



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Curso de Engenharia Ambiental

KAIO VINICIUS DE OLIVEIRA FERREIRA

**CONSTRUÇÃO DA CURVA CHAVE DO RIO PIANCÓ-PIRANHAS USANDO
MEDIDOR ACÚSTICO DE VAZÃO COM EFEITO DOPPLER E MEDIÇÃO
AUTOMÁTICA DE NÍVEL DE ÁGUA**

Pombal - PB
2016

KAIO VINICIUS DE OLIVEIRA FERREIRA

**CONSTRUÇÃO DA CURVA CHAVE DO RIO PIANCÓ-PIRANHAS USANDO
MEDIDOR ACÚSTICO DE VAZÃO COM EFEITO DOPPLER E MEDIÇÃO
AUTOMÁTICA DE NÍVEL DE ÁGUA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. MANOEL MOISÉS FERREIRA DE QUEIROZ.

**Pombal - PB
2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- F383c Ferreira, Kaio Vinicius de Oliveira.
Construção da curva chave do Rio Piancó-Piranhas usando medidor acústico de vazão com efeito Doppler e medição automática de nível de água / Kaio Vinicius de Oliveira Ferreira. – Pombal, 2016.
53f. : il. color.
- Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar.
"Orientação: Prof. Dr. Manoel Moisés Ferreira de Queiroz".
1. Recursos Hídricos. 2. Recursos Hídricos - Curva Chave. 3. Gestão de Recursos Hídricos. I. Queiroz, Manoel Moisés Ferreira de. II. Título.
- CDU 556.18(043)

KAIO VINICIUS DE OLIVEIRA FERREIRA

**CONSTRUÇÃO DA CURVA CHAVE DO RIO PIANCÓ-PIRANHAS USANDO
MEDIDOR ACÚSTICO DE VAZÃO COM EFEITO DOPPLER E MEDIÇÃO
AUTOMÁTICA DE NÍVEL DE ÁGUA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

BANCA EXAMINADORA

Orientador - Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz
(Universidade Federal de Campina Grande – CCTA - UACTA)

Examinador interno – Prof.^a Dr.^a Aline Costa Ferreira
(CCTA/UFCG - Examinadora Interno)

Examinador externo – Prof. Edilson Leite da Silva
(CFP/UFCG – Examinador externo)

Pombal – PB
2016

Dedico a Deus, razão da minha existência e aos meus pais, Milma de Oliveira Ferreira e José de Araujo Ferreira, pelo amor, confiança, apoio e paciência nessa etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao SENHOR JESUS CRISTO, que me orientou nessa longa jornada, sendo a minha base de sustentação, a minha calma em momentos de aflições, o meu porto seguro.

À Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar - CCTA, por essa oportunidade.

Ao Professor Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz, exemplo de superação, pela sua orientação.

A meu pai José de Araujo Ferreira, a minha mãe Milma de Oliveira Ferreira e toda a minha família, pelo apoio em toda essa longa jornada, pelos ensinamentos passados quando eu era criança, que me serviu de norte pra seguir nos caminhos certos.

Aos amigos Myrla Freitas, Jairo Nery, José Adalberto, Eugênio Honfi, Maria Juliana, Fellipe Dalyson, Sayonara Costa, Valcemir Ribeiro, Uigno Jeferson, pelo apoio durante essa árdua jornada, pela rica troca de experiência, pelo carinho e dedicação todas as vezes que precisei.

À minha namorada Jeruza Rocha pela inestimável paciência, compreensão, pela ajuda e companheirismo nesta jornada.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, em especial a Aline Costa Ferreira, Érica Cristine Medeiros Nobre Machado, José Cleidimário Araújo Leite e Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira.

Aos meus colegas de classe, pela rica troca de experiências.

Aos bibliotecários, pela ajuda incondicional.

Aos técnicos e funcionários do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, em especial a Gerusia Trigueiro Bezerra e Everton.

Por fim, a todos que, de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição do recurso hídrico no Brasil.	15
Figura 2: Características geométricas de uma seção transversal.	16
Figura 3: Colisão do pulso sonoro com as partículas.	20
Figura 4: Esquema básico de um perfilador de 4 feixes.	22
Figura 5: Deslocamento da embarcação.	23
Figura 6: Localização do Rio Piencó-Piranhas.	26
Figura 7: A DCP S5 e Prancha SonTek Hydroboard com PCM, GPS e ADP.	27
Figura 8: Medição de descarga líquida com o uso do ADCP do Rio Piranhas.	28
Figura 9: Pontos obtidos junto a ANA e curva-chave calculada.	33
Figura 10: Relação entre a vazão calculada e a vazão observada.	34
Figura 11: Pontos obtidos pela medição junto ao ADCP e curva-chave calculada...	35
Figura 12: Gráfico de comparação entre a vazão calculada e a vazão observada. .	36
Figura13: Ajuste da curva-chave com dados do ADCP.	38
Figura 14: Ajuste da curva-chave a partir da vazão calculada.	40
Figura 15: Comparação entre as curvas-chaves usando a ferramenta Solver.	42
Figura 16: Comparação entre as curvas-chaves pelo método da regressão linear. .	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de vazão calculada (m^3/s) após a interação do Solver.	32
Tabela 2: Valores de vazão calculada após a interação do Solver, para os dados de vazão e cota.....	35
Tabela 3: Valores obtidos a partir da regressão linear, tomando por base os valores de vazão e cota.....	37
Tabela 4: Valores de vazões e níveis obtidos por meio da curva-chave.	38
Tabela 5: Valores ajustados através da regressão linear pelo emprego da curva-chave com os dados da ANA.	39
Tabela 6: Valores de cota, vazão observada, diferença de cota e vazão calculada a partir da curva-chave ajustada.	40
Tabela 7: Parâmetros a , h_0 e b ajustados a partir da interação do Solver.	41
Tabela 8: Parâmetros a , h_0 e b ajustado usando a regressão linear.	43

