

TUTORIAL:

TRAÇADO E AJUSTE DE CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS UTILIZANDO DADOS DISPONÍVEIS NO HIDROWEB

O passo a passo de como obter as informações, como verificar e corrigir dados básicos, traçar e ajustar a curva-chave sedimentológica

Versão: 1.0



Danrlei de Menezes (d.menezes18@gmail.com)



Francisco F. N. Marcuzzo (fmarcuzzo@gmail.com)



Porto Alegre (RS), 2018

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acesso ao HIDROWEB.....	6
Figura 2 - Tela: Séries Históricas	7
Figura 3 - Seleção dos dados e tipo de arquivo	7
Figura 4 - Acesso às fichas de campo.....	9
Figura 5 - Pontos considerados fora da curva/atípicos (<i>outliers</i>).	9
Figura 6 - Organização dos dados no excel	11
Figura 7 - Gráfico da dispersão dos pontos calculados	12
Figura 8 - Divisão dos dados por magnitude de vazão.....	13
Figura 9 - Utilização do solver	15
Figura 10 - Exemplo de aplicação do solver	16
Figura 11 - Gráfico da curva-chave de Sedimentos com tramo único	17
Figura 12 - Gráfico da curva-chave de sedimentos com dois tramos.....	18

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Figuras para visualização de detalhes	19
--	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	5
1 AQUISIÇÃO DOS DADOS	6
2 ORGANIZAÇÃO E CONSISTÊNCIA DOS DADOS.....	8
3.1 Regressão Linear	10
3.2 Traçado e ajuste da curva-chave de sedimentos utilizando o <i>solver</i>	13
4 CONSIDERAÇÕES	20
5 REFERÊNCIAS	22
6 COMO CITAR E A REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTE TUTORIAL.....	24

INTRODUÇÃO

A elaboração de curva-chave de sedimentos permite o conhecimento do fluxo de sedimentos em uma seção por meio da observação da vazão. Isto porque, a medição e coleta de sedimentos demandam tempo e recurso, o que torna esta tarefa de difícil execução. Para isso, a construção da curva-chave de sedimentos fornece uma estimativa do comportamento dos sedimentos em determinadas vazões.

A sua quantificação é importante para estudos hidrológicos e para obras hidráulicas como a construção de barragens e PCHs, a qual fornece indícios dos processos de assoreamento de canais e reservatórios. Além disso, é uma forma de controle dos processos erosivos em uma bacia hidrográfica.

Entretanto, a estimativa é sucessível a erros. Córdova & Gonzalez (1997), por exemplo, analisaram diferentes fontes de erro que estão envolvidos no método de obtenção da curva-chave de sedimentos: Dentre os principais erros discutidos pelos mesmos autores, os relacionados à discretização e uso da curva de permanência de vazão, erros relacionados à extrapolação e erros relacionados a qualidade dos dados são os mais preocupantes. Cardoso & Coelho (2017) elaboraram a curva-chave de sedimentos - com 54 amostradas coletadas, através de uma regressão linear gerada pela linha de tendência polinomial, encontrando $R^2=0,34$, o que pode gerar erros ainda maiores nos dados de sedimentos. Isso indica a necessidade de haver mais pontos medidos, para melhorar a representação gráfica.

Para contornar esses problemas, alguns autores consideram um conjunto de variáveis, como características da bacia hidrográfica na determinação da curva (KHALEGHI & VARVANI, 2018) e diferenças espaciais da relação entre a descarga e o transporte de sedimentos para diferentes locais na bacia (ASSELMAN, 2000). Outra forma, esta relacionada a importância da medição constante de Q e CSS para derivar a curva-chave de sedimentos à um número maior de dados (CÓRDOVA & GONZALEZ, 1997).

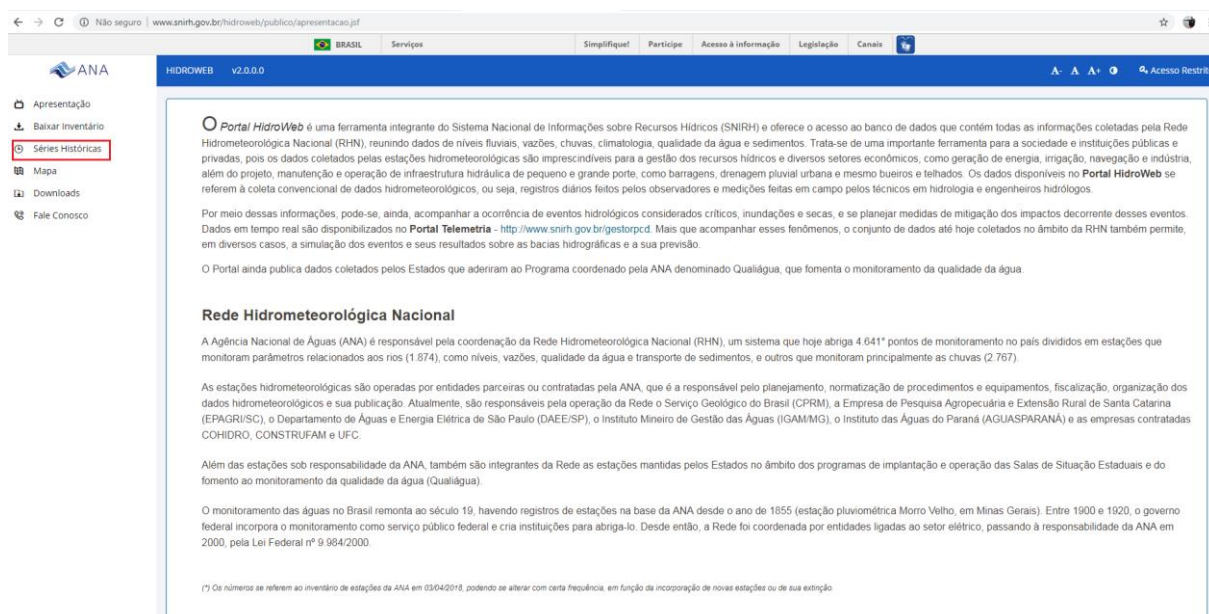
No estudo de Veiga *et al.* (2015), os autores destacaram a importância da construção da curva-chave de sedimentos para detectar alterações no uso e ocupação do solo na produção de sedimentos. Assim, dada sua importância, neste tutorial será demonstrado como construir uma curva-chave de sedimentos, exemplos de curvas-chave e as limitações a cerca de sua estimativa, visto que, a carência de dados coletados ainda impõe grandes limitações neste campo de estudo.

Primeiramente, será apresentada a aquisição de dados direto do HIDROWEB, a organização e consistência dos dados e, por fim, o desenvolvimento do traçado e ajuste da curva.

1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

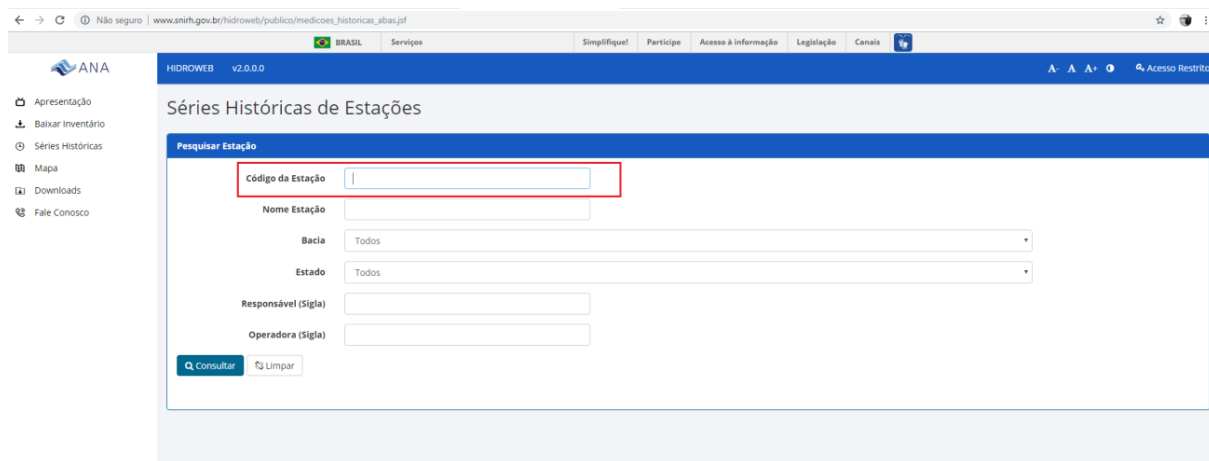
A Agência Nacional das Águas (ANA) é responsável pelo monitoramento hidrológico no Brasil, junto à Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil (CPRM/SGB), responsável pela operação das estações pluviométricas, fluviométricas, sedimentométricas, entre outras. No sítio eletrônico HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>) possível acessar o banco de dados da ANA, basta clicar no ícone que aparece na parte superior esquerda da tela (Figura 1).

