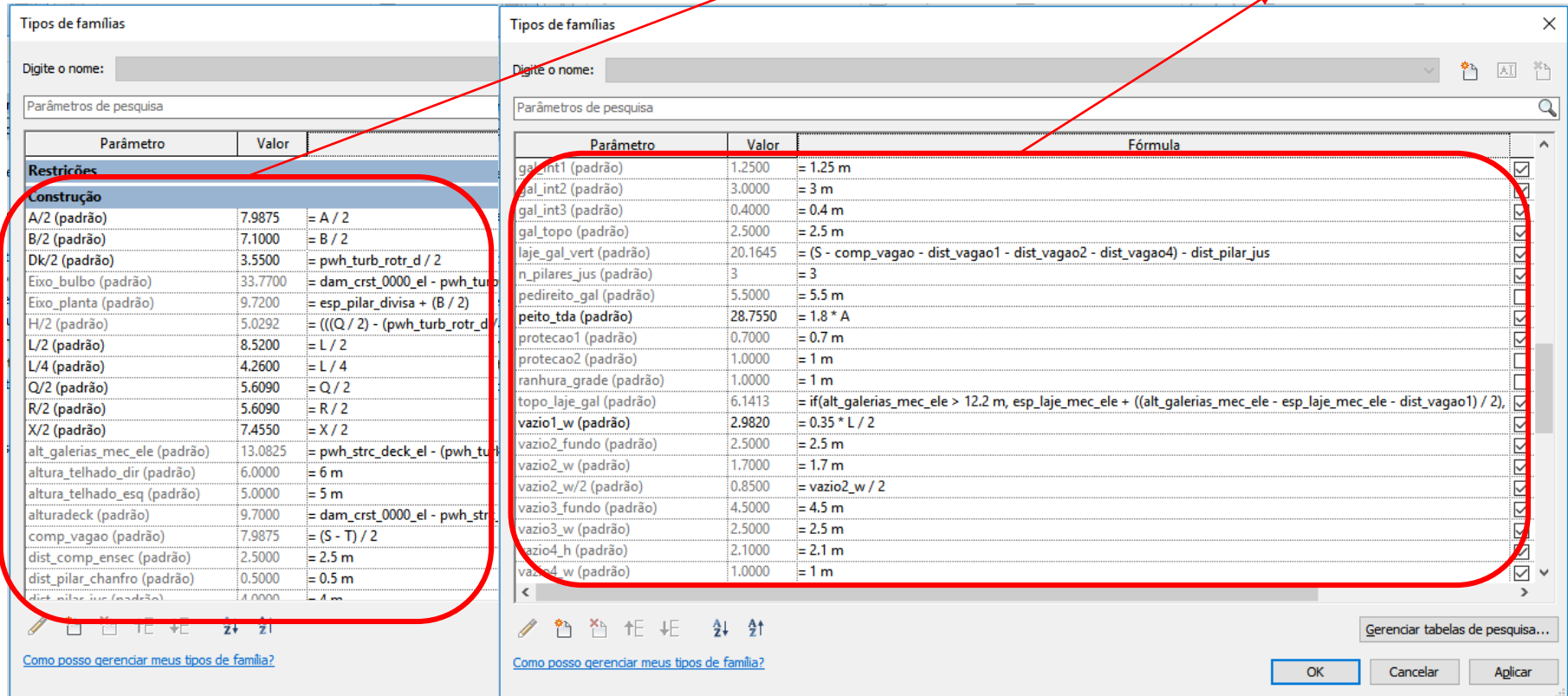
Variáveis Dynamo para posicionar as estruturas no arranjo

Estrutura dos Modelos

Exemplo: Casa de Força com turbina Bulbo

Parâmetros de construção:

Parâmetros internos de construção do modelo (com fórmulas ou critérios pré-estabelecidos)

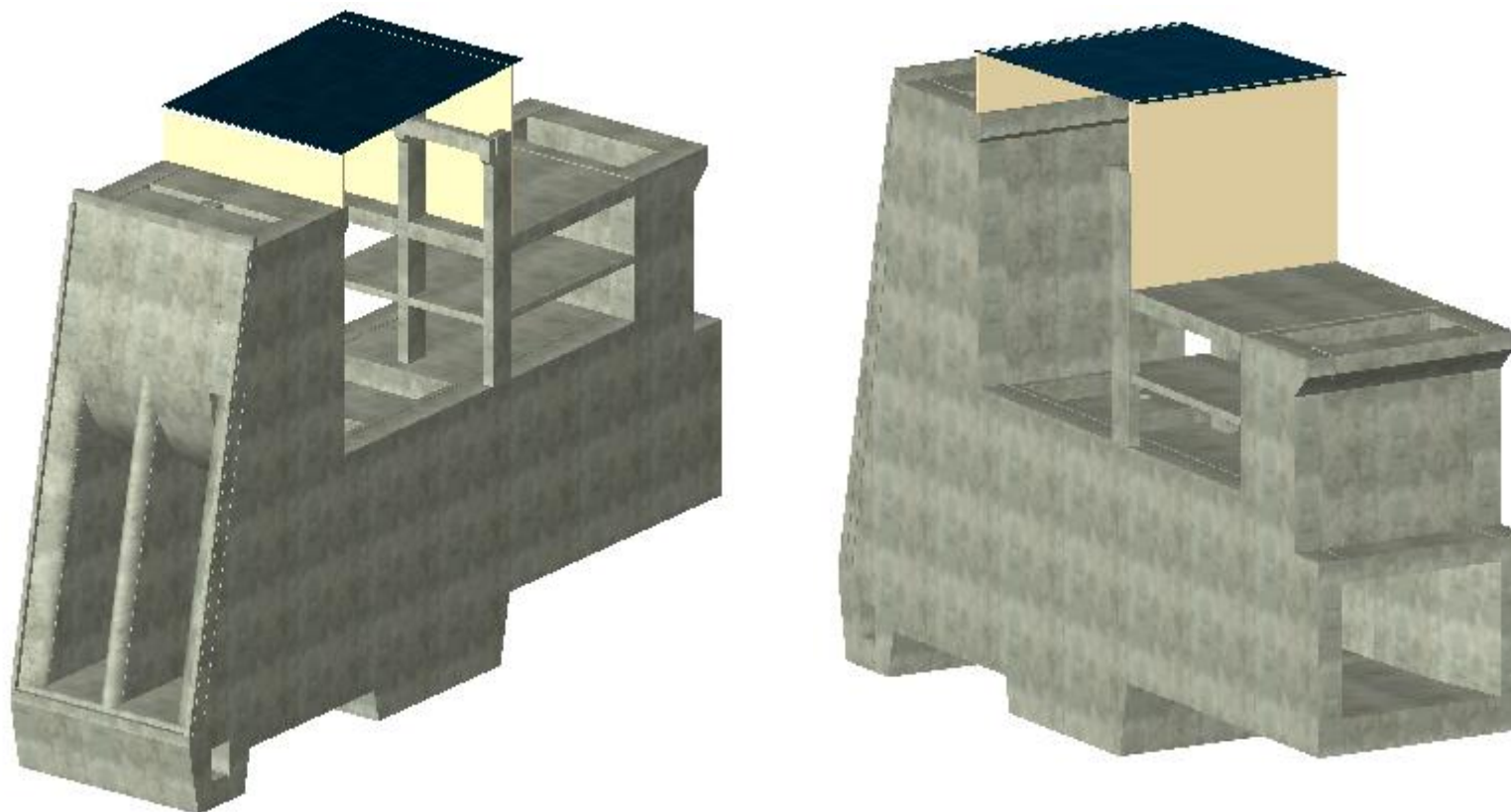


Parâmetro	Valor	Fórmula
gal_int1 (padrão)	1.2500	= 1.25 m
gal_int2 (padrão)	3.0000	= 3 m
gal_int3 (padrão)	0.4000	= 0.4 m
gal_topo (padrão)	2.5000	= 2.5 m
laje_gal_vert (padrão)	20.1645	= (S - comp_vagao - dist_vagao1 - dist_vagao2 - dist_vagao4) - dist_pilar_jus
n_pilares_jus (padrão)	3	= 3
pedreiro_gal (padrão)	5.5000	= 5.5 m
peito_tda (padrão)	28.7550	= 1.8 * A
protecao1 (padrão)	0.7000	= 0.7 m
protecao2 (padrão)	1.0000	= 1 m
ranhura_grade (padrão)	1.0000	= 1 m
topo_laje_gal (padrão)	6.1413	= if(alt_galerias_mec_ele > 12.2 m, esp_laje_mec_ele + ((alt_galerias_mec_ele - esp_laje_mec_ele - dist_vagao1) / 2),
vazio1_w (padrão)	2.9820	= 0.35 * L / 2
vazio2_fundo (padrão)	2.5000	= 2.5 m
vazio2_w (padrão)	1.7000	= 1.7 m
vazio2_w/2 (padrão)	0.8500	= vazio2_w / 2
vazio3_fundo (padrão)	4.5000	= 4.5 m
vazio3_w (padrão)	2.5000	= 2.5 m
vazio4_h (padrão)	2.1000	= 2.1 m
vazio4_w (padrão)	1.0000	= 1 m

Estrutura dos Modelos

Exemplo: Casa de Força com turbina Bulbo

Saída:



Vistas do Bloco da Casa de Força com turbina Bulbo.

Modelos parametrizados desenvolvidos no Revit

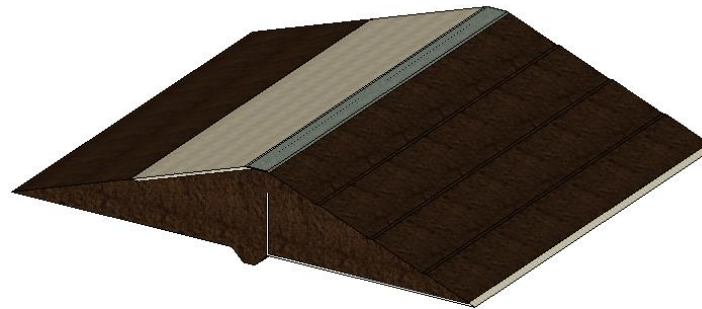
- Barragens (concreto, terra e enrocamento);
- Muros (abraço, encosto e divisor);
- Tomada d'água;
- Casas de Força / Áreas de Montagem:
 - Bulbo
 - Kaplan com caixa espiral em aço
 - Kaplan com caixa espiral em concreto
 - Francis de eixo vertical
 - Francis de eixo horizontal
 - Pelton de eixo horizontal
 - Pelton de eixo vertical
- Vertedouros:
 - Controlado com bacia de dissipação
 - Controlado com salto de esquí
 - Livre com bacia de dissipação