LISTA DE SIGLAS

ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas

ANA - Agência Nacional de Águas

AVM - Acoustic Velocity Meter

BHPPA - Bacia Hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu

ONU - Organização das Nações Unidas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1 Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Recursos Hídricos	14
3.2 Hidrometria	15
3.3 ADCP	16
3.3.1 A Tecnologia Adcp (Acoustic Doppler Current Profiler).....	16
3.3.2 Princípio de funcionamento Doppler.....	19
3.3.3 Como o Adcp mede vazão	22
3.3.4 Vantagens e desvantagens da utilização do ADCP	23
3.4 Curva – chave	24
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Área de estudo	26
4.2 Levantamento dos dados	27
4.3 Aquisição de dados junto a ANA	28
4.4 Extrapolação da Curva - chave	29
4.6 Ajuste da Curva - chave por regressão linear	30
4.7 Ajuste da Curva - chave usando Ferramentas Interativas	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.2 Ajuste da Curva-chave por interação através da ferramenta solver	32
5.2 Verificação do ajuste da Curva-chave por Regressão Linear	37
6. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS	45
ANEXOS	48

FERREIRA, K. V. O. **Construção da Curva Chave do rio Piancó-Piranhas usando o Medidor Acústico de vazão com efeito Doppler e medição automática de nível de água.** 2016 54 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB.

RESUMO

A Curva-chave representa uma grande ferramenta no manejo dos recursos hídricos, pois, a mesma corrobora para a gestão do uso racional da água. Este trabalho teve-se por objetivo construir as curvas-chave de vazão por meio de medições diretas e dados registrados pela Agência Nacional de Águas (ANA) em um posto fluviométrico na bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu (BHPPA). No desenvolvimento do estudo foram realizadas as seguintes etapas: coletas de dados de cota e vazão junto a ANA no banco de dados da hidroweb, bem como os mesmos parâmetros coletados junto ao Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), com isso construiu as curvas-chave usando os dados coletados. A partir dos resultados, observou-se que as metodologias usadas para proceder ao ajuste mostraram-se satisfatórias, sendo o coeficiente de determinação (R^2) entre as curvas de 0,997. A pesquisa mostrou-se de grande relevância, uma vez que foi possível avaliar o comportamento da vazão em vários níveis de cota. Permitindo o melhor dimensionamento de reservatórios na região e para melhor quantificação e alocação de água dado os múltiplos usos da água. Acarretando assim, no melhor gerenciamento de sistemas hídricos.

Palavras-chave: Ferramenta, Recursos hídricos, Vazão.

FERREIRA, V. K. O. **Construction of the river key Curve Piancó-Piranhas using the flow meter with Acoustic Doppler effect and automatic measurement of water level.** 2016 54 fls. Completion of Course Work (Graduation in Environmental Engineering) - Federal University of Campina Grande, Pombal-PB.

ABSTRACT

The Curve key is a great tool in the management of water resources, for the same supports for the management of rational use of water. This work had by objective to build the flow rating curves through direct measurements and data recorded by the National Water Agency (ANA) in a gaging station in the basin Piancó-Piranhas-Açu (BHPPA). In developing the study the following steps were taken: quota data collection and flow with the ANA in the HIDROWEB database and the same parameters collected from the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), it built the key curves using the data collected. From the results, it was observed that the methodologies used to carry out the adjustment proved satisfactory, with the coefficient for determining (R^2) from the curves of 0.997. Research has shown to be of great importance, since it was possible to evaluate the flow behavior in various quota levels. Allowing the best scaling reservoirs in the region and better quantification and allocation of water given the multiple uses of water. Thus resulting in better management of water systems.

Keywords: Tool, Water Resources, Flow.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das regiões acarreta consigo o intenso uso dos recursos hídricos, aumentando os riscos de degradação oriundos das intensas e inconsequentes atividades antrópicas. Segundo MENDES (2013), devido à escassez da água em quantidade e qualidade, muitas regiões do Brasil e do mundo, não apenas as caracterizadas como semiáridas e áridas, enfrentam problemas para atingir a sustentabilidade hídrica.

O uso deste recurso é indispensável à sobrevivência humana. Mas, com o passar do tempo, esse bem se tornou alvo de intensas preocupações e estudos quanto ao manejo desses sistemas, acarretando o surgimento de leis mais severas e punitórias. Para que isso ocorra de forma eficaz, faz-se necessário o conhecimento das variações da quantidade de água numa bacia hidrográfica, principalmente em regiões áridas e semiáridas. Com esse conhecimento, é possível estimar a capacidade de produção de água da bacia, realizar previsão de cheias, abastecimento público e industrial, navegação, irrigação, entre outras formas de uso da água.

Segundo CLARK (2002), conhecer as afluências de um corpo hídrico é necessário para futuras previsões, além de estimar a frequência de ocorrência de eventos que possam dificultar o gerenciamento deste recurso. Portanto, os dados de vazão de um rio precisam ser monitorados da melhor forma possível.

Até o início da década de 1980, às medições de descarga líquida eram realizadas de forma rudimentar e muito dispendiosa de tempo. No entanto, com as novas tecnologias, iniciou-se em 1984, ainda de forma incipiente, a prática da medição de vazão em canais, rios e estuários utilizando o efeito Doppler, os pesquisadores buscavam uma maneira mais rápida nas medições nos canais de corrente bidirecional, em que o método com molinete não era eficaz de cumprir as exigências pelo tempo demandado.

Para a quantificação e monitoramento tanto da quantidade e qualidade da água, bem como da carga de aporte de sedimento nesses rios, torna-se necessário à determinação da curva-chave, sendo indispensável para o funcionamento da mesma e qualidade dos dados.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Construir as curvas-chaves de vazão por meio de medições diretas e dados registrados pela Agência Nacional de Águas (ANA) em um posto fluviométrico na Bacia Hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu (BHPPA).