Figura 1 - Acesso ao HIDROWEB



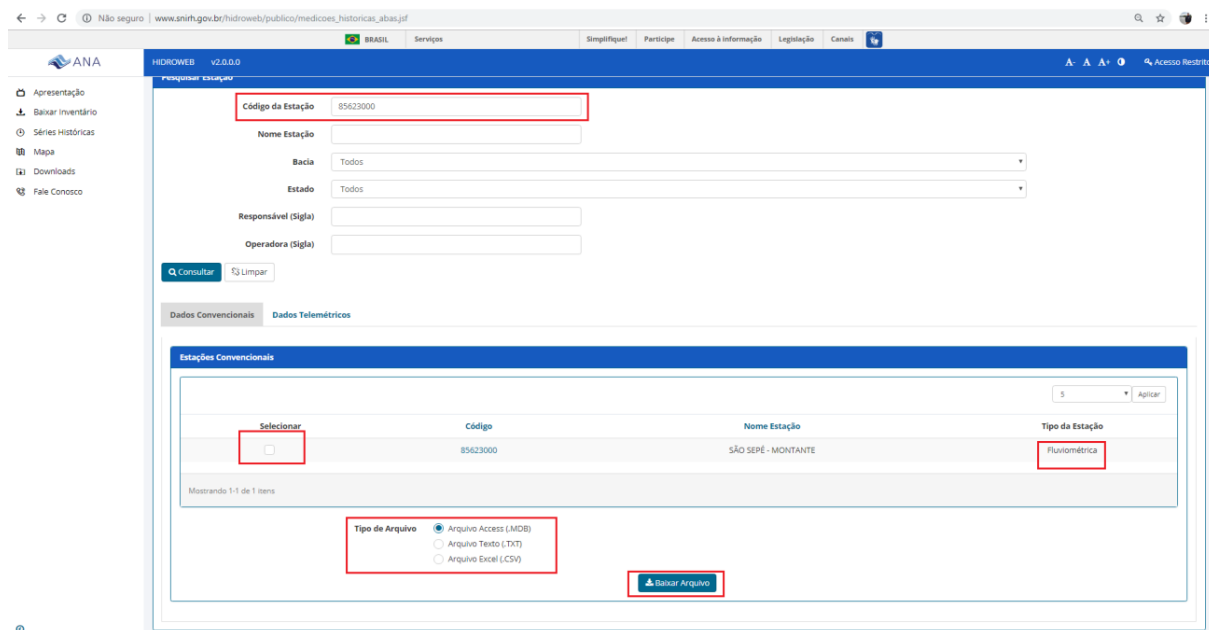
Ao clicar no ícone, a tela observada na Figura 2 aparece. No campo *código da estação* é possível inserir o código e ter acesso aos dados da referida estação. Além do código da estação é possível inserir o nome da estação, a bacia a qual pertence, estado, o responsável e a operadora.

Figura 2 - Tela: Séries Históricas



Após inserir o código da estação (neste exemplo foi inserido o código 85623000 – São Sepé montante), a tela que aparece mostra as opções para baixar da internet os arquivos (Figura 3).

Figura 3 - Seleção dos dados e tipo de arquivo



Ao selecionar a estação e escolher o tipo de arquivo em que deseja obter os dados, pode-se efetuar a aquisição dos dados. O arquivo baixado, que está compactado (*zipado*), contém dados de cotas, curva de descarga, perfil transversal, qualidade da água, resumo de descarga, sedimentos e vazões. Para melhor manuseio dos dados, sugere-se que o arquivo seja descompactado, assim, é possível começar a trabalhar os dados.

2 ORGANIZAÇÃO E CONSISTÊNCIA DOS DADOS

Para a construção da curva-chave de sedimentos os dados de interesse são:

- Data
- Hora
- Vazão (Q)
- Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS)

De posse desses dados, deve-se multiplicar a CSS e a Q para transformar a CSS ($\text{ppm} = \text{mg.l}^{-1}$) em g.s^{-1} e após multiplicar por $0,0864$ para obter t.dia^{-1} (unidade usual quando se trata de descarga sólida – Qst). Assim, tem-se o valor da descarga sólida na seção.

Posteriormente, organizam-se os dados em função do tempo (do mais antigo para o mais novo, por exemplo) ou em função da magnitude de Q. Antes mesmo de plotar o gráfico da relação Q versus Qst já é possível verificar se existe algum dado com valor muito baixo ou muito alto.

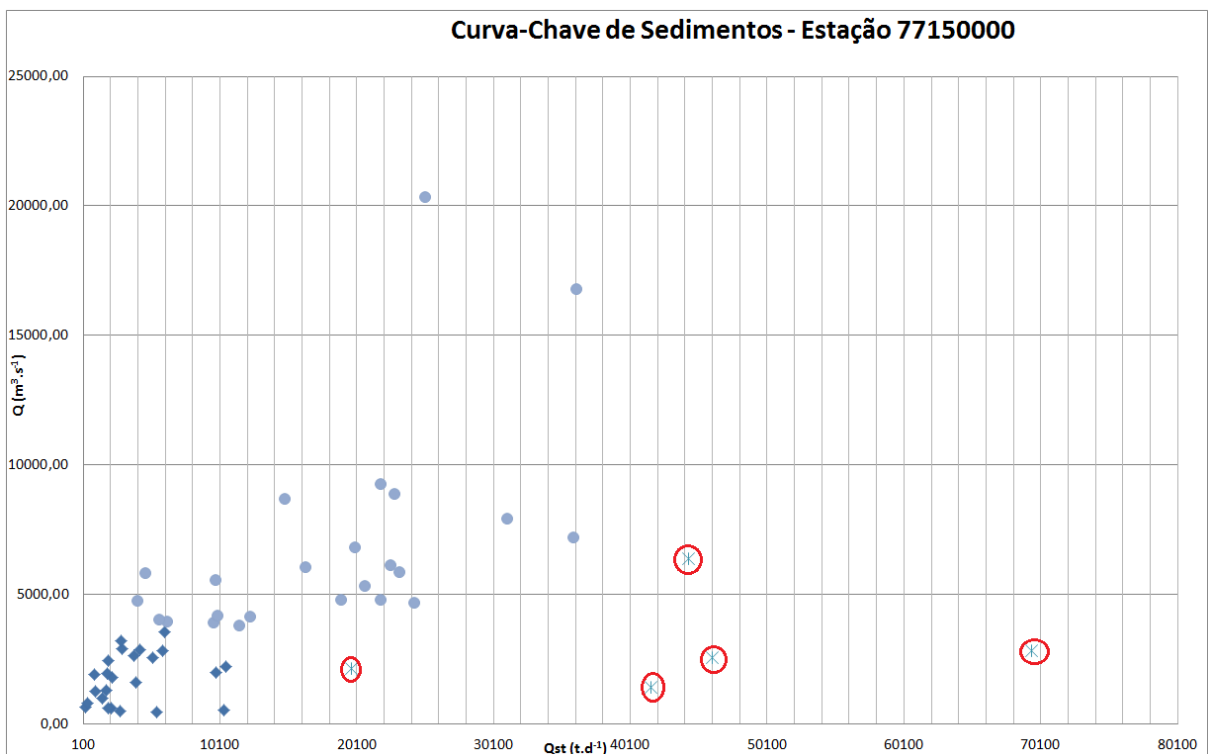
Essa verificação deve priorizar a origem dos dados e buscar as informações originais dos relatórios de campo para descartar qualquer erro de digitação, por exemplo. Visto que não foi erro de digitação deve-se avaliar a necessidade de descartar o dado, dependendo do tipo de análise e da precisão dos resultados pretendidos. É importante salientar que um ponto na curva só deve ser descartado depois de analisado todos os dados que geraram aquele valor – medição de vazão, coleta, análise de laboratório e cálculos (CARVALHO, 2008).