Modelos parametrizados desenvolvidos no Revit

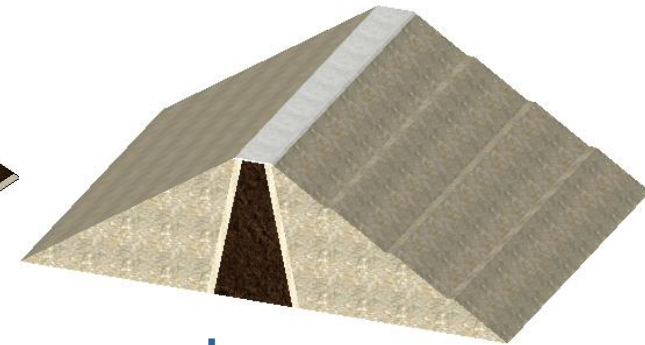
- Barragens e Muros



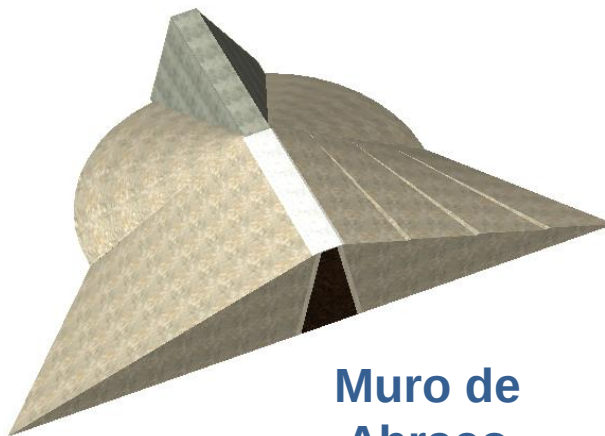
**Barragem de
Concreto**



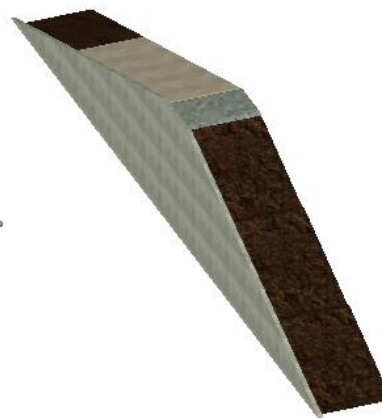
**Barragem de
Terra**



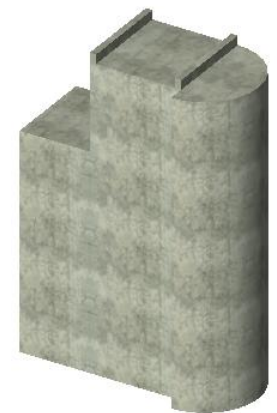
**Barragem de
Enrocamento**



**Muro de
Abraço**



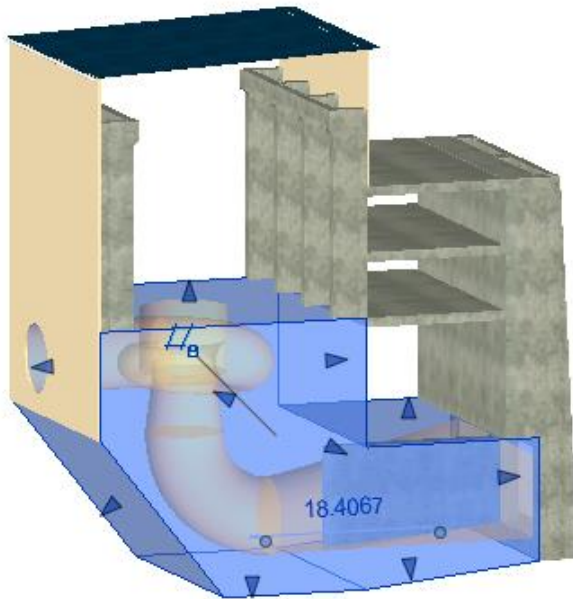
Muros de Encosto



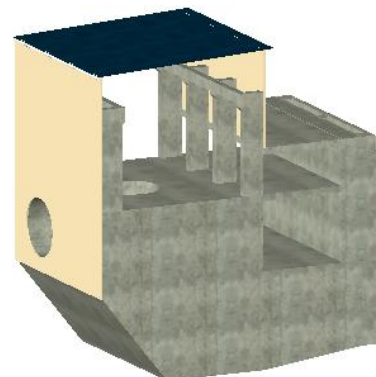
Muro Divisor

Modelos parametrizados desenvolvidos no Revit

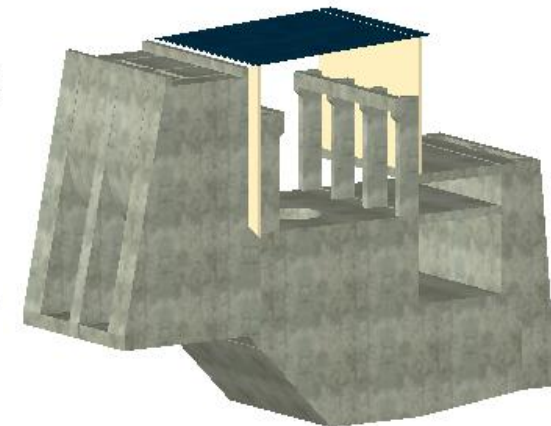
- Tomada d'Água e Casas de Força



**Francis
Vertical**



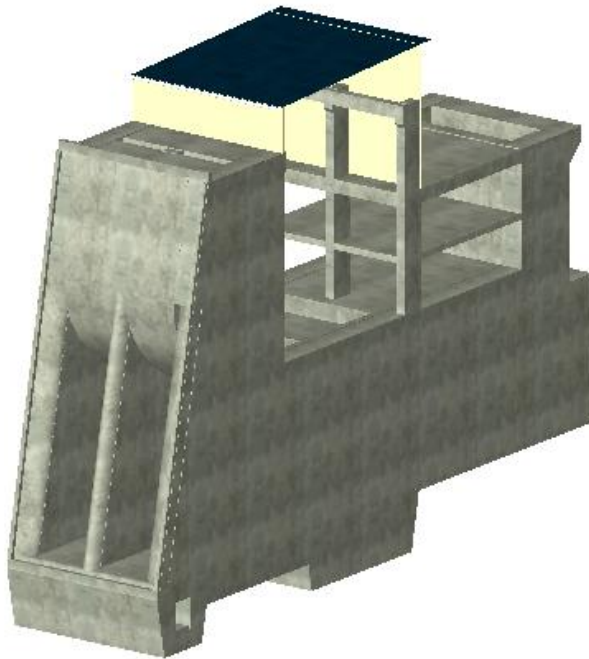
Kaplan Aço



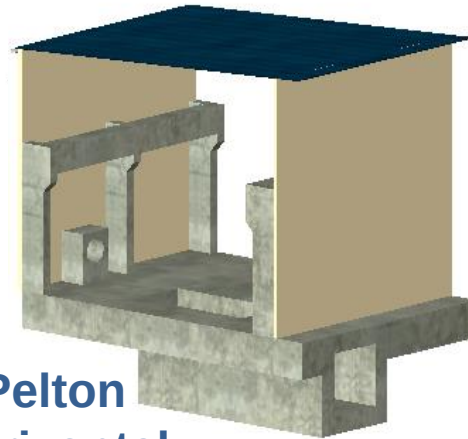
**Kaplan
Concreto**

Modelos parametrizados desenvolvidos no Revit

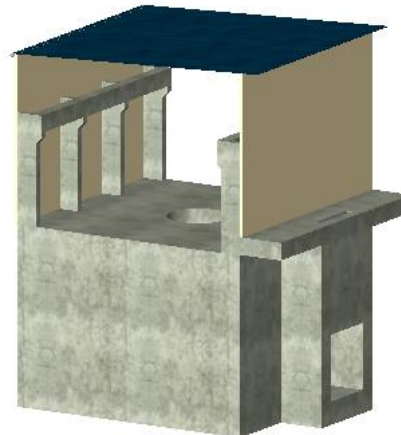
- Tomada d'Água e Casas de Força



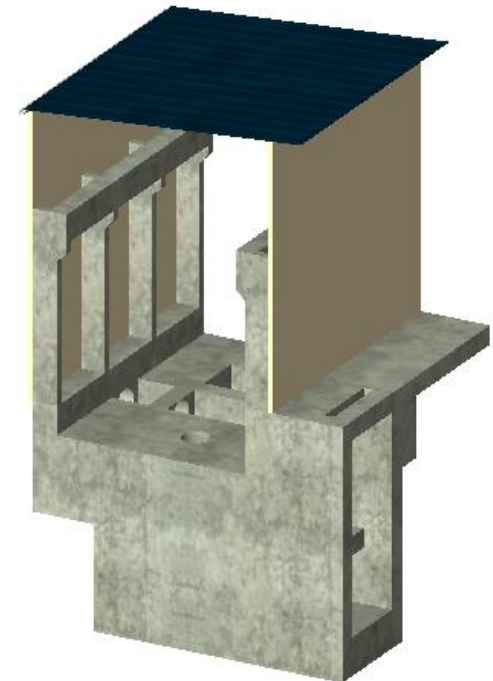
Bulbo



**Pelton
Horizontal**



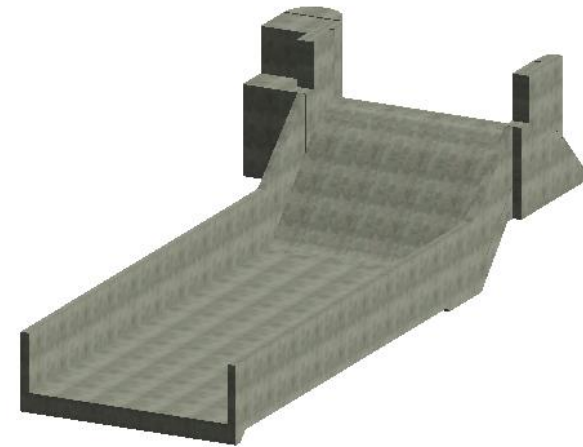
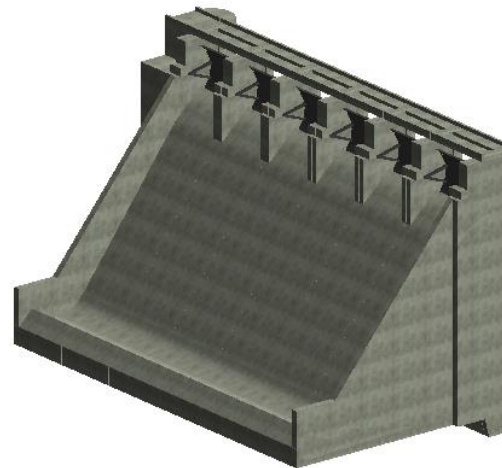
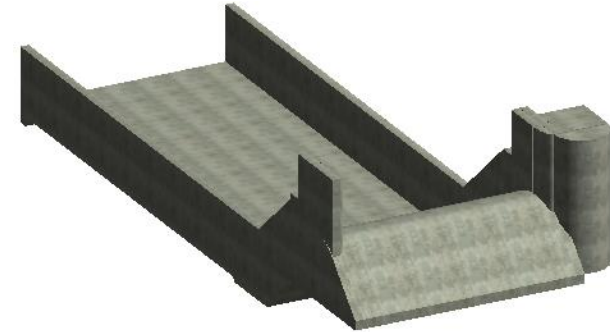
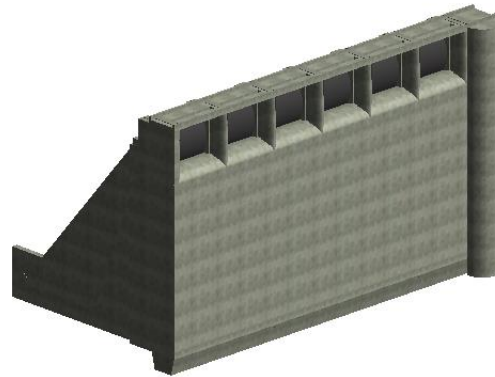
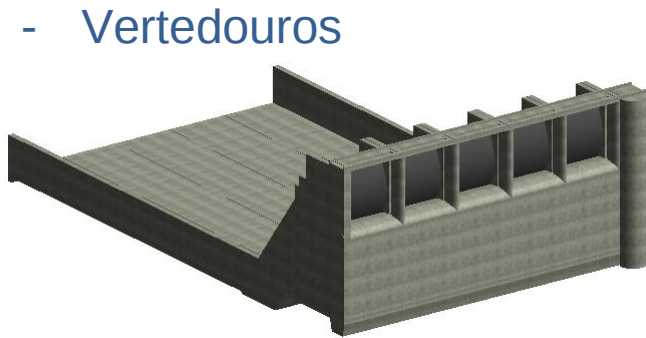
Pelton Vertical



**Francis
Horizontal**

Modelos parametrizados desenvolvidos no Revit

- Vertedouros



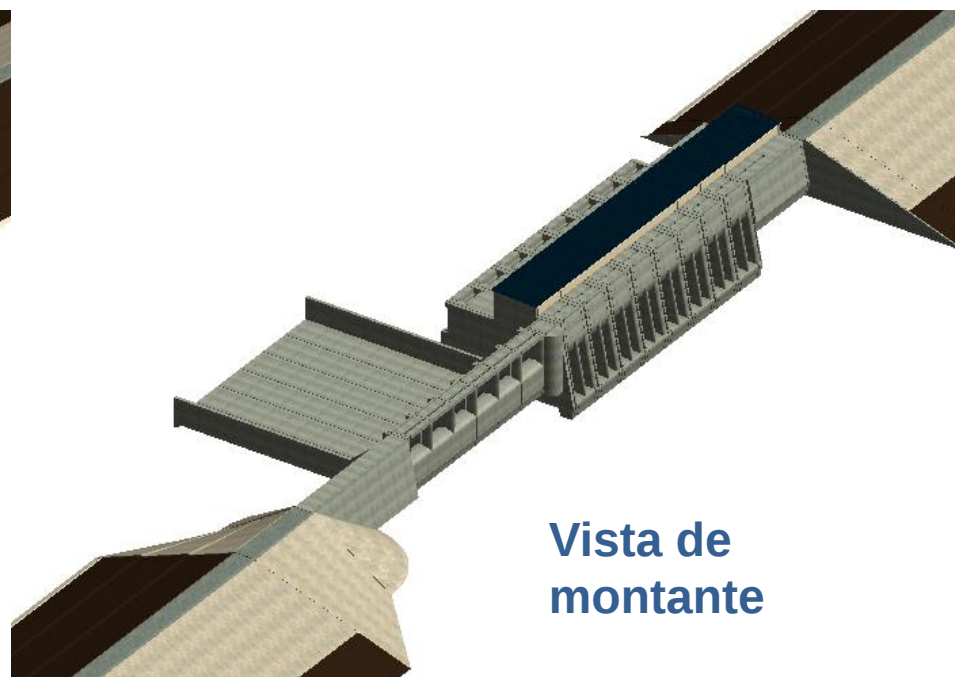
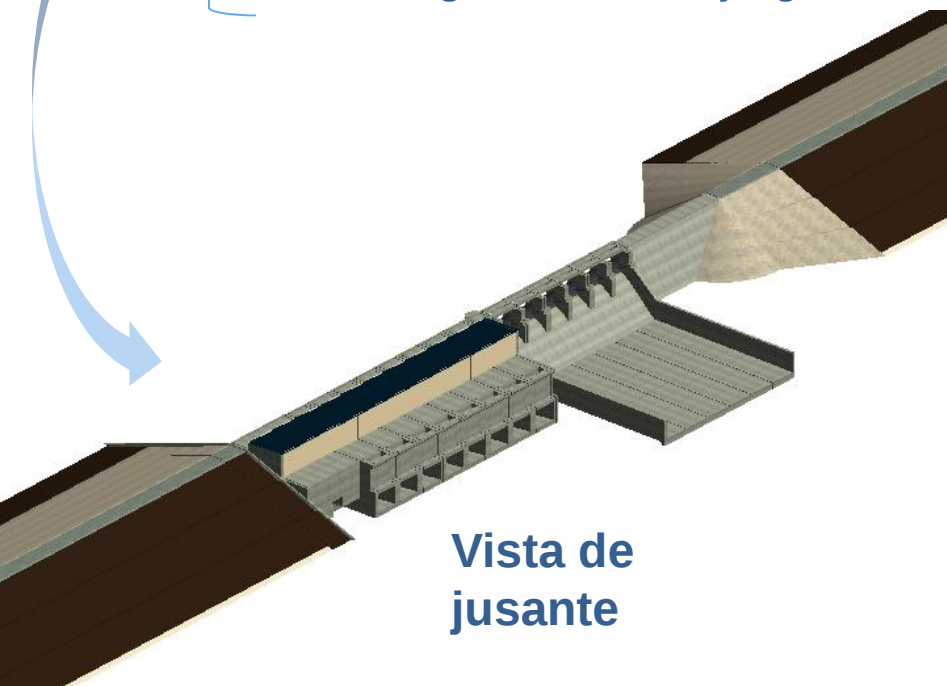
**VT controlado com bacia
de dissipação**

**VT controlado com
salto de esquí**

**VT livre com bacia de
dissipação**

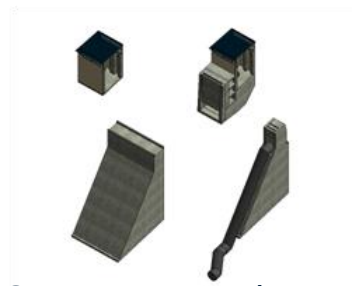
Etapas de Construção do Arranjo

- Definição da alternativa selecionada no HERA;
- Leitura dos parâmetros de dimensionamento das estruturas pelo Dynamo;
- Criação dos modelos das estruturas via parâmetros lidos pelo Dynamo;
- Montagem do arranjo geral da usina.