2.2 Objetivos Específicos

- Proceder ao ajuste da função matemática que representa a Curva-Chave com os dados de vazão e nível de água, medidos em seção fluviométrica usando ADCP;
- Prosseguir ao ajuste da Curva-Chave com os dados de cota e vazão obtidos no banco de dados hidrológicos da ANA (HIDROWEB);
- Realizar a análise comparativa entre as curvas-chaves.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Recursos Hídricos

Os recursos hídricos são dotados de valor econômico e indispensáveis à sobrevivência humana, são abundantes na natureza, com isso, concluiu-se que a falta de água potável era impossível de ocorrer. Então, à sociedade moderna ignorou a apreensão e o cuidado com a preservação desse recurso, fato esse, que acarretou em inúmeras situações que resultaram em contaminações do meio ambiente.

Os recursos hídricos são renováveis, mas as quantidades disponíveis a qualquer tempo ou lugar refletirão em sua disponibilidade limítrofe de seu ciclo natural. Quando gerenciados dentro desses limites, eles estabelecem uma base sustentável para o desenvolvimento. Ir além desses balizadores, ou utilizar mal o recurso por meio de padrões não sustentáveis de crescimento, pode enfraquecer o desenvolvimento, comprometer a saúde de ecossistemas e empobrecer comunidades vulneráveis (WWDR, 2015).

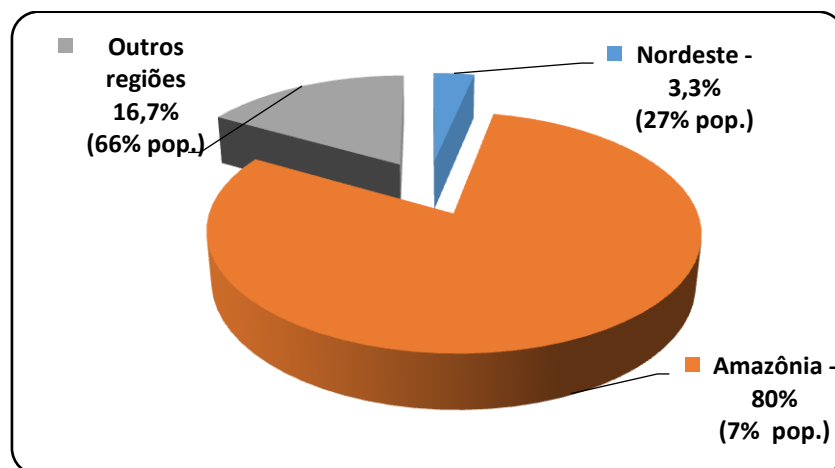
Segundo a ONU, aproximadamente 20% da população mundial não tem acesso à água potável e cerca de 40% não dispõe de água suficiente para uma estrutura adequada de saneamento básico e higiene. A disponibilidade hídrica superficial no país é de 91.300 m³/s e a vazão média equivalente a 180.000 m³/s. Em 20 anos, a quantidade média de água disponível para cada indivíduo será reduzida a um terço da atual.

Em 2050, a depender das taxas de crescimento populacional e das iniciativas políticas tomadas, para minorar a crise, pois a escassez de água afetará quase 3 bilhões de pessoas. Nos países em desenvolvimento, a demanda por água deverá crescer significativamente, em virtude do aumento populacional aliado às expansões industrial e agrícola. Os países desenvolvidos, entretanto, continuarão a apresentar maiores índices de consumo per capita (HENRIQUE, 2012).

O Brasil é o país mais rico em água doce, com 12% das reservas mundiais. Do potencial de água existente na superfície do planeta, concentra-se 18%, escoando pelos rios aproximadamente 257.790 m³/s. Apesar de apresentar uma situação aparentemente favorável, observa-se na imagem abaixo que no Brasil

existe uma enorme desigualdade regional na distribuição dos recursos hídricos (CARVALHO et al., 2007).

Figura 1: Distribuição do recurso hídrico no Brasil.



Fonte: Adaptado de CARVALHO et al., (2007)

O Nordeste é a região brasileira mais afetada pela escassez de água. A situação se agrava ainda mais, quando se trata dos mais de 8 milhões de habitantes do semiárido. Segundo LAMARCA et al. (2013), a causa da escassez de água no Nordeste reside, primeiramente, na baixa pluviosidade e irregularidade das chuvas da região, além de uma estrutura geológica que não permite acumular de maneira satisfatória água no subsolo, o que, de certa forma, interfere inclusive no volume de água existente na bacia hidrográfica da região.

As decisões que determinam as formas como os recursos hídricos são utilizados, ou mal utilizados, não são tomadas apenas pelos gestores responsáveis. Assim, o progresso em direção ao desenvolvimento sustentável requer o comprometimento de uma gama mais ampla de atores políticos no governo, na sociedade civil e no setor privado para considerar a água em suas respostas e em seus processos de tomada de decisão (WWDR, 2015).

3.2 Hidrometria

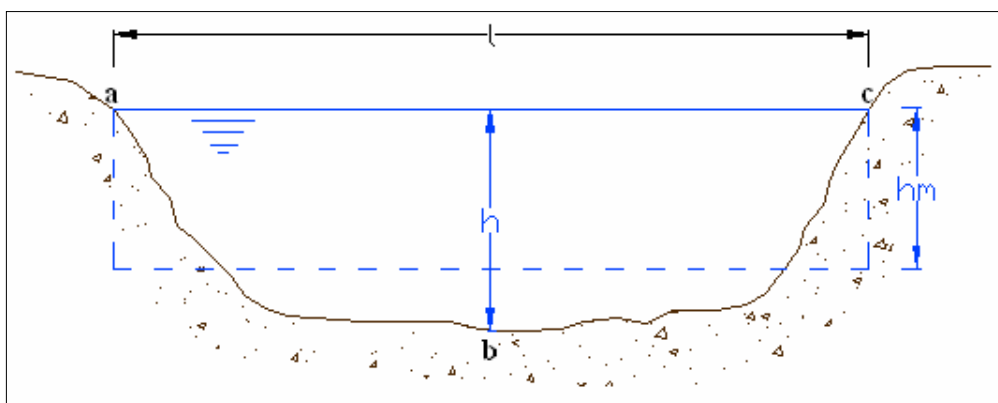
A hidrometria é a parte da hidrologia ligada à medida das variáveis hidrológicas, e tem como objetivo obter dados básicos, tais como precipitações,

níveis de água, vazões, entre outros, e a sua variação no tempo espaço (SANTOS et al., 2001). Dentro da hidrometria pode-se citar a fluviometria que abrange as medições de vazões e cotas de rios.