O local para verificar as fichas de campo é o sitio eletrônico <http://www.snirh.gov.br/fichadecampo/restrito/principal.jsf>. Nele é possível destacar o tipo de documento necessário para averiguação dos dados. No caso da avaliação da curva-chave de sedimentos os documentos objeto são, principalmente: laudo de análise de concentração de sedimentos em suspensão e a ficha de medição da descarga líquida (Figura 4).

Figura 4 - Acesso às fichas de campo

Na plotagem do gráfico Q versus Qst é possível visualizar o comportamento dos dados, bem como os pontos fora de um padrão esperado, considerados pontos atípicos (*outliers*) (Figura 5). Após esse processo de verificação, têm-se os dados observados organizados para confrontar com os dados calculados.

Figura 5 - Pontos considerados fora da curva/atípicos (*outliers*).



3 OBTENÇÃO DA CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS

3.1 Regressão Linear

Se os pontos estão bem distribuídos, sem grande dispersão, é possível aplicar o método da regressão linear. Baseado no método dos mínimos quadrados, o objetivo é obter uma reta tal que a soma dos quadrados dos desvios entre a reta e os valores observados seja mínima.

Tendo-se a curva do tipo exponencial (Equação 1)

$$Q_{st} = a \cdot Q^n \quad \text{Equação 1}$$

em que, Q_{st} é a descarga sólida ($t \cdot d^{-1}$), Q é a descarga líquida ($m^3 \cdot s^{-1}$) e a e n são valores adimensionais. Os coeficientes a e n são definidos conforme Equação 2 e 3, respectivamente

$$n = \frac{\sum(\log Q \cdot \log Q_{st}) - N \cdot \log Q_m \cdot \log Q_{stm}}{\sum(\log Q)^2 - N \cdot (\log Q_m)^2} \quad \text{Equação 2}$$

$$a = 10^{\log Q_{stm} - n \cdot \log Q_m} \quad \text{Equação 3}$$

em que, $\log Q_m$ e $\log Q_{stm}$ correspondem a média dos logaritmos dos valores medidos da descarga líquida e descarga sólida, respectivamente, e N é o número de pontos observados.

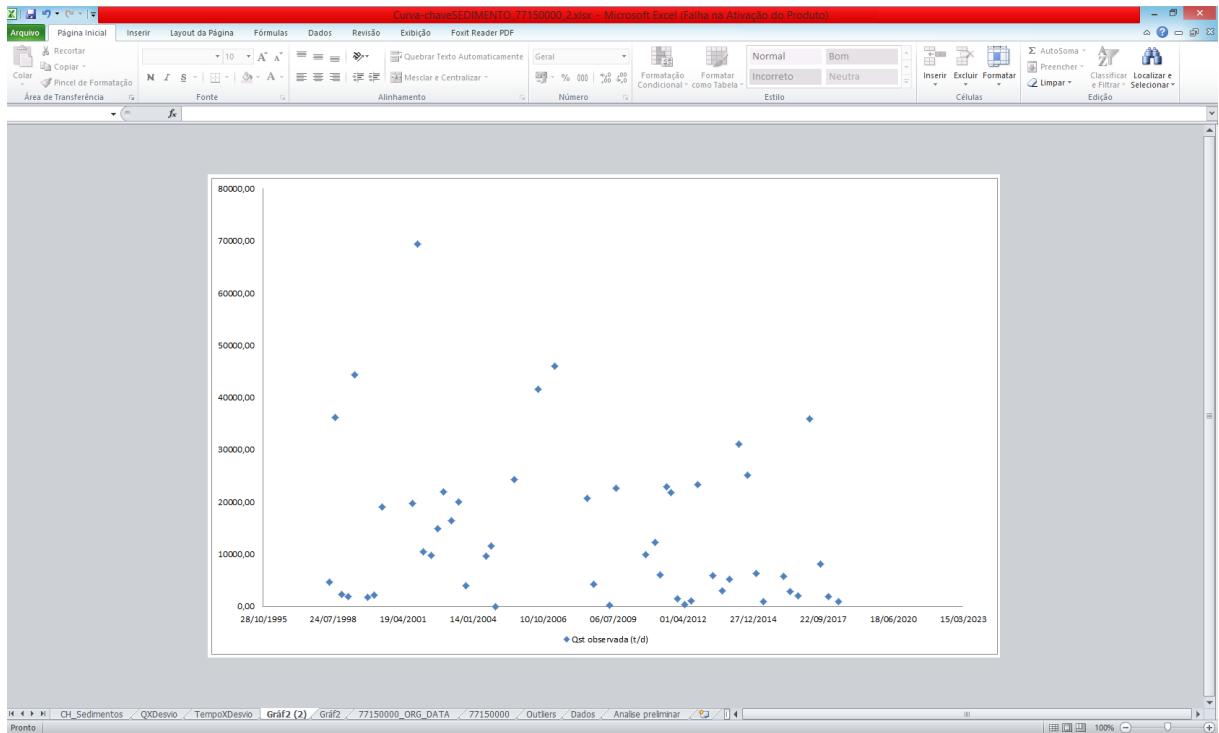
Encontro a equação é realizado o cálculo da descarga sólida para os valores de descarga líquida. Sugere-se que seja plotado em um gráfico o conjunto de dados observados e a os valores gerados pela curva para melhor acompanhamento da variação dos valores. Além disso, por meio dos parâmetros n e a é possível estabelecer uma estimativa inicial da relação entre as variáveis utilizando, posteriormente, o solver do gerenciador de planilhas (neste caso utilizou-se o *excel* da Microsoft).

Para isso, no *excel*, a organização dos dados lado a lado favorece a melhor visualização, destacando as colunas para a Q_{st} observada e a Q_{st} calculada. Deve-se, também, calcular o desvio absoluto e relativo entre os resultados encontrados. A Figura 6 abaixo oferece uma sugestão para a organização dos dados.