Arranjo com 8 unidades Bulbo e vertedouro controlado com bacia de dissipação

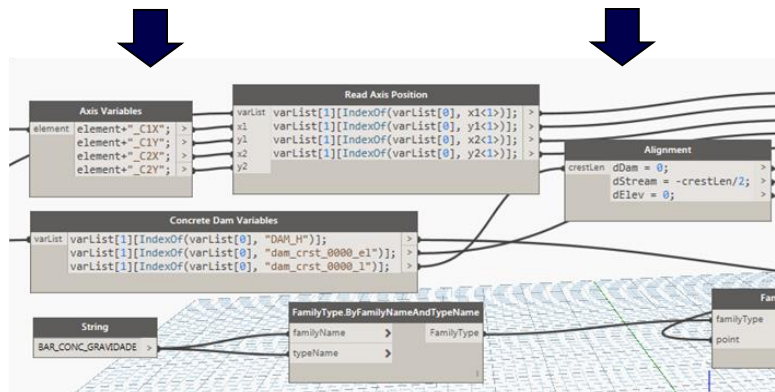
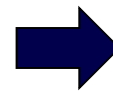
Modelagem 3D de Arranjos



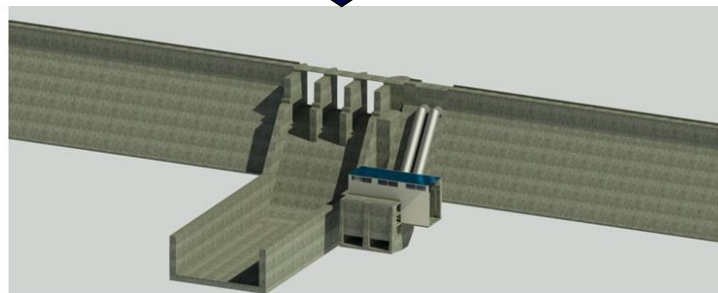
Componentes do REVIT



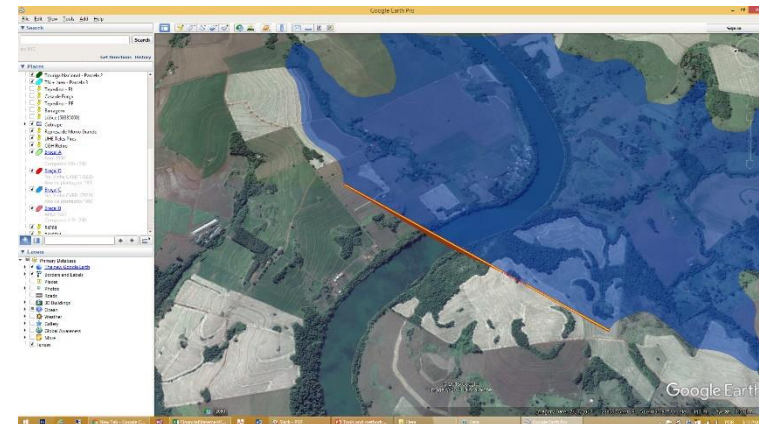
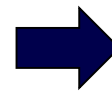
Template HERA



Workflow no Dynamo



Modelo 3D



Exportação ao Google Earth



Modelo no terreno (Infraworks)

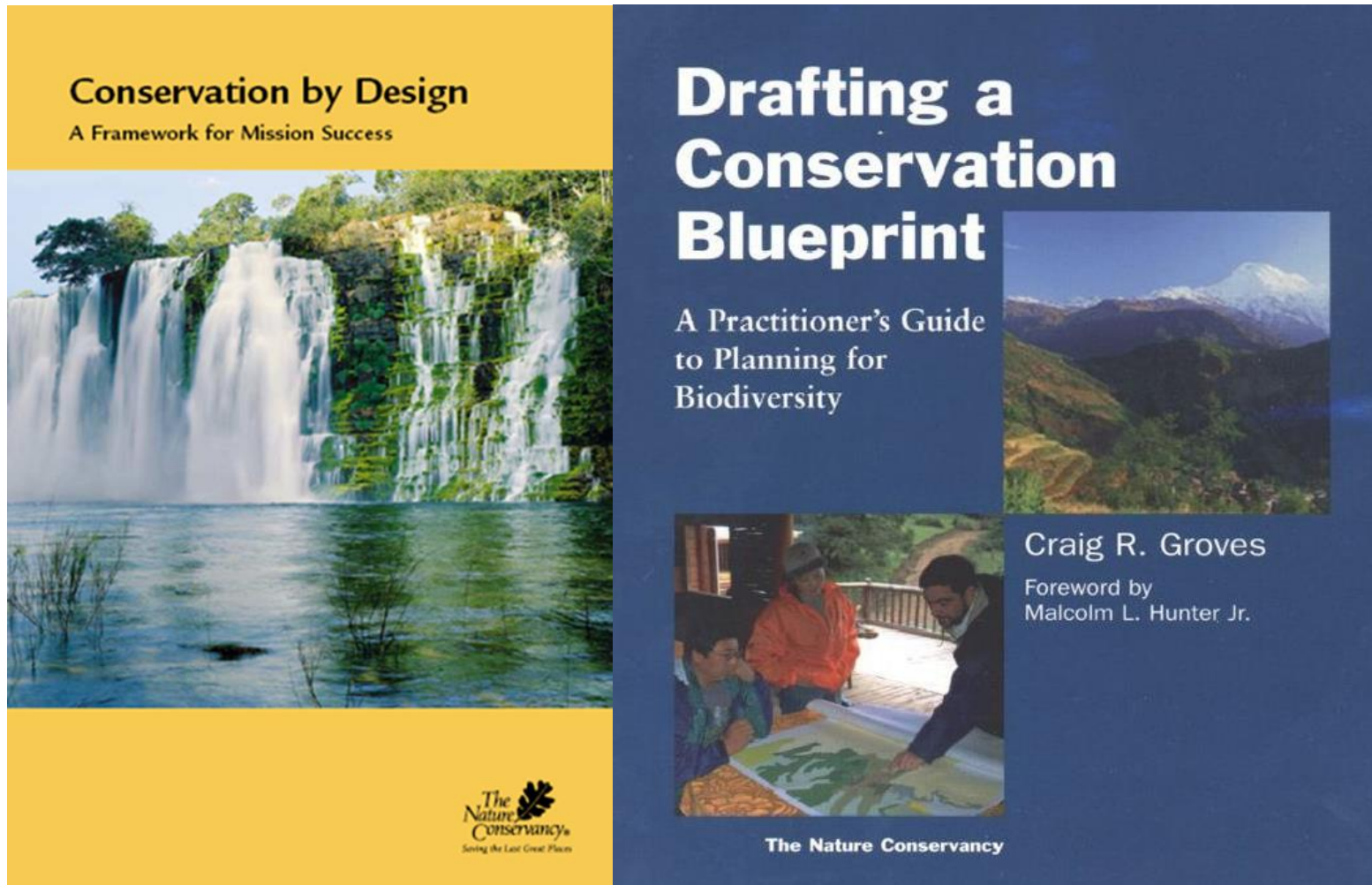


Computational Design for BIM

- ▶ Visão geral
- ▶ Engenharia
 - Geração de alternativas
 - Dimensionamento
 - Cálculo de volumes & orçamento
 - Modelagem 3D de Arranjos
- ▶ **Meio Ambiente**
 - AAI & Blueprint de conservação
 - Métricas e restrições socioambientais
- ▶ Estudo de caso
- ▶ Discussão

- ▶ Componente socioambiental do planejamento
 - **Avaliação Ambiental Integrada (AAI)** nos estudos de alternativas de divisão de quedas (e não somente para uma alternativa selecionada)
 - **Blueprint para a conservação:** implementação da metodologia da The Nature Conservancy (TNC) usada globalmente

► Planejamento Sistemático de Conservação “Blueprint”



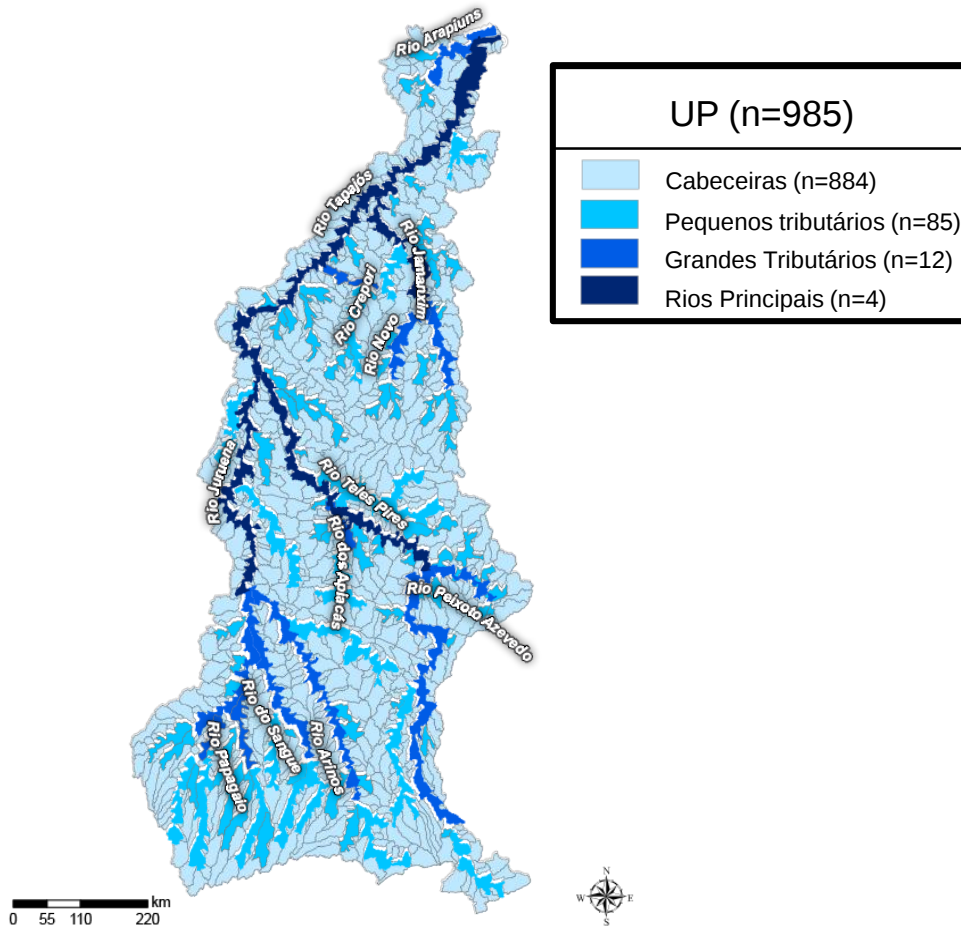
► O que é um Blueprint?

Ferramenta de planejamento que permite a identificação de um portfólio de áreas que representam a diversidade de habitats e processos ecológicos prioritários – incluindo a manutenção da conectividade aquática – para ações de conservação e manejo numa bacia.

Como gerar e representar sistemas ecológicos de forma sistemática no processo de priorização?

1. Gerar e caracterizar unidades de planejamento ao longo dos rios e na bacia de drenagem como um todo para classificação e análise
2. Classificar os sistemas ecológicos de água doce - agrupar unidades de planejamento com atributos ambientais semelhantes
3. Avaliar a condição ecológica/integridade de cada exemplo de sistema ecológico
4. Definir metas de representatividade de cada sistema ecológico no portfólio
5. Assegurar a conectividade dos exemplos de sistemas ecológicos selecionados para garantir a manutenção de processos ecológicos e ambientais como: regime de migração de peixes, fluxo e transporte de sedimentos.
6. Garantir a eficiência do portfólio com a seleção da menor área e número de exemplos de sistemas ecológicos que atendam às metas de representação em uma rede conectada.