A fluviometria, que faz parte da hidrometria, trata das medições de vazões dos rios (SANTOS et. al., 2001). Uma estação fluviométrica se localiza em uma seção do rio, composta basicamente por réguas limnimétricas e/ou limnígrafos para medição dos níveis de água. As características geométricas da seção transversal definida pela estação variam com o nível d'água na mesma (Figura 2). Essas características são a seguir:

- Área molhada: área da seção transversal ocupada pela água;
- Perímetro molhado: comprimento da linha de contato entre a superfície molhada e o leito;
- Raio hidráulico: quociente da área molhada pelo perímetro molhado;
- Largura superficial: comprimento da linha horizontal da área molhada;
- Profundidade média: quociente da área molhada pela largura superficial.

Figura 2: Características geométricas de uma seção transversal.



Sendo: h = profundidade; h_m = profundidade média; $abca$ = área molhada;

Fonte: SANTOS et al., (2001).

3.3 ADCP

3.3.1 A Tecnologia Adcp (Acoustic Doppler Current Profiler)

A tecnologia Doppler, utilizada para medir vazões em rios originou-se da oceanografia, nas áreas de baías onde às dificuldades eram para calibração dos

medidores acústicos - AVM (Acoustic Velocity Meter) não existia um medidor rápido o suficiente para realizar a medição antes que a corrente invertesse a direção (Brasil. ANA, 2009, p. 63). A partir deste instante a sigla ADCP fará referência à Tecnologia Doppler de medição de vazão, podendo ser aplicado tanto para o equipamento da RDI (ADCP), como para o equipamento da Sontek (ADP), únicos fabricantes desses equipamentos.

O ADCP é um equipamento composto por uma sonda, com quatro transdutores (existem equipamentos com três transdutores), os modelos antigos possuem ainda um "*deck box*" (conjunto de *hardware*) que devido ao tamanho dos integrados e circuitos da época não cabiam somente no corpo do equipamento.

O equipamento emite ondas sonoras fazendo vibrar seus pequenos elementos cerâmicos ao passar por eles uma corrente elétrica. Esta onda viaja através da água em frequências pré-estabelecida (para uso em rios, 300, 600 1.200 ou 2400 kHz, para os equipamentos da RDI; e, 500, 1.000, 1.500, 3.000 e 5.000 kHz, para os equipamentos da Sontek) (RDI, 1989).

Partículas carregadas pela corrente de água, a diferentes profundidades, refletem o som de volta para o aparelho que "escuta" o eco através dos mesmos sensores chamados mono estáticos. Os equipamentos que emitem frequências menores (por exemplo: 1200 kHz) são utilizados para medições em rios menos profundos. O retorno do som refletido pelas partículas, a diferentes profundidades, faz com que os sensores do ADCP reconheçam também diferentes profundidades. Dessa forma, o equipamento constrói um perfil vertical da coluna d'água (RDI, 1989).

Segundo o RDI (1989), o processamento do sinal refletido pode ser feito de três maneiras:

1 - *Pulso Incoerente ou Narrowband*: no qual o sistema envia um pulso sonoro relativamente longo, pra então receber o reflexo deste som nas partículas carregadas na água e mede a diferença de frequência entre o sinal emitido e o recebido, esta mudança de frequência, efeito Doppler, é usado para calcular a velocidade da água.

2 - *Processamento coerente pulso a pulso*: É o mais preciso de todos e também o que possui maiores limitações, estes trabalham emitindo um pulso relativamente curto na água gravando o retorno do sinal para então transmitir o segundo pulso

quando não há mais vestígios do primeiro pulso no perfil. O sistema mede a diferença de fase entre os dois reflexos dos pulsos e usa isso para calcular o efeito Doppler.

3 - *Dispersão do Espectro ou Processamento Broadband*: Como os sistemas coerentes os sistemas *broadband* medem a diferença de fase dos retornos de sucessivos pulsos, com a diferença que aqui estarão mais de um pulso na água ao mesmo tempo, isto traz consigo um ruído maior no sinal e, por conseguinte um desvio padrão maior nas medidas de velocidade da água, em outras palavras, menor precisão.

Os sistemas da RDI utilizam os dois últimos e são definidos por comandos divididos em modos ou módulos de operação, determinados via programa de computador. A Sontek utiliza o processamento incoerente, e não necessita de mudar os modos para diferentes ambientes. Cada enfoque tem suas vantagens e desvantagens que devem ser bem analisadas por quem entende seus funcionamentos na hora de adquirir um equipamento (ANA, 2014).

À medida que o ADCP processa o sinal refletido, pelas partículas em suspensão na água, divide a coluna líquida em um número discreto de segmentos na vertical. Estes segmentos são denominados células de profundidade ou bins. O equipamento determina a velocidade e a direção de cada célula, cuja profundidade é escolhida pelo operador, e, cuja largura é função da velocidade do barco e da velocidade no processamento dos pulsos. Um perfil gasta apenas centésimos/milésimos de segundo, para ser computado pelo equipamento (ANA, 2014).