Figura 6 - Organização dos dados no excel

A7	Estação - Código																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
7	Estação - Código	N	Data	Hora	Q (m³/s)	Concentração (ppm)(mg/l)	Descarga sólida (g/s)	Qst observada (t/d)	log Q	log Qst	log Q x log Qst	log Q²	Qst calculada (t/d)	Desvio	Desvio Relativo (%)	Desvio Absoluto	Q	Qst calculada (t/d)	Qst calculada (t/d)	Qst calculada (t/d)
8	77150000	1	01/06/1998	07:00	5814,00	9,33	54244,62	4686,74	3,76	3,67	13,82	14,17	12873,59	67024538,09	63,59	63,59	400	812,72	812,72	837,95
9	77150000	2	27/08/1998	07:00	16785,00	24,97	419211,45	36222,09	-2,22	4,56	19,26	17,85	37721,76	2279141,18	-4,00	-4,00	410	831,72	831,72	1395,32
10	77150000	3	26/11/1998	07:00	1798,00	14,53	26124,94	2257,19	3,25	3,35	10,92	10,59	3881,52	2638417,20	41,85	41,85	420	854,73	880,70	880,70
11	77150000	4	26/02/1999	07:00	1974,00	10,87	21457,38	1853,92	3,30	3,27	10,77	10,86	4269,43	3884700,99	56,58	56,58	430	875,76	902,10	902,10
12	77150000	5	31/05/1999	07:00	6368,00	80,57	515069,76	44229,23	3,80	4,65	17,88	14,47	14118,25	912702923,05	-213,99	-213,99	440	896,81	923,50	923,50
13	77150000	6	27/11/1999	07:00	1333,00	15,76	30787,44	1796,03	3,12	3,25	10,15	9,74	2829,86	1668062,16	36,53	36,53	450	917,87	944,61	944,61
14	77150000	7	29/02/2000	07:00	615,00	41,26	25374,90	2192,99	2,79	3,34	9,32	7,78	1299,48	797296,87	-68,71	-68,71	460	938,95	966,34	966,34
15	77150000	8	23/06/2000	07:00	4795,00	45,82	219706,90	18982,68	3,68	4,28	15,75	15,55	10588,67	70459289,04	-79,27	-79,27	470	960,04	987,77	987,77
16	77150000	9	27/08/2001	16:15	2136,00	107,01	228573,36	19748,74	3,33	4,30	14,30	11,09	4527,10	22866875,81	-335,81	-335,81	480	981,15	1009,21	1009,21
17	77150000	10	12/11/2001	16:55	2849,00	282,12	803759,88	69666,45	3,45	4,84	16,73	11,93	6207,29	3998989292,61	-1018,76	-1018,76	490	1002,27	1030,66	1030,66
18	77150000	11	01/02/2002	17:00	2210,00	55,16	121903,60	10532,47	3,34	4,02	13,45	11,18	4790,67	32968318,44	-119,85	-119,85	500	1023,41	1052,12	1052,12
19	77150000	12	31/05/2002	16:45	3546,00	20,42	113249,32	9784,74	3,74	3,99	14,94	14,02	1272,06	6186794,29	20,27	20,27	510	1044,56	1073,59	1073,59
20	77150000	13	29/08/2002	13:00	8661,00	19,87	172471,60	14901,55	3,94	4,17	16,44	15,51	19327,75	15991116,79	22,90	22,90	520	1065,78	1095,06	1095,06
21	77150000	14	22/11/2002	16:25	9245,00	27,40	258313,00	21866,24	3,97	4,34	17,21	15,73	20604,00	1644153,02	-6,22	-6,22	530	1086,90	1116,55	1116,55
22	77150000	15	10/03/2003	12:30	6061,00	31,34	189951,74	16411,83	3,78	4,22	15,94	14,31	13428,32	8901314,27	-22,22	-22,22	540	1108,09	1138,04	1138,04
23	77150000	16	26/06/2003	14:00	6791,00	34,15	233922,65	20037,25	3,83	4,30	16,48	14,68	15069,63	24677244,12	-32,86	-32,86	550	1129,30	1159,54	1159,54
24	77150000	17	06/10/2003	11:00	16506,00	28,36	495661,16	39335,19	3,21	3,59	11,52	10,28	3459,20	226560,19	-13,76	-13,76	560	1150,51	1181,05	1181,05
25	77150000	18	16/07/2004	10:15	3886,00	28,76	111761,36	9656,18	3,59	3,98	14,30	12,88	8556,14	1210098,34	-12,86	-12,86	570	1171,74	1202,56	1202,56
26	77150000	19	30/09/2004	14:00	3779,00	35,27	133285,33	11515,85	3,58	4,06	14,53	12,80	8317,29	10230776,58	-38,46	-38,46	580	1192,98	1224,09	1224,09
27	77150000	20	20/11/2004	16:00	2,99	49,51	207,83	17,96	0,48	1,25	0,60	0,23	5,68	150,74	-216,18	-216,18	590	1214,24	1245,62	1245,62
28	77150000	21	27/08/2005	18:30	4676,00	60,27	281822,52	24349,47	3,67	4,39	16,10	13,47	10322,26	196762609,83	-135,89	-135,89	600	1235,50	1267,16	1267,16
29	77150000	22	28/07/2006	17:05	1421,00	338,66	481235,86	41578,78	3,15	4,62	14,56	9,94	3053,25	1484216644,96	-1261,79	-1261,79	610	1256,78	1288,70	1288,70
30	77150000	23	30/03/2007	18:30	2548,00	209,21	530687,08	46057,00	3,41	4,66	15,88	11,80	5539,10	1641899838,52	-751,49	-751,49	620	1278,07	1310,25	1310,25
31	77150000	24	30/06/2008	13:50	5394,00	45,24	239692,86	20731,94	3,72	4,32	16,68	13,87	11729,24	81048542,13	-76,75	-76,75	630	1299,37	1331,81	1331,81
32	77150000	25	08/10/2008	12:50	2870,00	17,28	49593,60	4284,89	3,46	3,63	12,56	11,96	6253,96	3877263,20	31,49	31,49	640	1320,68	1353,38	1353,38
33	77150000	26	18/05/2009	12:50	664,00	5,15	3418,27	295,34	2,82	2,47	6,97	7,96	1405,16	1231714,01	78,98	78,98	650	1342,00	1374,95	1374,95
34	77150000	27	21/08/2009	13:50	6188,00	42,77	261666,86	22608,02	3,79	4,35	16,49	14,54	13556,38	81932039,00	-466,77	-466,77	660	1363,34	1396,53	1396,53
35	77150000	28	19/10/2010	14:20	4183,00	27,51	115074,33	9942,42	3,62	4,00	14,48	13,12	9219,57	522517,84	-7,84	-7,84	670	1384,68	1418,12	1418,12
36	77150000	29	24/02/2011	13:45	4126,00	34,55	142533,30	12316,61	3,62	4,09	14,79	13,07	9092,19	1039680,88	-35,46	-35,46	680	1406,03	1439,71	1439,71
37	77150000	30	12/05/2011	12:40	3541,00	19,70	69757,70	6027,07	3,55	3,78	13,42	12,60	7748,62	296745,06	22,22	22,22	690	1427,40	1461,31	1461,31
38	77150000	31	08/08/2011	13:20	8821,00	29,93	265399,66	22916,71	3,95	4,36	17,21	15,98	19788,72	10399573,50	-16,10	-16,10	700	1448,77	1482,91	1482,91
39	77150000	32	13/10/2011	13:00	4787,00	52,83	252897,21	21850,32	3,68	4,34	15,97	13,54	10570,76	127228456,90	-106,71	-106,71	710	1470,16	1504,52	1504,52
40	77150000	33	18/01/2012	18:00	1004,00	17,50	17570,00	1518,05	3,00	3,18	9,55	9,01	2142,32	389714,74	29,14	29,14	720	1491,55	1526,14	1526,14
41	77150000	34	27/04/2012	15:15	817,00	5,60	4575,20	395,30	2,81	2,60	7,56	8,48	1736,13	1797833,27	77,23	77,23	730	1512,96	1547,77	1547,77
42	77150000	35	26/07/2012	16:40	1272,00	9,20	11702,40	1011,09	3,10	3,00	9,33	9,64	2727,05	2944518,72	62,92	62,92	740	1534,37	1569,39	1569,39
43	77150000	36	25/10/2012	13:00	5833,00	46,20	269484,60	23283,47	3,77	4,37	16,45	14,18	12916,25	107479296,71	-80,26	-80,26	750	1555,79	1591,03	1591,03
44	77150000	37	05/06/2013	14:50	2838,00	24,20	68437,60	5913,01	3,45	3,77	13,02	11,91	6160,63	61314,19	4,02	4,02	760	1577,23	1612,67	1612,67
45	77150000	38	15/10/2013	14:45	2893,00	11,90	34426,70	2374,47	3,46	3,47	12,02	11,98	6305,09	11093044,47	52,82	52,82	770	1598,67	1634,32	1634,32
46	77150000	39	27/01/2014	15:20	2569,00	23,50	60371,50	5216,10	3,41	3,72	12,68	11,63	5585,67	136583,18	6,62	6,62	780	1620,12	1655,97	1655,97
47	77150000	40	06/06/2014	16:05	7903,00	45,60	360376,80	31136,56	3,90	4,49	17,51	15,19	17574,50	189292976,04	-77,17	-77,17	790	1641,58	1677,63	1677,63
48	77150000	41	08/10/2014	14:15	2034,00	14,30	290776,20	25125,06	3,31	4,40	16,96	16,56	45820,50	426383867,16	45,17	45,17	800	1663,05	1699,29	1699,29
49	77150000	42	11/02/2015	15:20	3948,00	18,50	79338,00	6310,48	3,60	3,80	13,67	12,93	8964,17	5489388,99	27,42	27,42	810	1684,53	1720,96	1720,96
50	77150000	43	25/05/2015	14:15	1908,00	5,60	10684,80	923,17	3,28	2,97	9,73	10,76	4123,88	10244550,02	77,61	77,61	820	1706,02	1742,63	1742,63
51	77150000	44	07/05/2016	13:40	4026,00	16,4	66190,40	5718,85	3,61	3,76	13,55	13,00	8891,12	10063278,66	35,68	35,68	830	1727,51	1764,31	1764,31
52	77150000	45	08/06/2016	13:40	3201,00	10,5	33610,50	2903,95	3,51	3,46	12,14	12,29	6990,48	16699778,87	58,46	58,46	840	1749,02	1786,00	1786,00
53	77150000	46	28/09/2016	11:25	2447,00	9,30	22757,10	1966,21	3,39	2,99	11,16	11,16	448	5315,24	63,01	63,01	850	1770,53	1807,69	1807,69
54	77150000	47	14/03/2017	12:00																