► Elementos de drenagem – Unidades de Planejamento (UP)

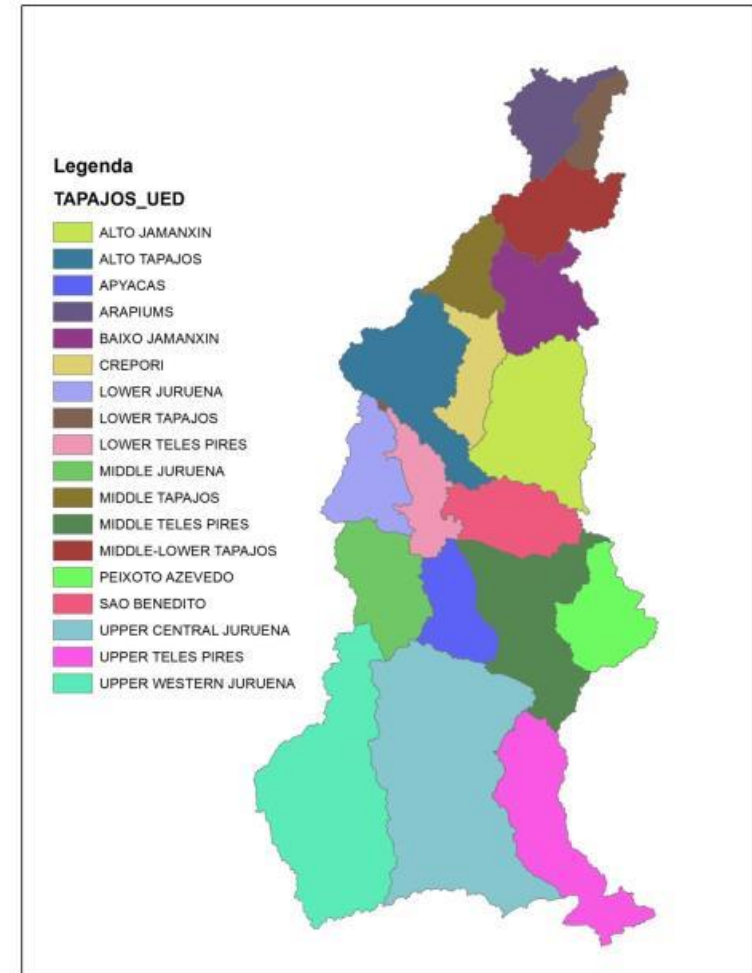


- Unidades de bacia para o planejamento de ações de conservação e manejo
- Definidas a partir de critérios de estrutura da bacia (área de drenagem em múltiplas escalas)
- Inseridas nas Unidades Ecológicas de Drenagem (UED)

► Unidades Ecológicas de Drenagem (UED)

Definidas a partir de
critérios de macro
Escala, como geologia,
geomorfologia e clima

18 UED definidas para a
bacia do Tapajós



Atribuição de Variáveis Físicas para Classificação

- Elevação
- Gradiente da drenagem
- Gradiente dos leitos
- Densidade de drenagem
- Grau de dendricidade (densidade de confluências)
- Potencial de contribuição de água subterrânea
- Geologia dominante (tipos rochosos)
- Geomorfologia (fisiografia de terreno)
- Clima (regime de temperaturas e precipitação)
- Regime hidrológico (modelado ou empírico)

Unidades de Planejamento

Matriz de Dissimilaridade

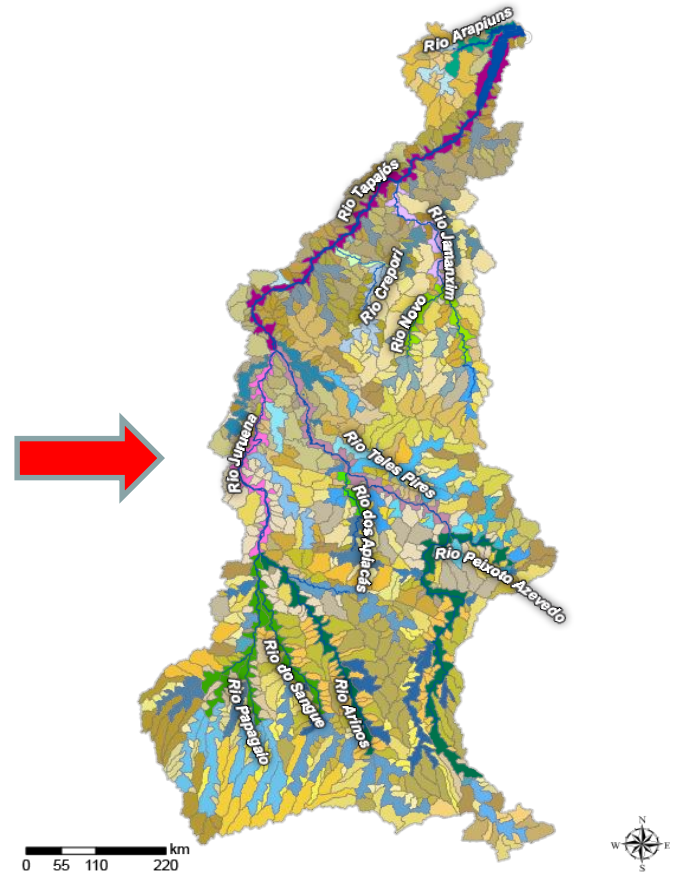
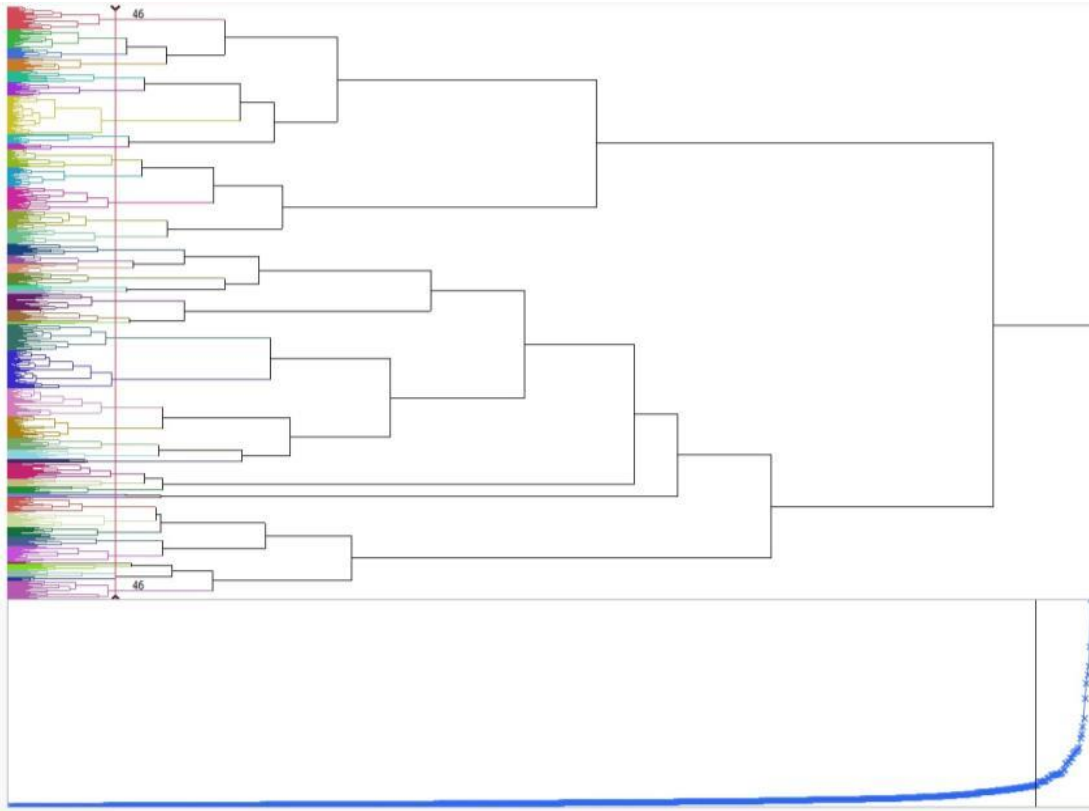
Algoritmo de agrupamento

Seleção do número
de grupos

Classificação

Sistemas ecológicos

- Dendograma de análise de agrupamentos de UPs em sistemas ecológicos



Sistemas Ecológicos (n=77)

-  Rios Principais (n=4)
-  Grandes Tributários (n=6)
-  Pequenos Tributários (n=21)
-  Cabeceiras (n=46)

HERA - Meio Ambiente

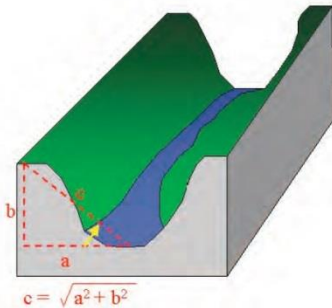
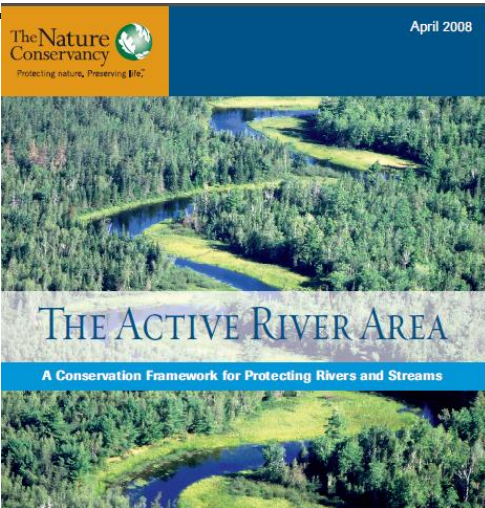
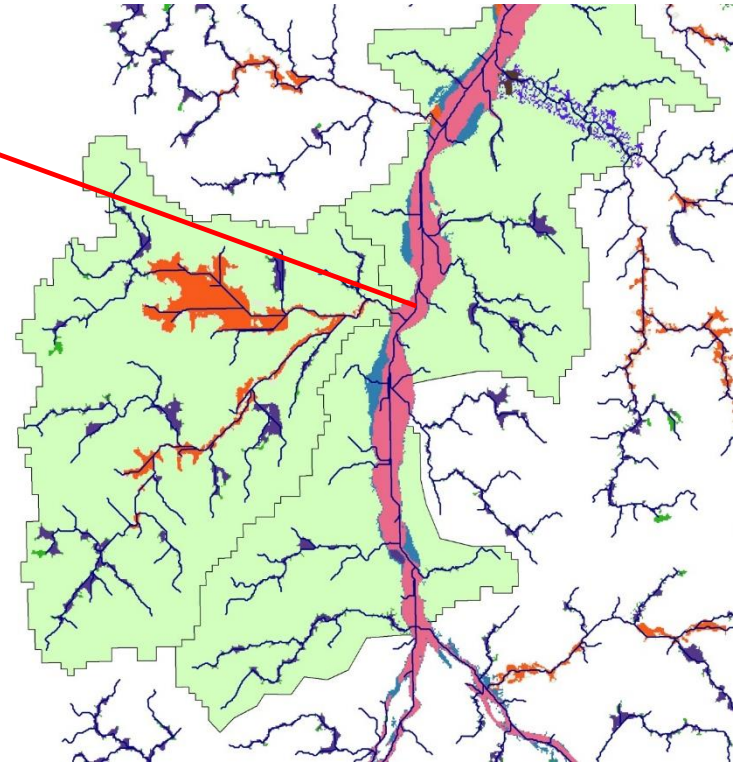


Figure 4.1 – Schematic stream valley cross-section, showing the inputs to PATHDISTANCE modeling: distance (c), slope (yellow arrow), and source (stream) (From Strager et al., 2000).

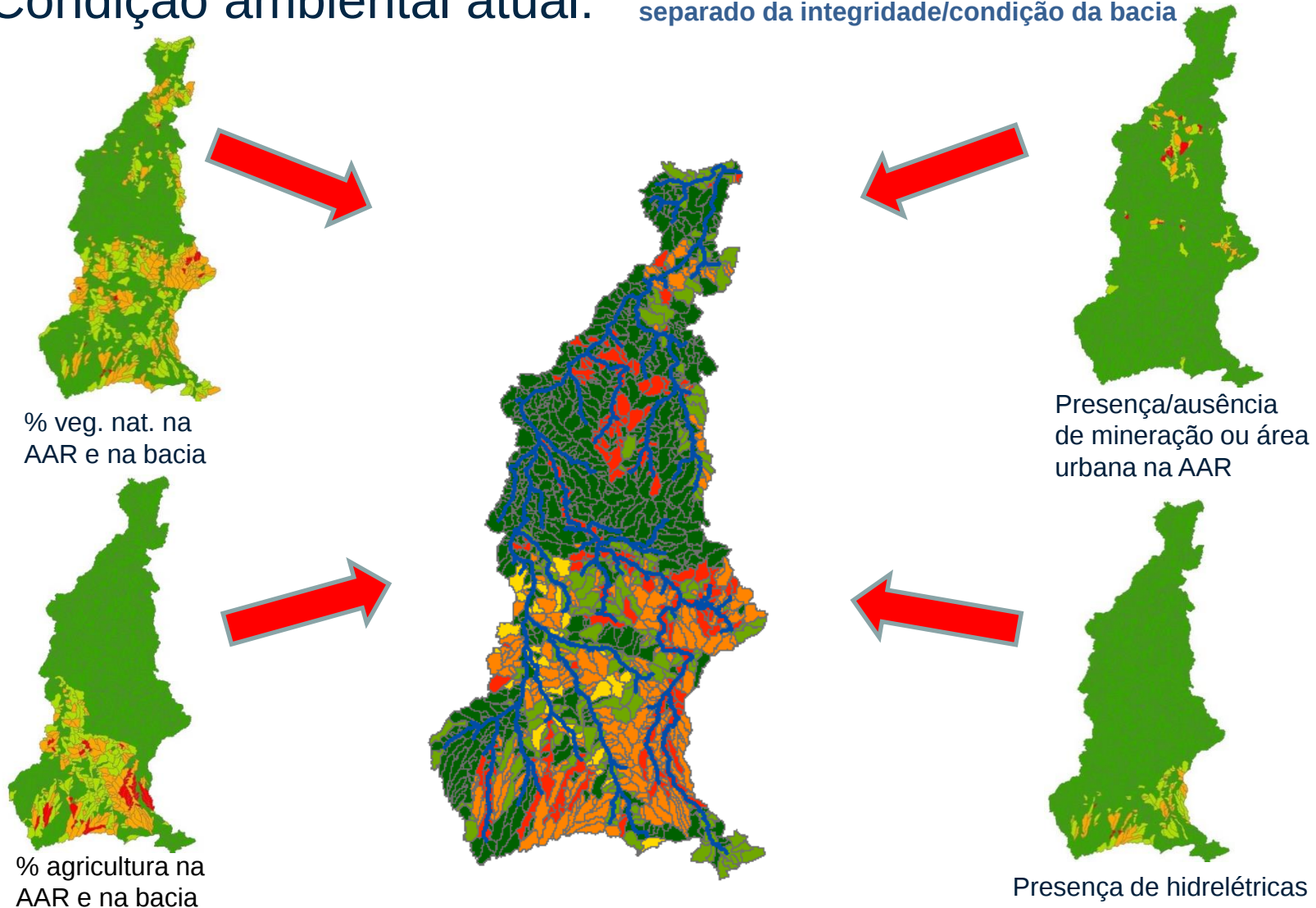
AAR
Área ativa do rio

Definida para cada
sistema ecológico



- Representação modelada da maior extensão de inundação em um período de 100 anos, incluindo toda a planície de inundação e terraços laterais
- Define as áreas mais sensíveis de um sistema fluvial, onde o rio e o meio terrestre interagem - incluindo matas ciliares, além da planície de inundação

► **Condição ambiental atual:** Integridade/condição da ARA definida em separado da integridade/condição da bacia



- Representatividade estratificada por ocorrência de classes de sistemas ecológicos (SE) nas UEDs.