O ADCP mede a velocidade e a direção do fluxo d'água relativo a ele mesmo. Portanto, velocidade aparente, ou seja, velocidade da água mais a velocidade do barco. Entretanto, o ADCP também mede a velocidade do barco em relação ao fundo, através da função conhecida como *Bottom Tracking* (RDI, 1989). Algumas informações adicionais, igualmente relacionadas à medição da velocidade da água, são gravadas pelo ADCP, como temperatura, posicionamento, oscilações do barco, informações quanto à qualidade das medições de velocidade, intensidade da energia acústica, dados horários da medição, etc.

Através de um sensor de temperatura na extremidade dos transdutores possibilita ao equipamento a obtenção do valor da temperatura da água. Esse dado é importante, pois o cálculo da velocidade da água, e também, da profundidade são obtidos a partir da velocidade do som na água. Onde, a velocidade do som na água é resultante do coeficiente da temperatura e da salinidade. A temperatura, por sua vez, é medida diretamente; já a salinidade é um parâmetro fornecido indiretamente ao equipamento, ou seja, via teclado.

Para fornecer a velocidade "orientada" segundo as coordenadas terrestres, Norte/Sul e Leste/Oeste, o ADCP tem uma bússola interna, que afere sua orientação relativa ao campo magnético da Terra. Com isso, o equipamento pode determinar a direção do fluxo d'água e o seu movimento em relação ao fundo, e, desta forma, conseqüentemente, informar a direção do fluxo d'água. Para medir os movimentos de oscilação do barco (laterais e de popa-proa) o ADCP é dotado de sensores internos, que lhe permitem realizar correções necessárias para compensar tais movimentos. A amplitude da correlação, também é fornecida pelo equipamento, como um valor da qualidade da medição, quando da análise dos dados (RDI, 1989).

A intensidade da energia acústica refletida pelas partículas em suspensão na água também é gravada pelo ADCP. Essa informação é útil para uma avaliação qualitativa do material em suspensão na água (GUIMARÃES et. al., 1997).

3.3.2 Princípio de funcionamento Doppler

Os Perfiladores Acústicos Doppler de Correntes (ADCPs) são sonares ativos, normalmente mono-estáticos (transmissor e receptor no mesmo ponto), que utilizam a energia acústica em um feixe estreito, e o efeito doppler, para determinar a velocidade das correntes marinhas em diversas camadas (CARVALHO, 1999).

A mudança de frequência de uma fonte de som (ou luz) para um observador é proporcional à velocidade na qual a distância entre a fonte e o observador, por conseguinte aumenta ou diminui (GAMARO, 2012).

A mudança de frequência da onda sonora transmitida pelo transdutor e refletida de volta pelas partículas carregadas na água é proporcional à velocidade que a distância entre o transdutor e as partículas, também aumenta ou diminui. (GAMARO, 2012).

$$F_d = F_s * V / C \quad (\text{EQ.1})$$

Em que:

F_d = Diferença de frequência (Hz)

F_s = Frequência transmitida de uma fonte (Hz)

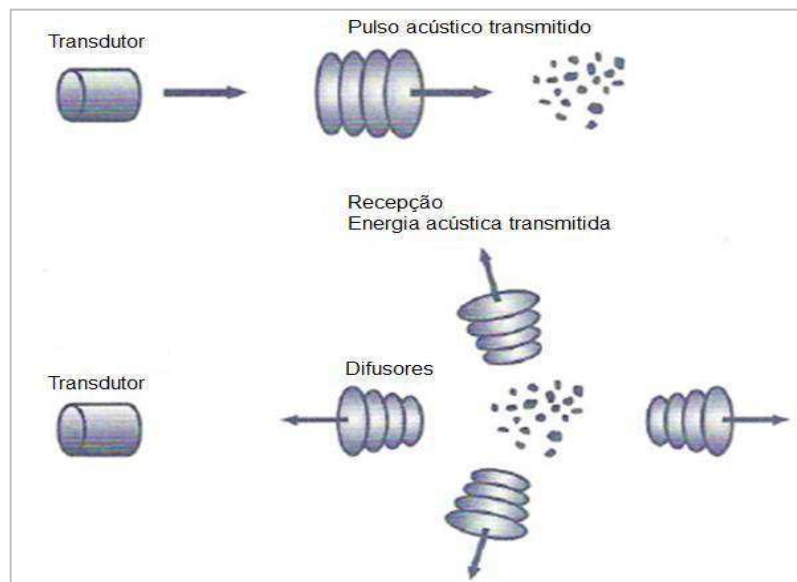
V = Velocidade relativa entre a fonte e o objeto (m/s)

C = Velocidade do som (m/s)

Segundo Gamaro (2012) como há um efeito Doppler entre transdutor/partícula e outro da partícula/transdutor, a fórmula se define em:

$$F_D = 2F_s * V / C \quad (\text{EQ. 2})$$

Figura 3: Colisão do pulso sonoro com as partículas.



Fonte: Simpson, 2001.

Apenas parte do eco refletido é lido pelo instrumento. Como o Doppler mede a velocidade radial, somente um componente da velocidade da água é utilizado.

A fórmula define-se, então:

$$F_d = 2F_s * (V / C) * \cos \theta \quad (\text{EQ.3})$$

A mudança de frequência de uma fonte de som (ou luz) para um observador é proporcional à velocidade na qual a distância entre a fonte e o observador vai aumentando (GAMARO, 2012).