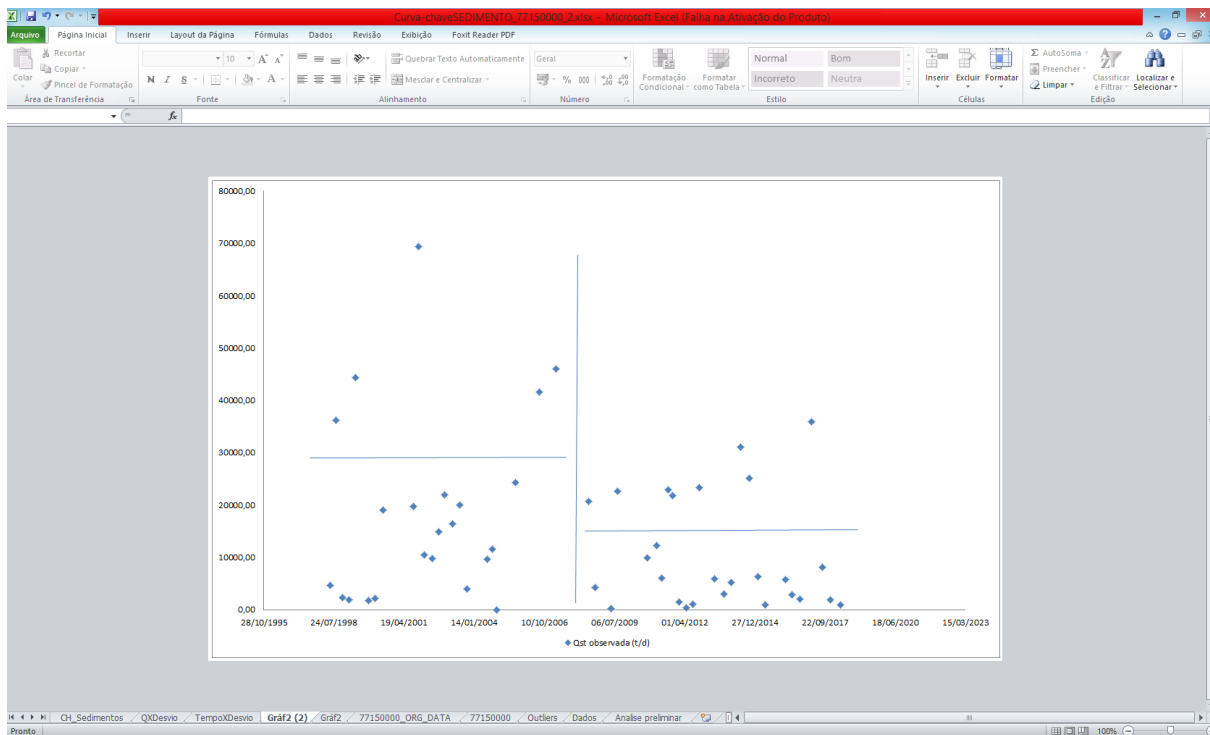
Figura 7 - Gráfico da dispersão dos pontos calculados



Observando a Figura 7 é possível estabelecer duas divisões por intervalo de tempo. Além disso, é necessário excluir pontos considerados pontos fora da curva (*outliers*). Esses pontos podem estar associados a erros na condução da coleta ou das análises de concentração de sedimentos em suspensão no laboratório, ou até mesmo erros de digitação, como mencionado anteriormente.

Na Figura 8, ainda, é possível identificar outra divisão do conjunto de dados efetuando a separação para vazões altas e para vazões baixas dentro da divisão temporal.

Figura 8 - Divisão dos dados por magnitude de vazão



É importante destacar que essa divisão é indicada quando os dados apresentam bastante dispersão. Caso não seja necessário estabelecer dois tramos, a curva poderá ser representada por apenas um tramo, considerando toda a extensão dos dados.

3.2 Traçado e ajuste da curva-chave de sedimentos utilizando o *solver*

O exemplo a seguir, de traçado e ajuste da curva-chave de sedimentos, pode ser baixado (arquivo *excel*) pelo link: <https://drive.google.com/open?id=1FInquCKL36iYTdca0H0WjcKj30bESCRK>.

Na Figura 9 é explicado as variáveis envolvidas na análise do *solver*. Vale destacar que o objetivo é sempre o mínimo valor do desvio, seja ele absoluto ou calculado pelo erro mínimo quadrado. O diagrama unifilar mostrando a localização da estação apresentada no exemplo pode ser observado em Guimarães *et al.* (2017), segundo o modelo apresentado por Koefender *et al.* (2016) e Finck *et al.* (2017).

Neste exemplo é detalhado como inserir os dados dentro do *solver*. Primeiramente, os dados oriundos do HIDROWEB são colocados entre as colunas A e F linha 7. A partir da

coluna G até a coluna P os valores são alterados automaticamente, conforme demonstrado na Figura 9. Além disso, é importante criar novas células ao lado dos coeficientes encontrados pela metodologia detalhada anteriormente (a e n da equação 1) – colunas C, D e E linhas 3 e 4. A partir desses coeficientes podem-se atribuir intervalos no solver que contenham esses valores. Neste exemplo o valor de n e a encontrado pelo método da regressão linear foi 1,09 e 1,01, respectivamente. Dessa forma, o intervalo de valores arbitrado inicialmente poderia ser $1,0001 < n < 2,5$ e $0,5 < a < 2,5$. As células alteradas, neste caso, que representam os coeficientes n e a são C3 e C4, respectivamente. Quando da primeira iteração do solver já é possível perceber um comportamento e, assim, alterar ou não o intervalo dos parâmetros. Após alterar algum intervalo, clica-se em resolver e, então, ocorre uma alteração nos valores. O processo pode ser repetido alterando novamente o intervalo de variação de parâmetros.