SE com somente 1 ou 2
ocorrências na UED.

meta = 100%

SE com 3 a 10 ocorrências por UED.

meta = mínimo de 2 SE por UED

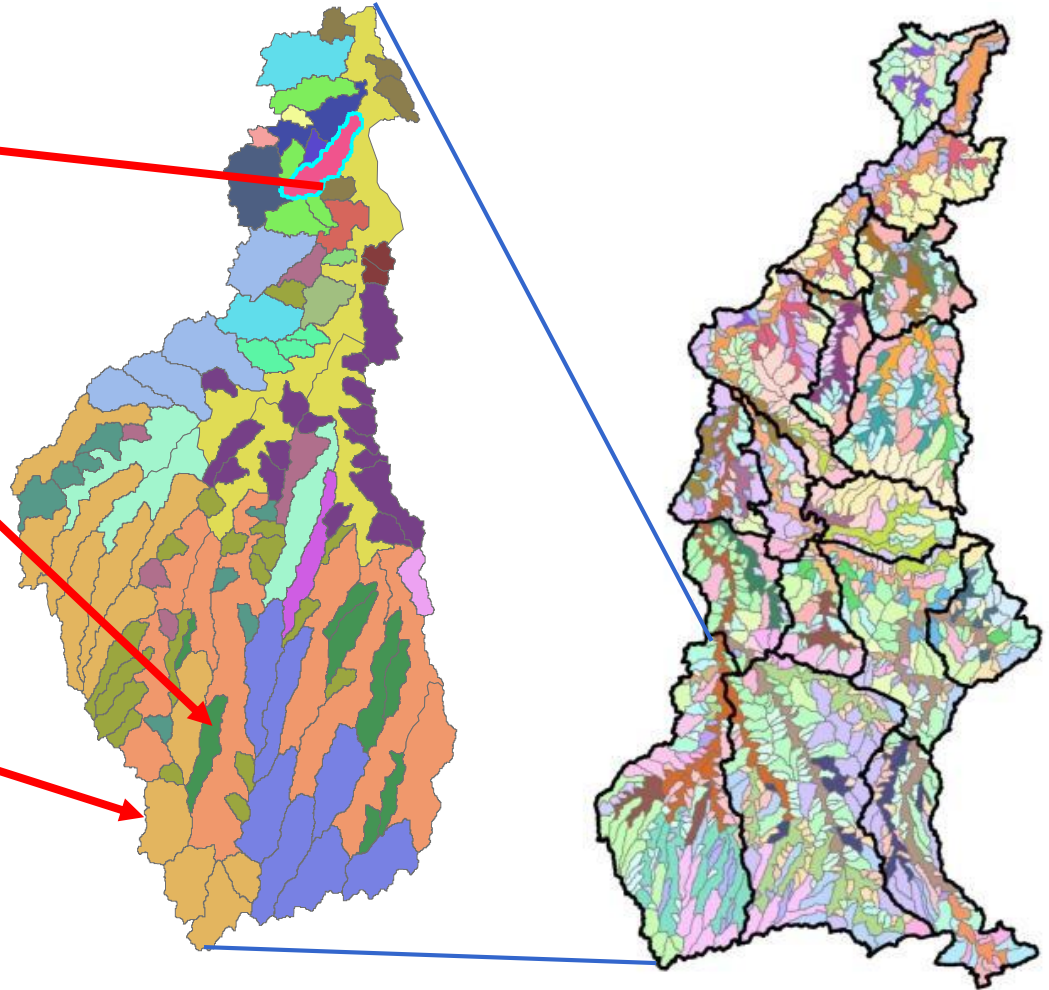
SE com mais de 10
ocorrências por UED

meta = 20%

SE são selecionados em ordem
decrecente de integridade da AAR e
da bacia

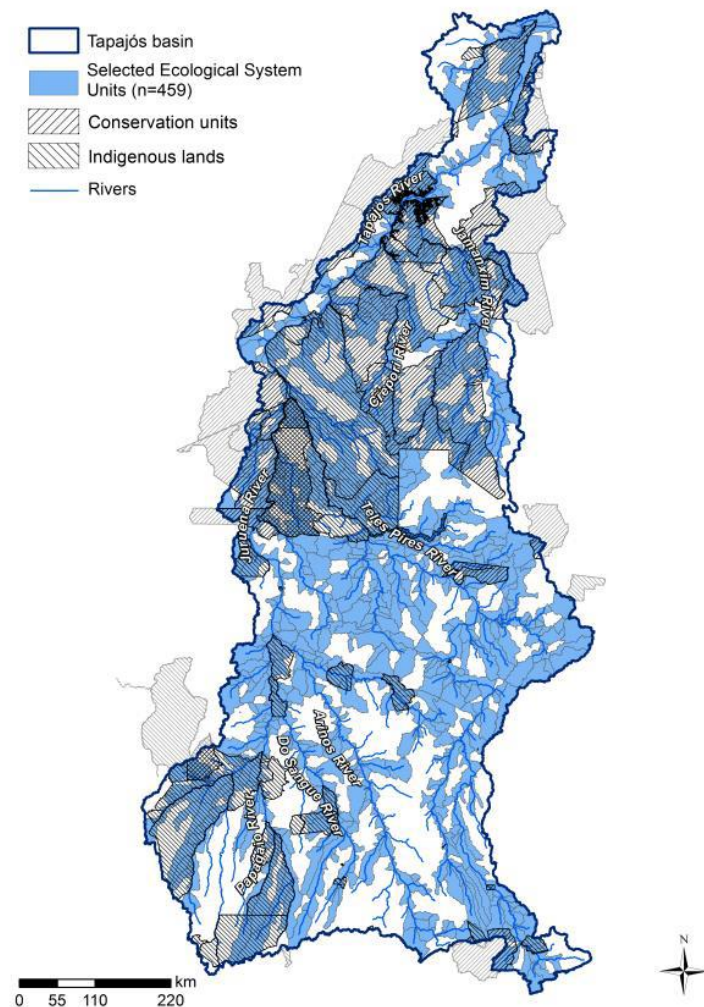
SE podem ser selecionados para
evitar sistemas isolados

TI e UC são adicionais à seleção



► Portfólio de sistemas ecológicos selecionados

- Indica áreas que atualmente apresentam melhor integridade ecológica dentro de uma rede de sistemas ecológicos conectados
- Pode ser usado para orientar o desenvolvimento de infraestrutura energética (ou de outro setor), de modo que os processos ecológicos sejam mantidos
- Pode ser combinado com outros dados na identificação de áreas mais a risco de desmatamento, expansão agrícola, etc., de modo a evitar ou minimizar impactos.





Integração Blueprint Hera – contribuição ao componente ambiental da metodologia de inventário com o objetivo de evitar que áreas estratégicas para a manutenção processos ecológicos e importantes do ponto de vista da conservação sejam consideradas para o aproveitamento hidrelétrico

Blueprint é uma ferramenta em construção e ainda carece de validação social

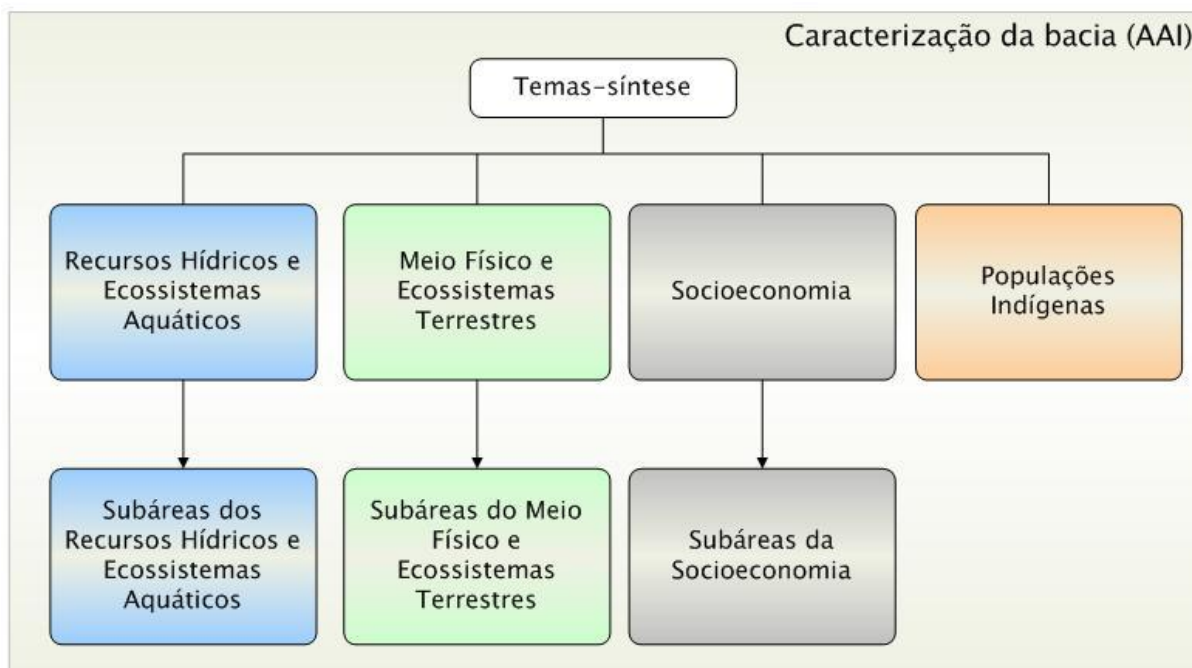
Na Amazônia: risco de desmatamento e efeitos das mudanças climáticas devem ser considerados nos estudos de inventário

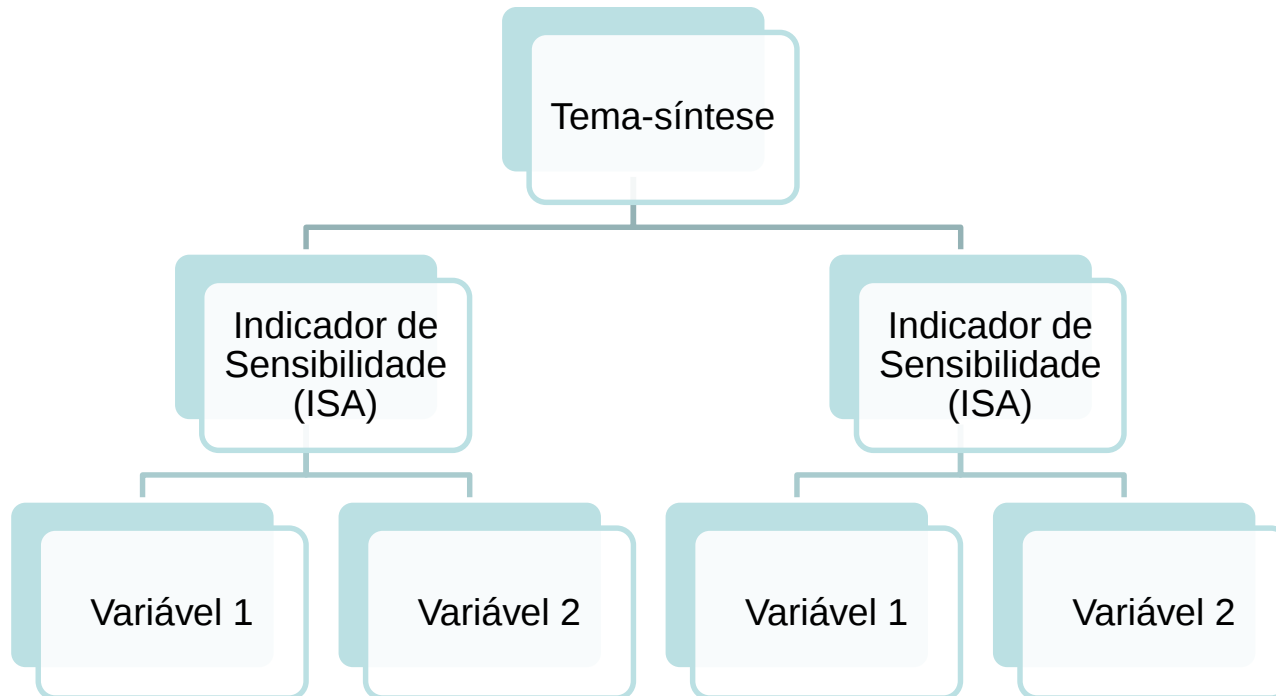
Em qualquer bacia: efeitos cumulativos e sinérgicos com empreendimentos de outros setores devem integrar a abordagem ambiental

Sobreposição de aproveitamento hidrelétrico com Terras Indígenas e Unidades de Conservação e impactos diretos sobre estas devem ser apontados com as devidas ressalvas se listados como resultado do inventário

Os inventários por bacia devem estabelecer um ranking de projetos segundo impacto potencial, de forma a subsidiar uma análise comparativa em escala nacional ou regional que resulte na definição dos projetos que devem integrar os planos nacionais. Neste contexto, a automatização do inventário do Tapajós – e a inserção de uma perspectiva ambiental – é um exercício que poderá ser aplicado a outras bacias, agilizando e aprimorando o processo de planejamento em larga escala.