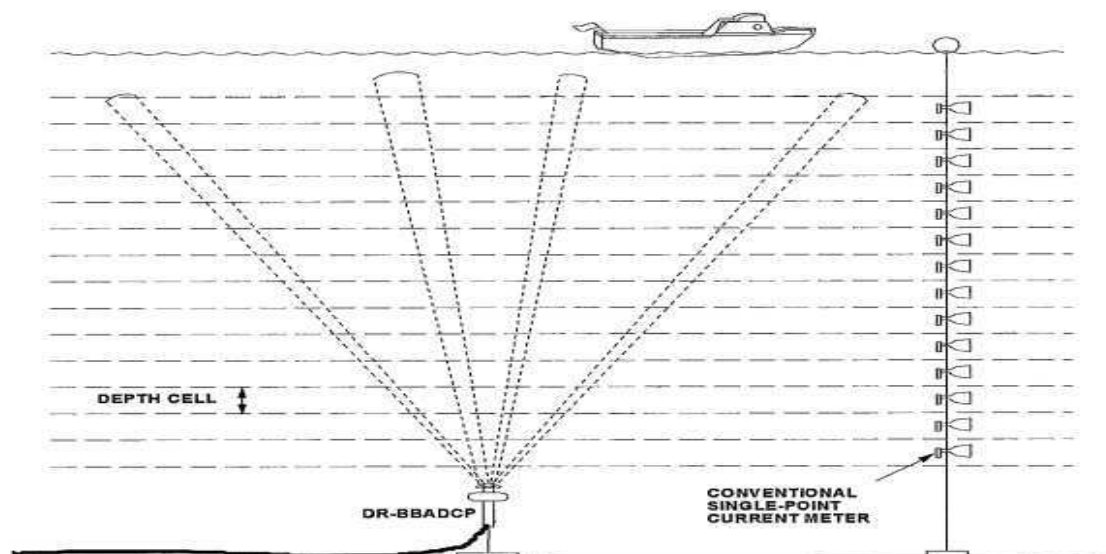
Os Perfiladores Acústicos Doppler de Correntes (ADCPs) são sonares ativos, normalmente mono-estáticos (transmissor e receptor no mesmo ponto), que utilizam a energia acústica em um feixe estreito, e o efeito doppler, para determinar a velocidade das correntes marinhas em diversas camadas (CARVALHO, 1999).

O sinal transmitido pelo sonar atinge partículas em suspensão no meio líquido acontecendo um retroespalhamento, onde a frequência do sinal original é modificada devido ao efeito doppler de valor proporcional a componente de velocidade da corrente ao longo da direção transmissor - objeto espalhador (CARVALHO, 1999).

O retroespalhamento acústico é causado pelas partículas que são imersas no meio líquido, elas possuem em média a mesma velocidade da massa d'água em movimento.

Os ADCPs são compostos basicamente de transdutores, circuitos eletrônicos de transmissão e recepção do sinal acústico, que geram, transmitem, recebem e processam o sinal extraindo a informação desejada. São alojados em um invólucro de material resistente, normalmente de forma cilíndrica. Podem comportar baterias se funcionando de forma autônoma. Os dados, após adquiridos, podem ser apresentados em tempo real (com ligação via cabo) ou não, sendo convenientemente armazenados em memória sob a forma de arquivos para posterior extração e apresentação. O ADCP funciona com três ou quatro feixes, com separação angular de 120° ou 90°, respectivamente, entre eles. Cada feixe produz um perfil de velocidade de corrente. Com três feixes, pelo menos, pode-se determinar o vetor velocidade da corrente em três dimensões. Cada célula de profundidade, regularmente espaçada, pode ser comparada a um medidor de corrente pontual, como pode ser visto na figura 04 (CARVALHO, 1999).

Figura 4: Esquema básico de um perfilador de 4 feixes.



Fonte: CARVALHO, (1999)

3.3.3 Como o Adcp mede vazão

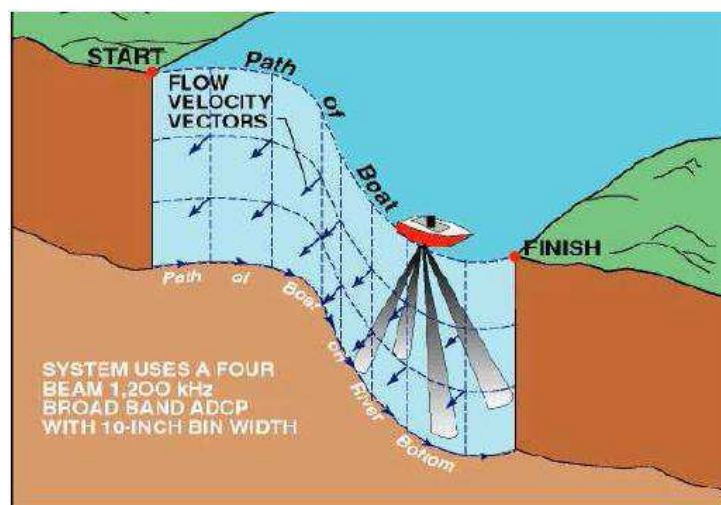
Com o uso do molinete calculamos vazão, medindo a velocidade em um plano imaginário perpendicular a corrente, medindo em um número de verticais representativas à seção (normalmente entre 20 e 25 verticais). Computamos as áreas de representatividade destas verticais e a seguir a vazão de cada uma delas. Com o somatório destas vazões obtemos a vazão total que passa pela seção em um período de tempo (GAMARO, 2012).

Com a tecnologia Doppler, passamos a ter mais medidas de velocidades na área de cada célula, e a velocidade que é mostrada na tela do computador será a média de velocidades para cada uma destas células, que terá como área o produto do tamanho do bin estipulado pelo operador, pela distância percorrida no tempo que leva para processar um ensemble. Isto quer dizer que as “larguras” das células são função da velocidade do barco e da velocidade de processamento do equipamento (sistema), aproximadamente 0,5 segundos. Logo, a medição com o ADCP pouco difere da medição com molinete, todavia é mais precisa e detalhada. Sua medição é feita em movimento, ao contrário do que ocorre nas paradas em cada vertical, por conseguinte muito mais verticais (GAMARO, 2012).

Conforme vai emitindo pulsos acústicos e medindo as velocidades, o aparelho também está realizando uma batimetria ao ir lendo o fundo. Com isto, computa as velocidades médias de cada vertical (ensemble), sua área correspondente e, logo, a vazão do segmento, que é imediatamente computada ao somatório (GAMARO, 2012).

Uma das inúmeras vantagens, como pode ser observada na Figura 05, é que seu trajeto não precisa ser perpendicular à seção (GAMARO, 2012).