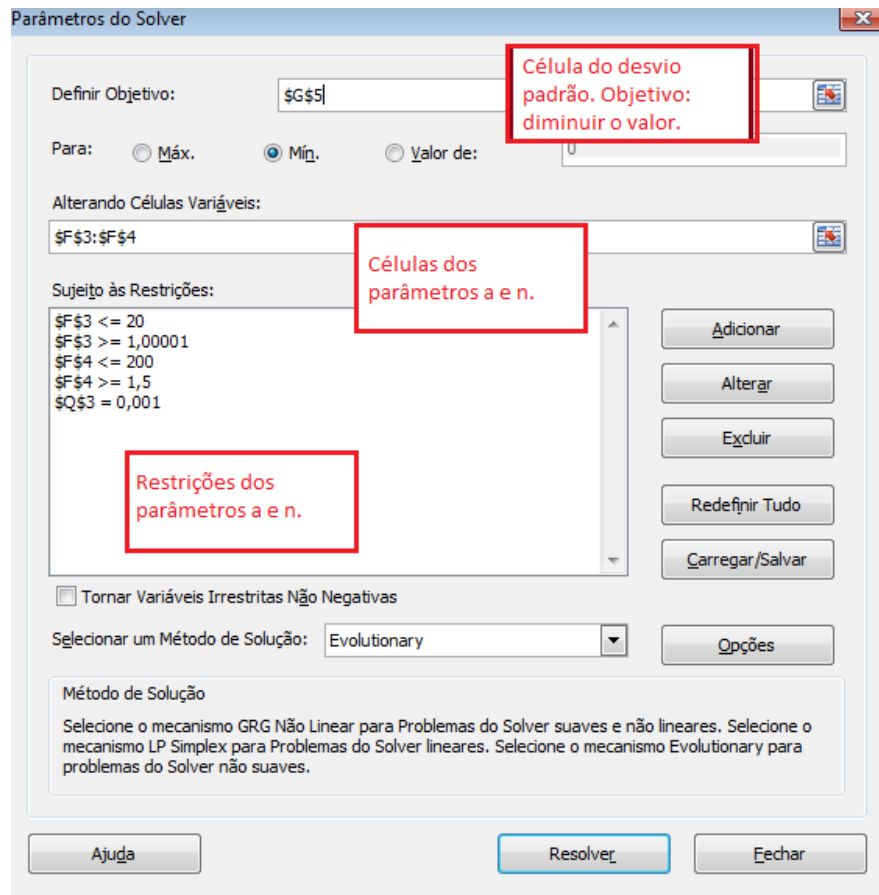
O objetivo é diminuir a diferença entre a Qst calculada e a Qst observada. Assim, este procedimento deve ser feito utilizando o desvio relativo, o desvio absoluto e o desvio calculado pelo erro médio quadrado. Deve-se ficar atento ao valor gerado após rodar o solver e, então, selecionar os parâmetros responsáveis por obter o menor valor de desvio.

O acompanhamento do comportamento do traçado da curva deve ser realizado após cada iteração. Algumas vezes a iteração anterior pode ser melhor que a última. Ou, em alguns casos, podem-se utilizar apenas a soma dos desvios para a parte superior dos pontos na tentativa de diminuir a diferença entre o valor calculado com o observado.

Além disso, é possível escolher outro método de solução, nesse caso, podem ser utilizados dois métodos. O método *evolutionary* é usualmente utilizado quando a célula objetivo e as células de restrições são determinadas a partir de funções cujos resultados variam de forma abrupta. Já o método *GRG não linear* é utilizado quando o objetivo e as restrições resultam de funções não lineares das variáveis de decisão. Geralmente, este método é utilizado quando a célula objetivo e de restrição são calculadas a partir de uma operação matemática que envolve potências, cálculo exponencial ou trigonométrico sobre as variáveis de decisão.

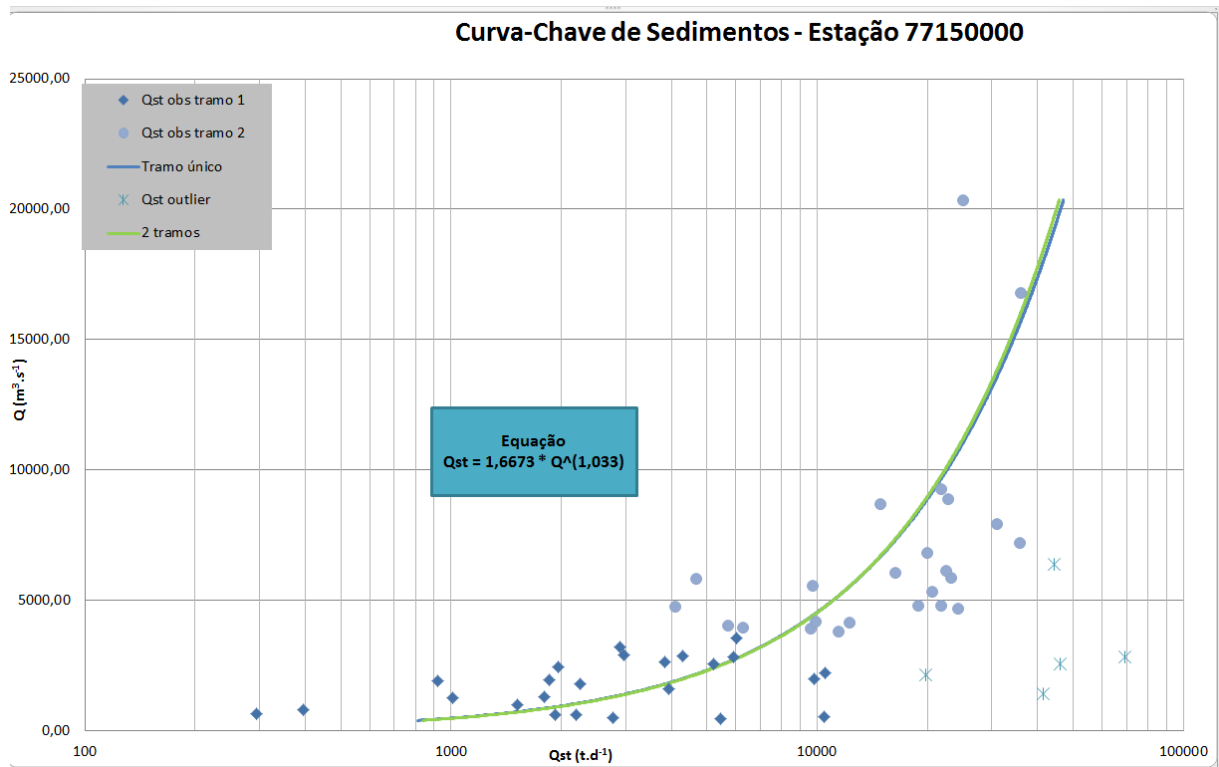
Ainda na Figura 9 é apresentada a célula Q2. Ela é importante quando do uso de dois tramos. Isso porque está atrelada a diferença dos valores encontrados pelas curvas dos dois tramos. No solver o objetivo é que essa diferença seja a mínima possível, possibilitando, dessa maneira a continuidade gráfica dos tramos.