A indicação de aproveitamento hidrelétrico na Amazônia é resultado de processo político nacional sobre o futuro da região e da matriz energética do país, portanto, não depende exclusivamente dos inventários, ainda que estes ofereçam a base técnica necessária para isso.





► Tema Síntese: indicadores

Tema-síntese	Indicador de Sensibilidade Ambiental	Peso
Tema-síntese x	Indicador de Sensibilidade Ambiental 1 – ISA ₁	P _{ISA1}
	Indicador de Sensibilidade Ambiental 2 – ISA ₂	P _{ISA2}
	...	...
	Indicador de Sensibilidade Ambiental n - ISA _{n}	P _{ISAn}

► Indicador de sensibilidade (ISA): variáveis

Indicador de Sensibilidade	Variável	Peso
Indicador de Sensibilidade i	Variável 1	P _{var1}
	Variável 2	P _{var2}
	...	...
	Variável m	P _{varm}

► Tema Síntese: Recursos hídricos e Ecossistemas Aquáticos

- Indicadores de sensibilidade:
 - ISA 1: Sensibilidade dos recursos hídricos
 - Variáveis de sensibilidade
 - » Efluentes
 - » Uso do Solo
 - ISA 2: Sensibilidade dos ecossistemas aquáticos
 - Variáveis de sensibilidade
 - » Espécies endêmicas, migratórias ou em risco de extinção
 - » Ecossistemas de entorno

► ISA 1: Sensibilidade dos recursos hídricos

■ Variáveis de sensibilidade

INDICADOR DE SENSIBILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS				
Variável	Peso	Fonte	Grau	Classes de Avaliação
Efluentes	0,6	IBGE/SIVAM, 2004	1	Aldeias indígenas (raio de 0,5 km do ponto)
			2	Vilas, núcleos, povoados (raio de 1 km do ponto)
			3	Área no entorno das áreas urbanas de até 200 mil habitantes (raio de 5 km)
			4	Área no entorno das áreas urbanas com mais de 200 mil habitantes (raio de 10 km)
			5	Áreas urbanas
Uso do solo	0,4	IBGE/SIVAM, 2004; IBGE, 2007; ZEE, 2009	1	-
			2	Pastagens com pecuária extensiva
			3	Pastagens com pecuária semi-intensiva, culturas alimentares para subsistência e extrativismo vegetal
			4	Zona de influência a jusante de lavoura (5 km)
			5	Lavoura

► ISA 2: Sensibilidade dos ecossistemas aquáticos

■ Variáveis de sensibilidade

INDICADOR DE SENSIBILIDADE DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS				
Variável	Peso	Fonte	Grau	Classes de Avaliação
Espécies endêmicas, migratórias ou em risco de extinção	0,3	IUCN, 2009; CANTARELLI, 2006	1	Áreas sem comprovação de ocorrência de espécies endêmicas, migratórias ou em risco de extinção
			2	-
			3	-
			4	-
			5	Áreas de ocorrência de espécies endêmicas, migratórias ou em risco de extinção
Ecossistemas de entorno	0,7	IBGE/SIVAM, 2004; CONAMA 303/02	1	Área de preservação permanente em área urbana
			2	-
			3	Área de preservação permanente em regiões de pastagens, lavoura e vegetação secundária
			4	Área de preservação permanente ao longo de rio em regiões de vegetação natural
			5	Área de preservação permanente em nascentes e ilha fluvial

► Características

- Componentes de operação multiestágio;
- Variáveis binárias ativam a construção de projetos candidatos;
- Não-linear: energia gerada é produto da vazão turbinada e queda;
- Estocástico: incerteza das séries de vazões futuras;

► Função Objetivo

- Flexível: receita de venda de energia e outros usos da água e restrições socioambientais

▪ Restrições

- Físicas (ex. balanço hídrico, volumes úteis operados, etc.)
- Ambientais (ex. área máxima inundada de uma alternativa, máxima fragmentação do rio tolerável, etc.)
- Sociais (ex. relocação, compensações diversas)

- Problema de otimização com 80 mil restrições, 120 mil variáveis, das quais 221 são binárias (construção de projetos)

Its	Type	BestSoln	BestBound	Sols	Add	Del	Gap	GInf	Time
c		-951.129095	-2788.002047	1			65.88%	0	3
d		-962.364676	-2788.002047	2			65.48%	0	5
c	202	-964.737885	-2189.044212	3	162	12	55.93%	0	254
c	211	-1003.648799	-2189.044212	4	165	8	54.15%	0	257
c	681	-1005.510611	-1970.531736	5	395	68	48.97%	0	357
c	1227	-1057.800951	-1927.210543	6	850	24	45.11%	0	450
c	1847	-1061.858970	-1927.210543	7	891	57	44.90%	0	510
c	2131	-1065.413139	-1927.210543	8	986	48	44.72%	0	537
c	2365	-1071.025412	-1927.210543	9	1117	57	44.43%	0	561
c	2374	-1079.036713	-1927.210543	10	1117	60	44.01%	0	562
c	2375	-1079.041842	-1927.210543	11	1117	59	44.01%	0	562
c	2933	-1080.858985	-1920.437975	12	1261	60	43.72%	0	618
*	69604	-1082.438786	-1322.271580	13	26297	48	18.14%	0	4732
c	70148	-1082.994316	-1322.271580	14	25977	48	18.10%	0	4739
*	99338	-1083.885104	-1193.132872	15	32877	50	9.16%	0	5873
*	99741	-1083.978643	-1193.132872	16	32512	51	9.15%	0	5874
*	100028	-1084.299310	-1193.132872	17	32471	53	9.12%	0	5883
*	106334	-1090.261865	-1190.654783	18	33489	42	8.43%	0	6093
*	109918	-1090.264934	-1190.654783	19	29943	42	8.43%	0	6094
c	123950	-1090.761004	-1156.713138	20	32243	46	5.70%	0	6502
	240200	-1090.814448	-1132.530443	21	47171	46	3.68%	13	8916
	270200	-1090.814448	-1125.579859	21	45425	17	3.09%	51	9531

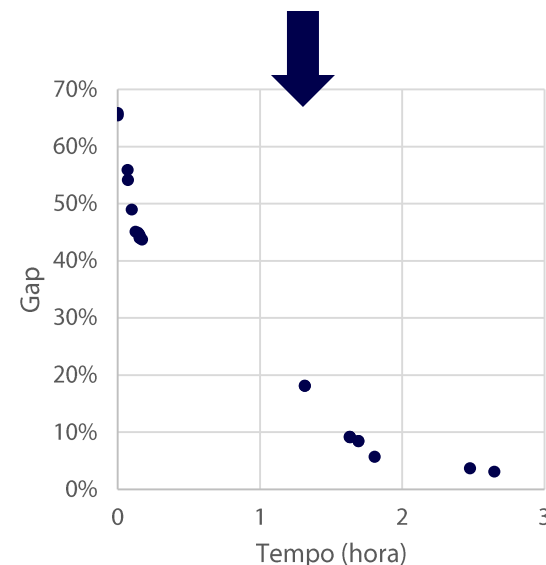
STOPPING - MIPRELSTOP target reached (MIPRELSTOP=0.03 gap=0.0297335) .

Number of integer feasible solutions found is 21

Best integer solution found is -1090.814448

Best bound is -1124.242108

21 alternativas de divisão de quedas encontradas no processo de busca, em menos de 3h



► Restrições sobre o modelo de otimização

- **restrições aditivas:** a soma de atributos de projetos selecionados deve satisfazer restrição de mínimo ou máximo
- Exemplos de uso:
 - A área total inundada deve ser menor que 100 km².
 - A total de população relocada pelo conjunto de projetos deve ser menor a 1000 indivíduos.
 - Conservação de representatividade de áreas ambientalmente sensíveis (integração com o Blueprint)

Métricas de Interferências

Opções de cálculo de métricas

1. Valor Absoluto

$$m(R) = w_m [v(A_1) \cdot R \cap A_1 + v(A_2) \cdot R \cap A_2] / (A_1 + A_2)$$

2. Densidade

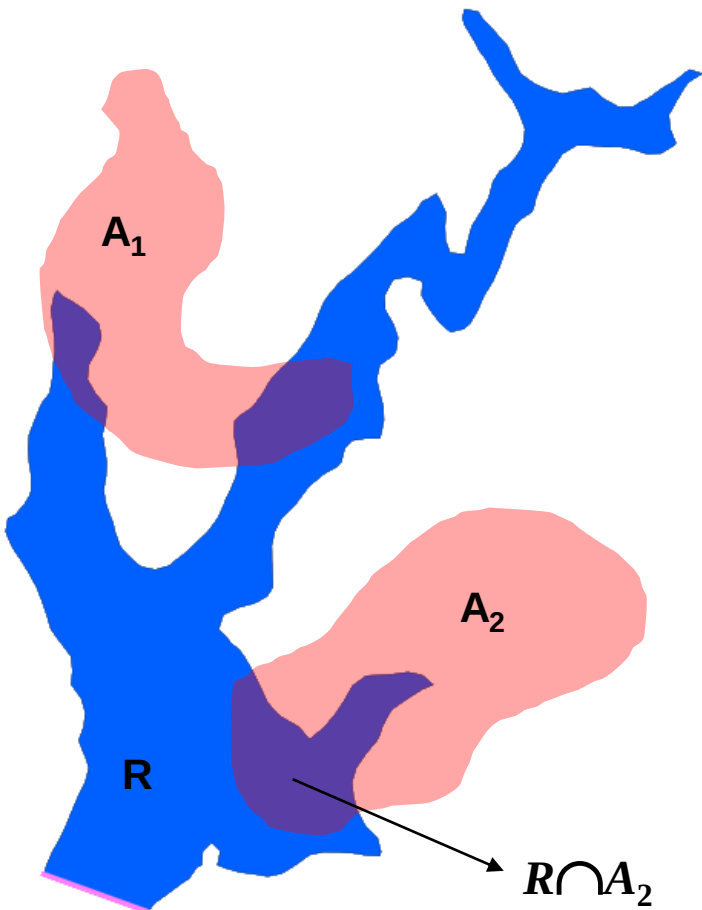
$$m(R) = w_m [v(A_1) \cdot R \cap A_1 + v(A_2) \cdot R \cap A_2]$$