Figura 5: Deslocamento da embarcação.



Fonte: USGS (2003).

3.3.4 Vantagens e desvantagens da utilização do ADCP

Embora não seja tão difundido ainda, devido ao seu custo, o método de medição de vazão utilizando o ADCP é o mais rápido e preciso. Segundo FILHO et al. (1999), o uso do ADCP se justifica em situações que dificultam a realização com os métodos tradicionais, como: grandes rios, períodos de cheia, seções descontínuas, etc.

As vantagens do uso do ADCP são: maior quantidade e qualidade de dados; maior precisão (erro da ordem de 5%); medição em tempo real; alta taxa de reprodutibilidade; mais rápido quando comparado aos métodos convencionais; pode ser usado em grandes e pequenos rios; exige menos mão-de-obra; não necessita alinhamento; corrige desvios de rota em seções descontínuas, é possível estimar o

movimento do sedimento de fundo; e boa correlação com métodos antigos (FILHO et al., 1999)

As limitações quanto ao uso do ADCP em grandes, médios e pequenos cursos d'água dependem da frequência do aparelho e da quantidade de células de profundidade que ele pode discriminar. Quanto menor for a profundidade do curso d'água, maior deve ser a frequência do instrumento. Além destas, as outras limitações são: custo exorbitante; equipamento sensível; embarcação deve ser de material que não cause interferência magnética; e dificuldades na manutenção (FILHO et al., 1999).

3.4 Curva – chave

Em uma seção transversal de um curso d'água, a relação existente entre a descarga e a cota (altura da lâmina d'água) sob a qual esta descarga escoar, é uma função muito complexa que envolve características geométricas e hidráulicas da seção considerada e do canal em que a mesma está situada (JACCON e CUDO, 1989).

A curva-chave pode ser obtida por meio da relação exponencial:

$$Q = a \cdot (H - h_0)^b \quad (\text{EQ.4})$$

Onde: Q é a vazão (m³/s); H é a altura da lâmina de água correspondente à vazão (m); h₀ é a diferença de altura entre o zero da régua e o nível de vazão nula (m); e a e b são coeficientes característicos da estação. Praticamente, os coeficientes a e b são calculados mediante regressão linear entre os valores logarítmicos lnQ e ln(H+h₀). O coeficiente a será aquele que fornecer a melhor regressão linear representado através do coeficiente de determinação R² que indica a porcentagem da variância explicada pelo ajuste da curva (JACCON e CUDO, 1989).

Para que uma curva chave seja confiável será necessária a realização de múltiplas campanhas de medições em épocas de estiagem, de águas médias e de cheias. Também é importante, que o acompanhamento das medições de vazão seja permanente, ao longo dos anos, já que modificações da seção transversal

ocasionam a não permanência da curva-chave em muitas seções (SANTOS et al. 2001 e BARNEZ, 2004).

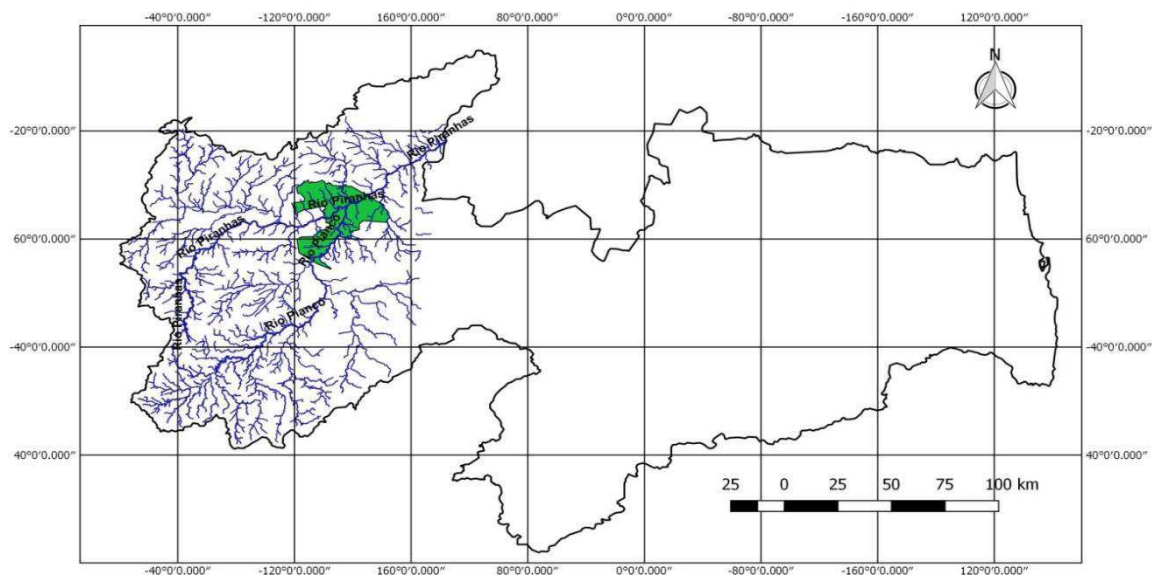
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo está baseada em três sub-bacias hidrográficas pequenas, drenadas por um corpo d'água principal, o Rio Piranhas - Açú. Sendo a bacia hidrográfica do Rio Piancó até a Barragem Mãe D'Água, bacia hidrográfica do Rio Alto Piranhas e bacia hidrográfica do Rio do Peixe. O ponto de drenagem desde as cabeceiras até a confluência das três sub-bacias e conhecida por Sitio Vassouras (37410000), Latitude -06:43:43 S, Longitude -37:47:40 W situado na BR-230, a 5 km do município de Pombal – PB, (figura 06). Esse ponto de referência drena uma área de 15.315 km².

Próximo à mesma encontra-se uma estação fluviométrica da Agência Nacional de Água – ANA, sendo operada pela Agência Executiva de Gestão das Águas - AESA do estado da Paraíba, executando medições diárias de vazões e níveis, dados que serão utilizados para o referido trabalho.