Figura 10 - Exemplo de aplicação do solver



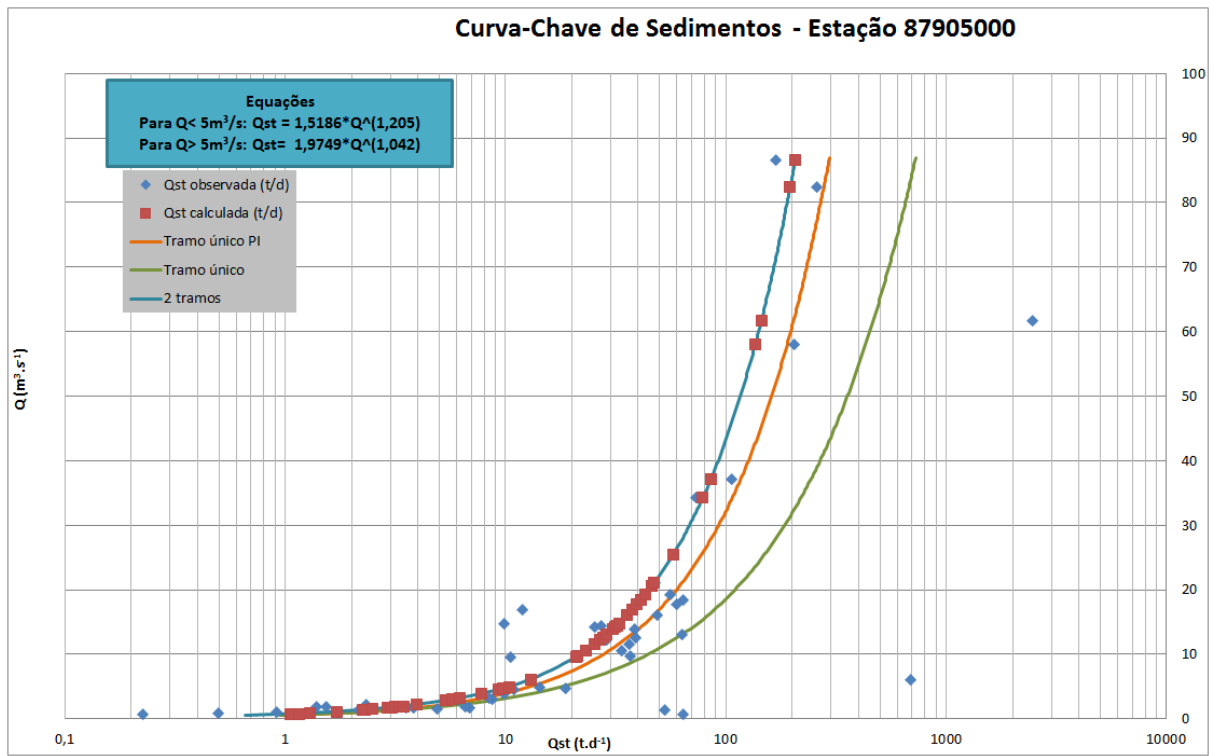
Após rodar o solver pode-se visualizar o comportamento da Q versus Qst no gráfico. É importante que seja plotado os dados calculados no solver com apenas um tramo e os dados calculados com dois tramos, buscando sempre a melhor representação dos dados observados. Nesse caso (Figura 11), a curva com tramo único e a curva com dois tramos apresentaram comportamento similar, logo foi utilizado à equação da curva de um tramo para esta estação.

Figura 11 - Gráfico da curva-chave de Sedimentos com tramo único



Um exemplo para curva com dois tramos é observado na Figura 12. O conjunto de equações aplicadas aos dados apresentou o menor desvio padrão e apresentou, visualmente, adequação aos dados medidos.

Figura 12 - Gráfico da curva-chave de sedimentos com dois tramos



No Quadro 1 é possível visualizar as figuras utilizadas na elaboração deste tutorial com mais detalhes.

Quadro 1 - Figuras para visualização de detalhes

Figuras Deste Tutorial	Endereço (<i>link</i>) para baixar utilizando o navegador de internet
Figura 1 - Acesso ao HIDROWEB	https://drive.google.com/open?id=1dfCYLBSaqOS6tGDVVGJsdVIGY2jY1OMmH
Figura 2 - Tela: Séries Históricas	https://drive.google.com/open?id=1yfggLsnPyKdAhgqxMVuj--rTrENDqcm
Figura 3 - Seleção dos dados e tipo de arquivo	https://drive.google.com/open?id=1aNKp8to1SOarmMQ3KrHfq2rZdj4kN9zf
Figura 4 - Acesso às fichas de campo	https://drive.google.com/open?id=1ns2IVhFfjukTm1UfY4UU29yioigG3zQW
Figura 5 - Pontos considerados fora da curva/atípicos (<i>outliers</i>)	https://drive.google.com/open?id=1pThFkz8SLuve34TH4FBrw1yWAv4DBqzY
Figura 6 - Organização dos dados no <i>excel</i>	https://drive.google.com/open?id=1Et-BzRA48uvuIVJznwWP777N1Lq6Jn7l
Figura 7 - Gráfico da dispersão dos pontos calculados	https://drive.google.com/open?id=13i5qlH8HhGalouEHJ4HeIRD4zQhXlu4
Figura 8 - Divisão dos dados por magnitude de vazão	https://drive.google.com/open?id=1U7ZpI-Y6M13TkZGIVGIL8XNfSQKbHL7l
Figura 9 - Utilização do solver	https://drive.google.com/open?id=1FNnu-J6nWEUpS94BYzOJp3ZncZDivzgi
Figura 10 - Exemplo de aplicação do solver	https://drive.google.com/open?id=19mpG-asEihww8UEwOkvYZoHuHTApjfpU
Figura 11 - Gráfico da curva-chave de sedimentos com tramo único	https://drive.google.com/open?id=1pAbL3SRwN-3nWxrM2ZY8ebOIN6eSATfo
Figura 12 - Gráfico da curva-chave de sedimentos com dois tramos	https://drive.google.com/open?id=1u4P-FMYVGS_vAOIm0xRnANKFyWdOhoWS
Planilha com o exemplo de traçado e ajuste da curva-chave de sedimentos	https://drive.google.com/open?id=1FInquCKL36iYTdca0HOWjcKj30bESCRK
Tutorial: Traçado e ajuste de curva-chave de sedimentos (PDF)	https://drive.google.com/file/d/10qtPC41z7McsH7rqQMSrrkULTo1hwE3y/view?usp=sharing
Trabalhos de curva-chave de vazão e sedimentos no repositório institucional da CPRM/SGB	http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/simple-search?location=&query=curva-chave&rpp=100&sort_by=score&order=DESC&etal=0&submit_search=Atualizar

4 CONSIDERAÇÕES

A variabilidade da relação entre CSS e vazão é atribuída à variabilidade na taxa de disponibilidade de sedimentos, que é afetada por fatores como estação do ano, tamanho da bacia e localização da fonte dentro da bacia. Soma-se à isso, o resultado de um efeito de histerese no fluxo. A histerese em sentido horário (maior concentração de sedimentos no ramo ascendente do hidrograma) é comum em bacias menores devido ao aumento da tensão de cisalhamento no tramo ascendente do hidrograma e porque as fontes de sedimentos estão mais próximas do canal. Já a histerese no sentido anti-horário (maior concentração de sedimentos na recessão do hidrograma) pode ocorrer em grandes bacias onde as fontes a montante continuam a fornecer a maior parte da carga após os picos de fluxo. Devido a estes e outros fatores, a variabilidade e o intervalo de CSS durante qualquer evento chuva-vazão podem diferir das concentrações durante outros períodos, mesmo que o valor de vazão possa ser idêntico ou similar.

Equipamentos especializados, treinamento e mão-de-obra qualificada são necessários para coletar amostras de CSS, além disso, são demorados, caros e perigosos em determinadas condições. Dados de sedimentos confiáveis e consistentes são necessários para agências governamentais federais, estaduais e locais para estabelecer e monitorar padrões de qualidade de água, planejamento de restauração de rios, quantificação de orçamentos de sedimentos e avaliação da eficácia de estratégias de redução de sedimentos (ELLISON *et al.*, 2016). No entanto, é necessário um grande conjunto de dados para melhorar a compreensão das relações de transporte de sedimentos para os rios.

Nesse sentido, o uso de curva-chave é necessário quando os dados diários de vazão são disponíveis e os de sedimentos não o são. A existência da curva permite, assim, um cálculo aproximado de dados diários de sedimento e da descarga sólida média anual. A extrapolação dos dados para anos não observados é pouco aceitável, mas usual.