$m(R)$ métrica do reservatório R

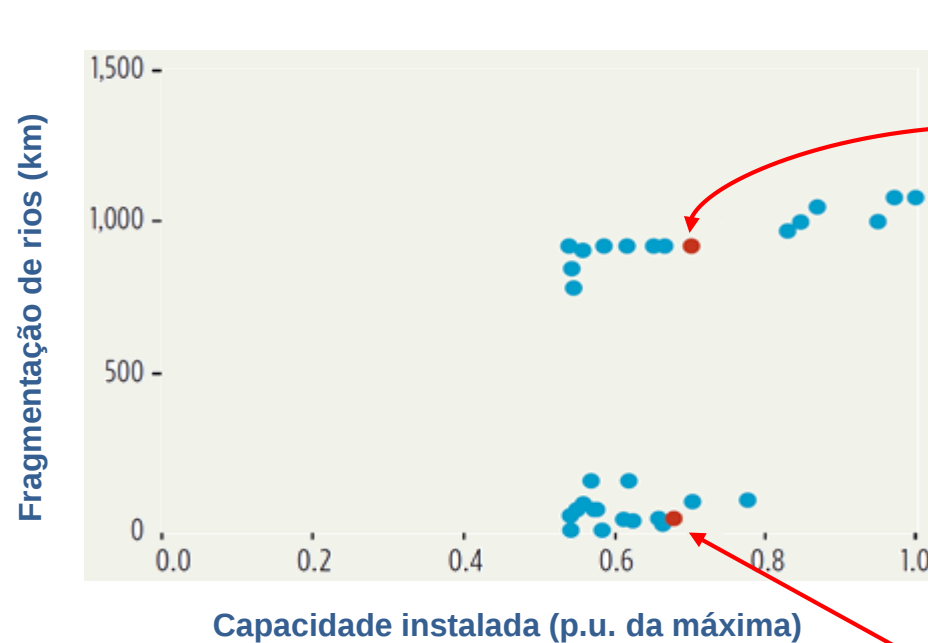
w_m peso da métrica m

$v(A_i)$ valor na área de interesse i

$R \cap A_i$ área da interseção entre R e A_i

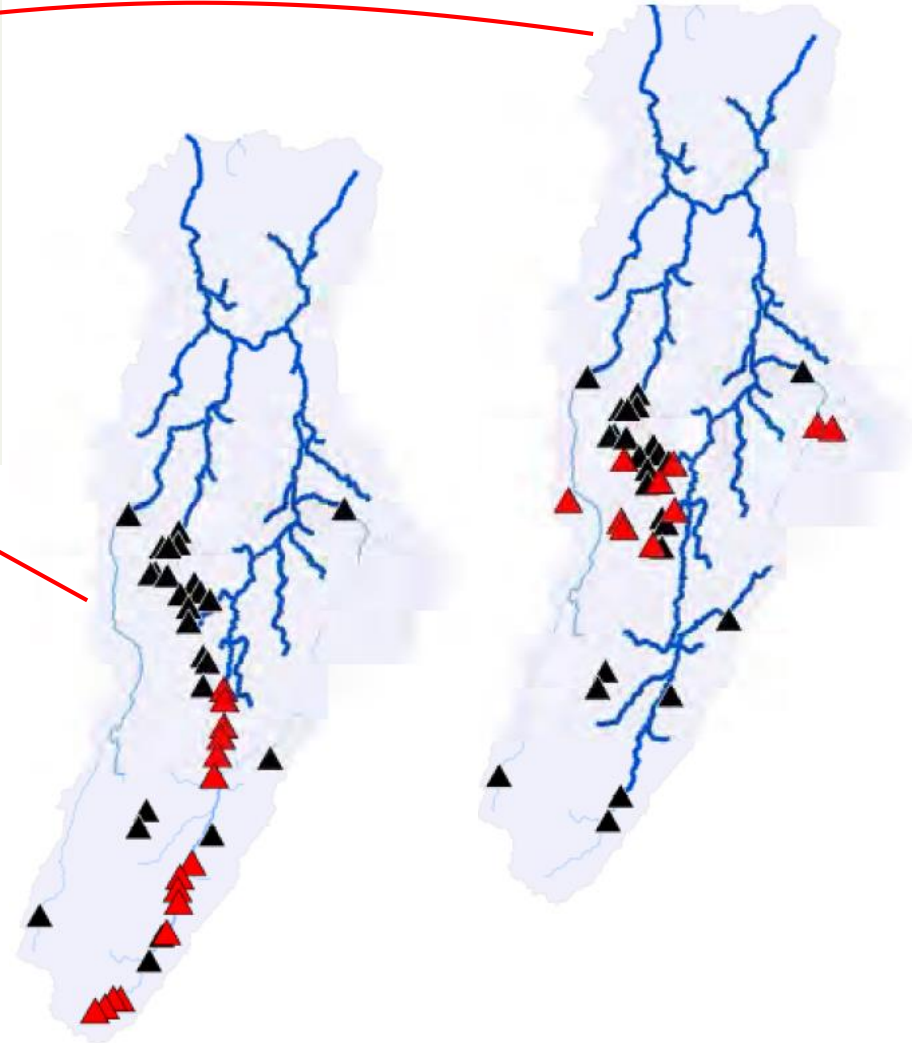


Fragmentação de rios



Dois cenários com capacidades similares, mas fragmentações bem diferentes.

- ▲ Planned Dams
- ▲ Existing Dams
- ~ Longest Connected Network



- A construção de barragens de usinas hidrelétricas funciona como barreira ao fluxo de espécies aquáticas na bacia, com possíveis impactos ambientais (ex. interrupção de rotas migratórias).
- Esta foi a motivação para as restrições sobre a **fragmentação dos rios**.
 - Diversas restrições podem ser informadas sobre a máxima fragmentação tolerável para toda a bacia ou por sub-bacias. O valor a usar depende de estudos das espécies aquáticas na bacia.
 - Barreiras naturais, como cachoeiras podem ser informadas. Usinas com dispositivos de transposição de peixes (ex. escadas) também (reduzem ou eliminam a fragmentação do rio)
 - Ao invés da soma de quilômetros de rios livres, a restrição pode ser escrita sobre o máximo trecho de rio livre
 - A mesma restrição “topológica” pode ser usada para modelar transporte de sedimentos

- A construção de hidrelétricas com reservatórios altera o perfil das vazões naturais no rio.
- A inclusão de hidrógrafas ambientais para manutenção da integridade biótica é possível no HERA
 - hidrógrafas para mínimas ou máximas vazões mensais
 - restrições tanto para usinas “pé de barragem” como nos arranjos derivativos no mesmo rio ou com transposição de água entre bacias.
 - Integração feita com estudos energéticos (*tradeoff* entre perda energética x benefício para o meio ambiente)

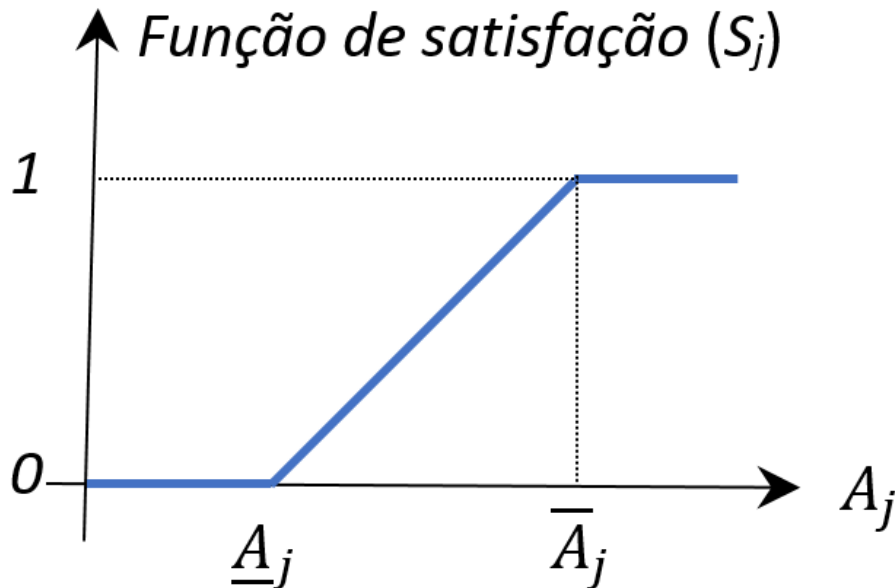
Maximizar receita de venda de energia e capacidade – custo de investimentos para construir os projetos

Sujeito a:

- 1) Restrições do HERA (energia, balanço hídrico, limites operativos, etc.)
- 2) Atendimento de uma medida S^* da satisfação dos atributos de uma alternativa de divisão de quedas:

$$\lambda S_{med} + (1 - \lambda) S_{min} \geq S^*$$

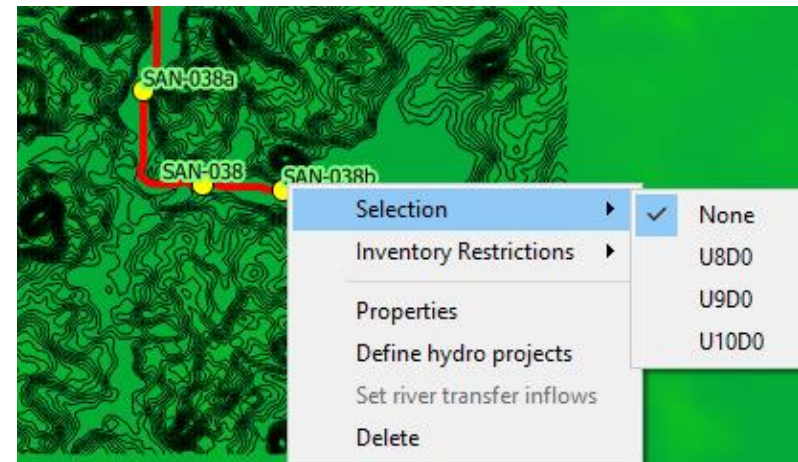
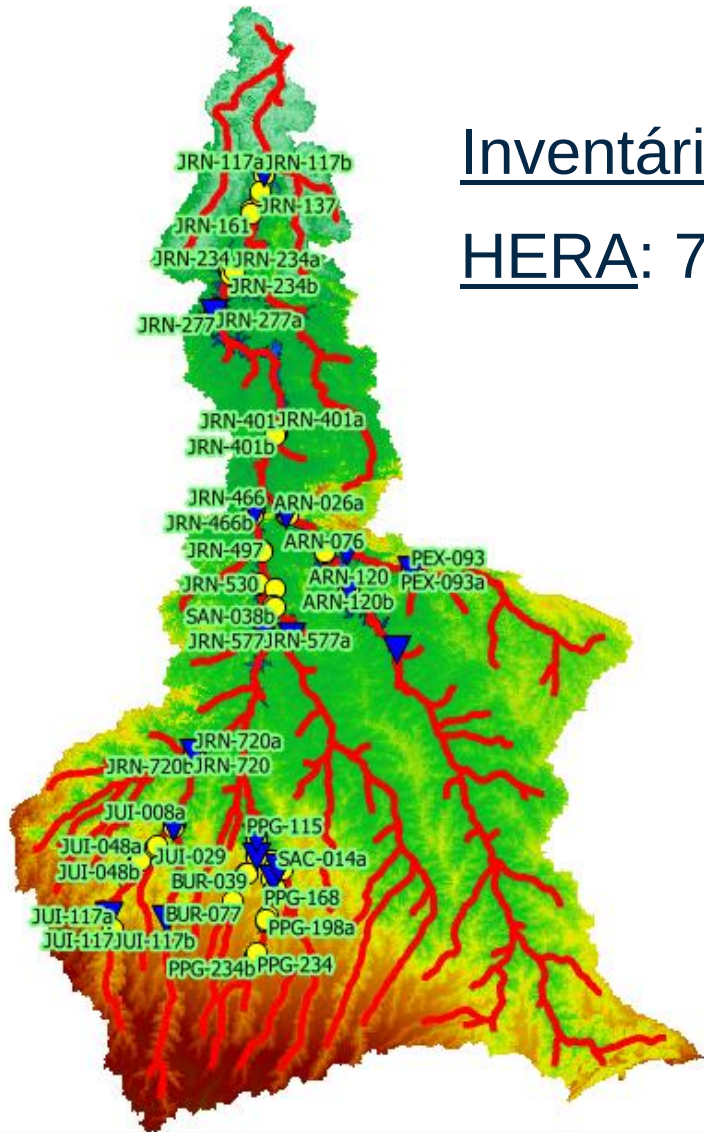
- S_{med} é a satisfação média para todos os atributos;
- S_{min} é a satisfação mínima dentre todos os atributos;
- S^* é a medida da satisfação aceitável



- $A_j = \sum_{i=1}^N a_{i,j} x_i \leftarrow$ relaciona métrica com decisões de investimentos
- x_i é uma variável binária (define a construção do projeto)
- $a_{i,j}$ é o valor do atributo j do projeto i

- ▶ Visão geral
- ▶ Engenharia
 - Geração de alternativas
 - Dimensionamento
 - Cálculo de volumes & orçamento
 - Modelagem 3D de Arranjos
- ▶ Meio Ambiente
 - AAI & Blueprint de conservação
 - Métricas e restrições socioambientais
- ▶ **Estudo de caso**
- ▶ Conclusões

Inventário: 30 eixos e 36 alternativas de queda
HERA: 78 eixos e 298 alternativas de queda

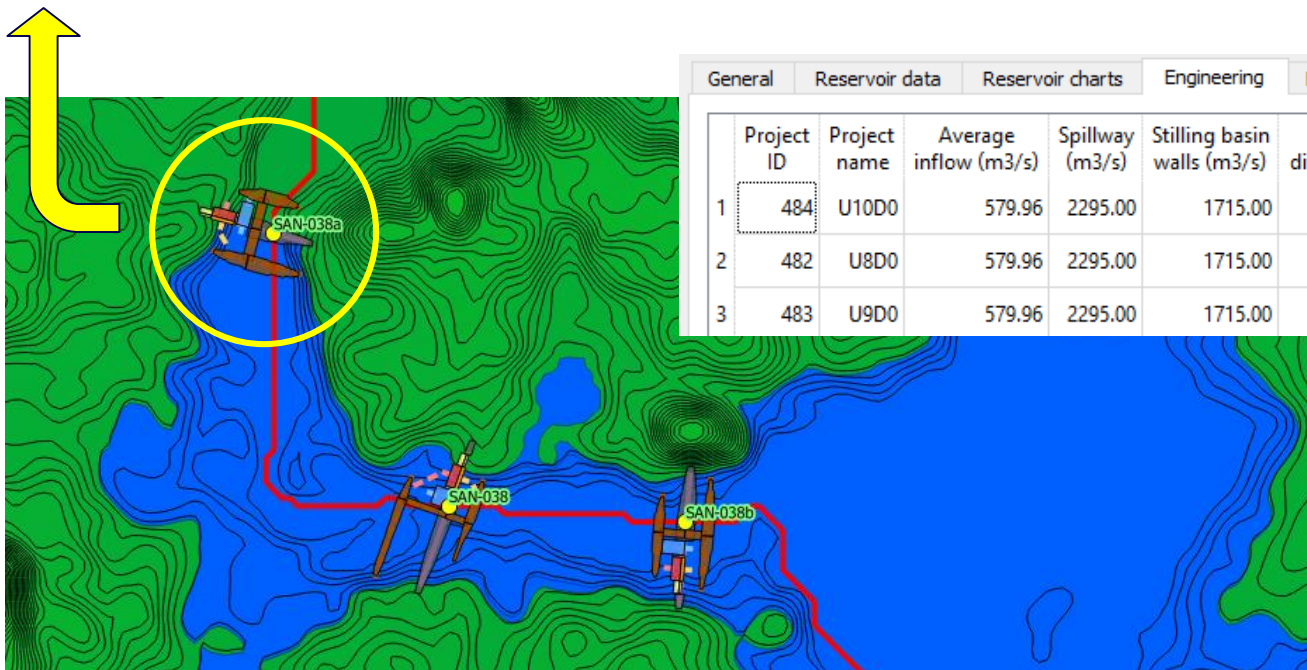


3 alternativas de queda por eixo, no mínimo

Definição de Características Energéticas

	Project ID	Project name	Reservoir head (m)	Diversion head (m)	Gross head (m)	Turbined inflow (m3/s)	Capacity factor (0 to 1)	Power (MW)	Annual production (GWh)	Total cost (MM \$)	Unit cost (\$/kW)	Water level (m)	Reservoir area (km2)
1	484	U10D0	10.00	0.00	10.00	1054.47	0.55	89.74	432.34	291.92	3253.11	241.00	43.34
2	482	U8D0	8.00	0.00	8.00	1054.47	0.55	72.08	347.26	312.08	4329.90	239.00	25.22
3	483	U9D0	9.00	0.00	9.00	1054.47	0.55	80.91	389.80	271.55	3356.42	240.00	38.67