É importante considerar que a curva-chave de sedimentos é um processo bastante empírico, isso porque, provem de dados de vazão, os quais são obtidos, também por uma curva-chave, por meio das cotas. Esse fato torna o processo de transformação bastante suscetível a erros. Por isso, a necessidade de realizar medições de vazão e coletas de sedimentos em diferentes períodos e vazões, evitando, dessa forma, sub ou superestimativas.

Além disso, outro problema está relacionado ao fato de considera-se a vazão como um bom parâmetro preditor da CSS, o que nem sempre é verdade, e ao fato de assumir que o pico da CSS coincide com o pico da Q (FINLAYSON, 1985). Segundo Walling (1977), a pouca correlação entre Q e CSS provém do fato de que essas variáveis apresentam, muitas vezes, um atraso de uma em relação à outra. Este fenômeno é conhecido como histerese (WILLIAMS, 1989).

A existência da curva-chave possibilita um cálculo aproximado de dados diários de sedimento e da descarga sólida média anual por meio do conhecimento da descarga líquida, desde que haja anos suficientes de registros medidos de sedimentos disponíveis para defini-los (COLBY, 1956). Para sua obtenção são necessárias coletas de amostras com valores de concentração ou de descarga sólida, tanto em suspensão quanto de arraste ou os dois juntos. Sua utilização decorre do fato de que a realização diária de coleta e análise dessas amostras é economicamente inviável e necessita de equipamentos e pessoal qualificado. Isso representa a necessidade do conhecimento e construção da curva-chave de sedimentos para as bacias hidrográficas.

Além disso, de acordo Ellison *et al.* (2016), se as relações entre CSS e Q não forem estatisticamente significativas, as curvas-chave de sedimentos não devem ser usados para prever a CSS ou a descarga sólida, pois isso pode resultar em grandes erros. Para fluxos em que isso não ocorra, as estimativas de CSS ou a descarga sólida podem ser usadas para planejamento e projeto de restauração de correntes, e para estimar as cargas anuais de sedimentos para cursos d'água com pouco ou nenhum dados de sedimentos estão disponíveis.

5 REFERÊNCIAS

ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, v. 234, n. 3-4, p. 228-248, 2000. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00253-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169400002535>>. Acesso em: 24 out. 2018.

CARDOSO, A. T., COELHO FILHO, J. A. P. Produção de sedimento em suspensão na bacia hidrográfica do Alto Guaporé, município de Pontes e Lacerda-MT. **Ambiência**, v. 13, n. 1, p. 221-234, 2017. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/18909/1/artigo_ambiencia_2017.pdf>. Acesso em: 22 out. 2018.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia prática. 2ª ed. RJ. 2008. Disponível em: <<https://www.editorainterciencia.com.br/index.asp?pg=prodDetalhado.asp&idprod=115>>. Acesso em: 24 out. 2018.

COLBY, B. R. Relationship of sediment discharge to streamflow. US Dept. of the Interior, **United States Geological Survey**, Water Resources Division,, 1956. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/1956/0027/report.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2018.

CÓRDOVA, J. R.; GONZALEZ, M. Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. **Soil technology**, v. 11, p. 57-65, 1997. DOI: 10.1016/S0933-3630(96)00115-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0933363096001158>>. Acesso em: 24 out. 2018.

ELLISON, C. A., GROTEN, J. T., LORENZ, D. L., KOLLER, K. S. Application of dimensionless sediment rating curves to predict suspended-sediment concentrations, bedload, and annual sediment loads for rivers in Minnesota. **United States Geological Survey**, 2016. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/sir/2016/5146/sir20165146.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2018.

FINCK, J. S.; GUIMARÃES, G. M.; KOEFENDER, A.; SOUZA, C. J. R.; ALMEIDA, D. B.; MARCUZZO, F. F. N. Diagrama unifilar de dados hidrológicos em bacia hidrográfica: proposta de modelo e passo a passo de como fazer consistindo os dados. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ABRH,

2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18491>>. Acesso em: 26 out. 2018.

FINLAYSON, B. L. Field calibration of a recording turbidimeter. **Catena**, v. 12, n. 2-3, p. 141-147, 1985. DOI: 10.1016/0341-8162(85)90006-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816285800138>>. Acesso em: 24 out. 2018.

KHALEGHI, M. R.; VARVANI, J. Sediment Rating Curve Parameters Relationship with Watershed Characteristics in the Semiarid River Watersheds. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 43, n. 7, p. 3725-3737, 2018. DOI: 10.1007/s13369-018-3092-7. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-018-3092-7>>. Acesso em: 24 out. 2018.

GUIMARÃES, G. M.; FINCK, J. S.; MARCUZZO, F. F. N. Construção de diagramas unifilares da rede hidrometeorológica nacional e de aproveitamentos hidrelétricos das sub-bacias 85 a 88, na bacia hidrográfica do Atlântico – trecho sudeste. **Geographia Meridionalis** - Revista Eletrônica do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, v. 03, n. 3, p. 276–300, jul-dez. 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18953>>. Acesso em: 26 out. 2018.

KOEFENDER, A.; SOUZA, C. J. R.; ALMEIDA, D. B.; GUIMARÃES, G. M.; FINK, J. S.; MARCUZZO, F. F. N. A concepção de diagrama unifilar de bacia hidrográfica para estudos de interesse hidrológico: O passo a passo de como obter as informações, como montar o diagrama unifilar e como verificar e corrigir seus dados inventariais básicos. 2016. 87p. **Tutorial**. Manual desenvolvido na CPRM/PA/GEHITE. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B5VdVLRtE05QEeGw4MHN3b2V6b2s/view?usp=sharing>>. Acesso em: 26 out. 2018.

VEIGA, A. M., SOARES, A. K., COELHO FILHO, J. A. P., SOUZA, D. N., OLIVEIRA, W. N. D. Determinação da produção de sedimento através da curva-chave sedimentométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Araguaia-GO. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília DF. **Anais...** .Porto Alegre: ABRH. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15298/1/AR-Eventos_VEIGA.pdf>. Acesso em: 22 out. 2018.

WALLING, D. E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. **Water Resources Research**, v. 13, p. 531-538, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR>

[013i003p00531](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR013i003p00531). Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR013i003p00531>>. Acesso em: 24 out. 2018.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, v. 111, n. 1-4, p. 89-106, 1989. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90254 0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169489902540>>. Acesso em: 24 out. 2018.

6 COMO CITAR E A REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTE TUTORIAL

Exemplos de citação deste tutorial:

Pelo tutorial apresentado por Menezes e Marcuzzo (2018) verifica-se que no traçado de curva-chave de sedimentos é possível estabelecer divisões por intervalo de tempo e descarga líquida dos dados sedimentológicos. Os autores também citam que é necessário excluir pontos considerados pontos fora da curva (*outliers*), pois estes pontos podem estar associados a erros na condução da coleta ou das análises de concentração de sedimentos em suspensão no laboratório, ou até mesmo erros de digitação.

OU

No tutorial básico de curva-chave de sedimentos (MENEZES e MARCUZZO, 2018) verifica-se que no traçado de curva-chave de sedimentos é possível estabelecer divisões por intervalo de tempo e descarga líquida dos dados sedimentológicos. Os autores também citam que é necessário excluir pontos considerados pontos fora da curva (*outliers*), pois estes pontos podem estar associados a erros na condução da coleta ou das análises de concentração de sedimentos em suspensão no laboratório, ou até mesmo erros de digitação.

Exemplo de referência bibliográfica deste tutorial.

MENEZES, D.; MARCUZZO, F. F. N. **Traçado e ajuste de curva-chave de sedimentos utilizando dados disponíveis no HIDROWEB**. 2018. 87p. Versão 1.0. Tutorial. Manual desenvolvido na CPRM-PA/GEHITE durante o estágio do acadêmico Danrlei de Menezes no

segundo semestre de 2018. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/10qtPC41z7McsH7rqQMSrrkULTo1hwE3y/view?usp=sharing>>. Acesso em: 26 out. 2018.