Vazões de Projeto



General		Reservoir data	Reservoir charts	Engineering	Env. flows			
Project ID	Project name	Average inflow (m3/s)	Spillway (m3/s)	Stilling basin walls (m3/s)	1st phase diversion (m3/s)	2st phase diversion (m3/s)	Powerhouse deck (m3/s)	
1	484	U10D0	579.96	2295.00	1715.00	1715.00	1627.00	2295.00
2	482	U8D0	579.96	2295.00	1715.00	1715.00	1627.00	2295.00
3	483	U9D0	579.96	2295.00	1715.00	1715.00	1627.00	2295.00

Arranjos Seleccionados

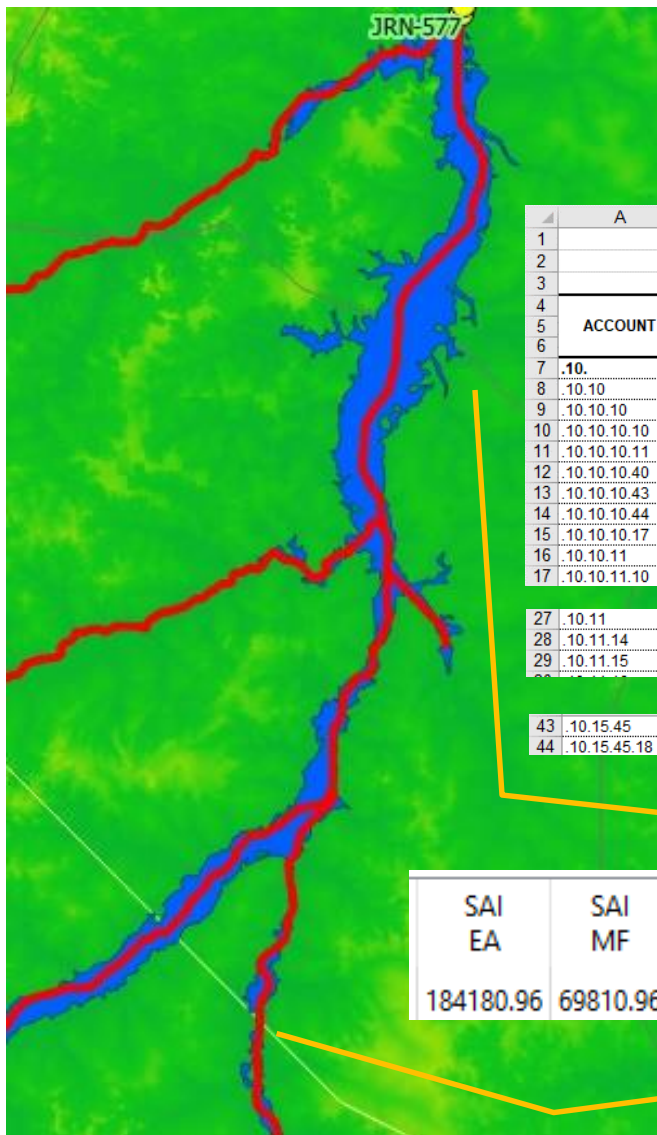
 Engineering model properties

General	Spillway
Template	PhKapc HsComp DmRock SpCbas DvRbed
Layout	FtRbedLcfd SpLbed InLspw
Description	Hydropower plant with a foot of the dam layout with rockfill dam, controlled spillway with stilling basin on the left side of the riverbed, a compact hydraulic system with a concrete kaplan powerhouse placed on the left side of the spillway and a riverbed diversion scheme with a longitudinal cofferdam without sluiceways



Estudo de Caso: Juruena

Definição de Métricas Ambientais e Conta 10



	A	B	C	D	E	F
1		INVENTORY STUDIES				
2		COST ESTIMATE SPREADSHEET				
3						
4						
5	ACCOUNT	ITEM	UNIT	QUANTITY	\$	\$ 10³
6						
7	.10.	LANDS, RESETTLEMENTS, RELOCATIONS AND OTHER SOCIOENVIRONMENTAL ACTIONS				172,698.82
8	.10.10	LAND ACQUISITIONS AND LAND DEVELOPMENTS				7,535.03
9	.10.10.10	URBAN REAL ESTATE	m²			0.00
10	.10.10.10.10	Reservoir	ha	0	2,991.45	0.00
11	.10.10.10.11	Construction site, workers' camp, borrow areas, etc.	ha			0.00
12	.10.10.10.40	Conservation Areas and Permanent Preservation Areas	ha			0.00
13	.10.10.10.43	Towns and villages	gl			0.00
14	.10.10.10.44	Isolated social and economic infrastructure	gl			0.00
15	.10.10.10.17	Other costs	gl			0.00
16	.10.10.11	RURAL REAL ESTATE	gl			6,850.03
17	.10.10.11.10	Reservoir	ha	43,808	156.36	6,850.03
27	.10.11	RESETTLEMENTS AND RELOCATIONS				9,756.22
28	.10.11.14	ROADS	km	6.6	754,647.69	4,980.55
29	.10.11.15	RAILROADS	km	3.3	1,453,954.55	4,775.67
43	.10.15.45	PHYSICAL AND BIOTIC ENVIRONMENT	gl			83,449.73
44	.10.15.45.18	Reservoir Cleaning	ha	35,047	2,381.10	83,449.73

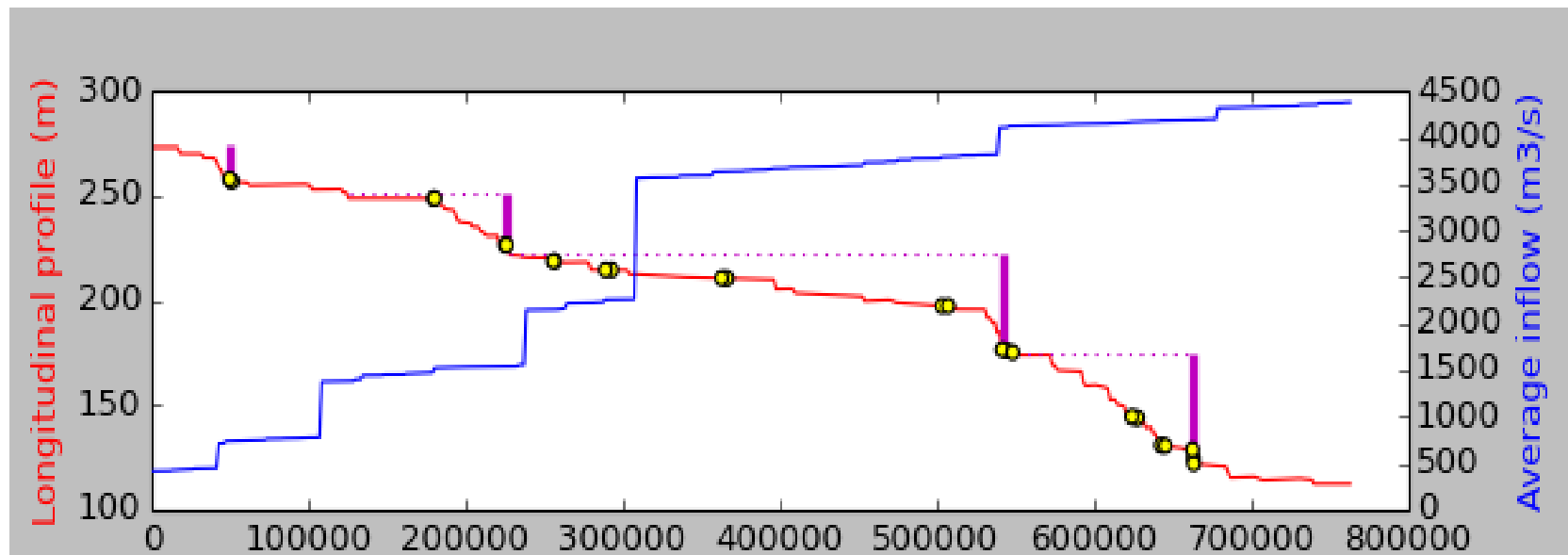
SAI EA	SAI MF	SAI SE	TI (km²)	UC (km²)	Railways (km)	Roads (km)	Flooded Reservoir Area (ha)	Cleaning Reservoir Area (ha)
184180.96	69810.96	10916.37	114.69	0.00	3.28	6.60	43808.42	35046.74

Simulações Preliminares, **ainda sem restrições ambientais e sem remover projetos eventualmente em terras indígenas**

Inventário: potencial de 8.500 MW em 13 eixos selecionados

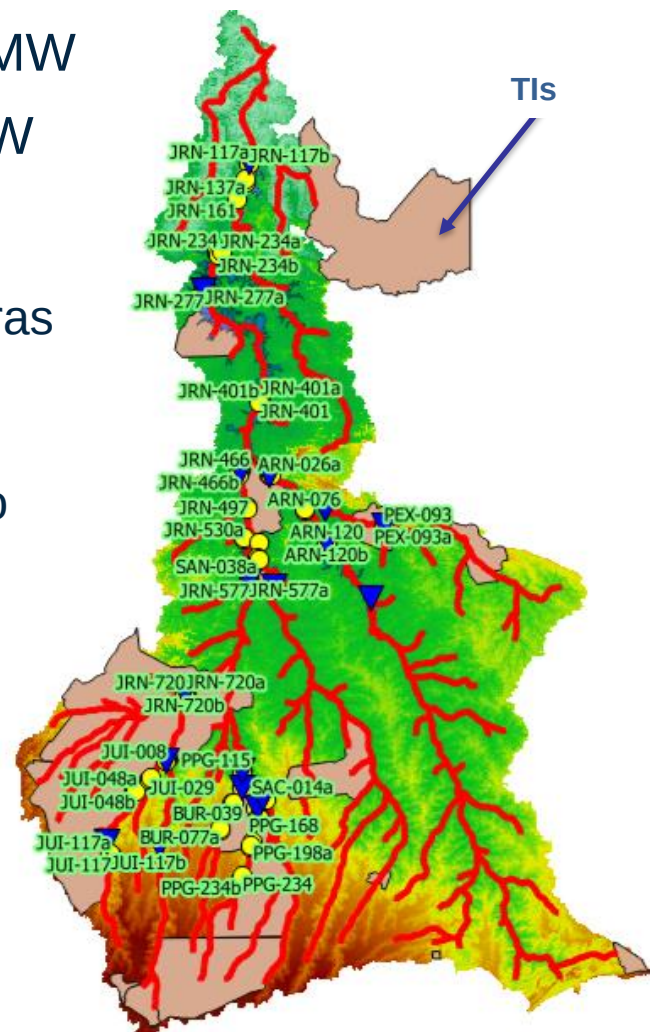
HERA: potencial de 8.000 MW em 14 eixos selecionados

Partição de Quedas no Rio Juruena



- ▶ Se os projetos em Terras Indígenas (indicados no mapa) forem desconsiderados, o potencial de cerca de 8000 MW em 14 aproveitamentos é reduzido para 3147 MW em somente 2 projetos.

- O descarte *a priori* de potencial energético em terras indígenas tem sido a prática
- Esta prática deveria ser modificada por um arranjo em que as comunidades indígenas interessadas possam escolher livremente se desejam se beneficiar da renda gerada pelas UHEs – uma prática corrente em países como EUA e Canadá



- ▶ Visão geral
- ▶ Engenharia
 - Geração de alternativas
 - Dimensionamento
 - Cálculo de volumes & orçamento
 - Modelagem 3D de Arranjos
- ▶ Meio Ambiente
 - AAI & Blueprint de conservação
 - Métricas e restrições socioambientais
- ▶ Estudo de caso
- ▶ **Conclusões**

- ▶ Um ambiente computacional para suporte à decisões em estudos de alternativas de aproveitamentos hidroelétricos
- ▶ Análise de *tradeoffs* entre aspectos técnico-econômicos e socioambientais dessas alternativas
- ▶ Aumento de produtividade, participação efetiva entre as partes, construção de diálogo a partir de uma linguagem comum baseada em critérios objetivos
- ▶ Instrumento de negociação entre partes
- ▶ Uma plataforma computacional aberta para futuras contribuições (Engenharia e meio-ambiente)

- ▶ A dimensão socioambiental passa a fazer parte do planejamento energético desde o início. A AAI, por exemplo, só é feita hoje para a divisão de quedas escolhida
- ▶ O modelo de otimização do HERA é o mesmo utilizado no planejamento da expansão do setor elétrico: hidroelétricas selecionadas complementam eólicas, solares, térmicas, etc.
- ▶ Estudo de caso da bacia do Juruena em fase de conclusão
- ▶ Abrangência global: o HERA vem sendo utilizado em projetos com a TNC em diversas bacias no mundo: *“Build the right dams. Build the dams right.”*