Figura 6: Localização do Rio Piancó-Piranhas.



Fonte: Autoria própria

A BHPPA (bacia hidrográfica Piancó Piranhas Açú) está totalmente inserida no clima semiárido nordestino, com extensão territorial total de drenagem de 43.681,50 Km², estando 26.183,00 Km², correspondendo a 60% da área no Estado

da Paraíba. Sendo a extensão territorial do rio Piancó - Piranhas aproximadamente 207,296 Km (LIMA, 2004).

A região hidrográfica estudada apresenta clima BSw'h' de acordo com a classificação de Koppen, quente e semiárido, com predominância de solos cristalinos e arenosos, e vegetação do tipo caatinga. Com precipitação média anual em torno de 880 mm, sendo fevereiro, março e abril os meses mais chuvosos responsáveis por 60 a 80 % da precipitação total anual. A temperatura média é de 23,4°C, com máxima em Dezembro de 35,7°C, e mínimas entre Julho e Agosto de 19,3°C. Anualmente, a umidade relativa do ar oscila entre 51% em Outubro e 74% em Abril. Já a evapotranspiração anual varia de 2.200 mm a 3.400 mm. Portanto, apresenta altos índices de déficit hídrico anualmente (LIMA, 2004).

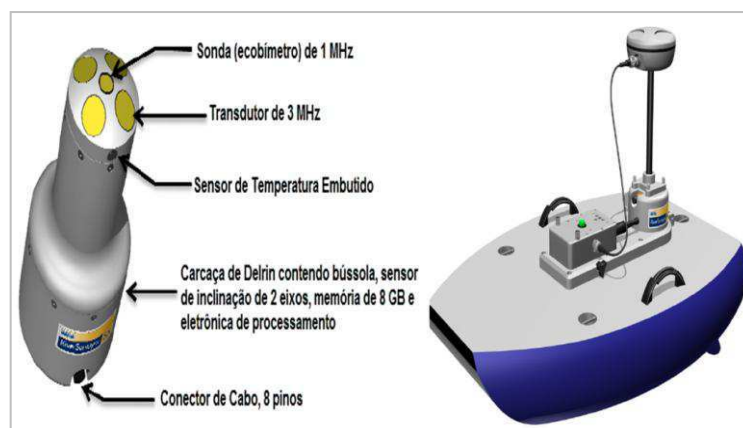
4.2 Levantamento dos dados

Segundo GARRIDO (2013) foram realizados 15 campanhas de medições no período de novembro/2012 a maio/2013, leituras do nível de água nas réguas limimétricas, medições de vazão, e durante o período chuvoso, seguindo as ocorrências de chuvas que provocasse a alteração da vazão do rio.

Para a realizações de todas as campanhas foram utilizados os instrumentos e equipamentos do Laboratório de Hidrologia do CCTA da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Pombal – PB.

Os dados de vazão foram coletados junto ao Perfilador Acústico Corrent Doppler - ADCP, modelo RiverSurveour S5 da Sontek (figura 07).

Figura 7: A DCP S5 e Prancha SonTek Hydroboard com PCM, GPS e ADP.



Fonte: Sontek, 2009.

Foi colocado um cabo graduado na secção para prender a embarcação, onde o aparelho (ADCP) foi fixado na lateral desta e conectado a um notebook onde foi instalado o software - RiverSurveyor Live fornecido pelo fabricante conforme verifica-se na figura 08 abaixo. (GARRIDO, 2013).

Figura 8: Medição de descarga líquida com o uso do ADCP do Rio Piranhas.



Fonte: Garrido, (2013).

Portanto, durante cada campanha, foram realizadas no mínimo duas travessias na seção do rio, portanto eram registrados simultaneamente: perfil de fundo ou batimetria, perfis e direções de velocidades, trajetória descrita pelo barco e outros parâmetros. O próprio software encarregava-se de registrar e processar as informações colhidas e calcular a vazão total na seção.

4.3 Aquisição de dados junto a ANA

Além dos dados medidos pelo ADCP, também foram obtidos junto à Agência Nacional das Águas – ANA no banco de dados da Hidroweb, os parâmetros vazão e nível de água, referentes ao período das campanhas realizadas por Garrido (2013). Segundo a ANA, a estação do Sítios Vassouras (cód 37410000) está situada no mesmo local das medições do ADCP, conforme verifica-se sua ficha descritiva no Anexo A3.

4.4 Extrapolação da Curva - chave

Segundo PORTO et al. (2001) no regime fluvial, a vazão se relaciona com as demais variáveis segundo a expressão abaixo:

$$Q = K \cdot A \cdot (R_h \cdot j)^{1/2} \quad (\text{EQ.5})$$

onde:

- Q: vazão;
- K: coeficiente de atrito;
- A: área molhada da seção;
- R_h : raio hidráulico;
- j: declividade do curso d'água;

Pode-se aproximar a relação vazão x cota por uma expressão exponencial conforme verifica-se na equação (6):

$$Q = a \cdot (H - h_0)^b \quad (\text{EQ.6})$$

onde:

- a, b e h_0 são parâmetros de ajuste;
- H é o nível do rio;
- Q é a vazão;

Como as cotas são tomadas com relação a um referencial arbitrário (fixado e materializado na superfície), h_0 constitui um parâmetro desconhecido, que poderia ser entendido como sendo a leitura do NA na régua para o qual a vazão é nula. Assim, h_0 pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo da posição do zero da escala com relação ao fundo do rio. É o valor para o qual a vazão calculada pela expressão seria nula (PORTO et al., 2001).

Para determinar os parâmetros de ajuste a partir dos pares (QxH), a expressão geral é linearizada, determinando-se a e b por regressão linear e h_0 por tentativa e erro (PORTO et al., 2001).

4.6 Ajuste da Curva - chave por regressão linear

Foi utilizada a Regressão Linear para o ajuste das curvas chaves no referido trabalho. Consiste na realização de análise estatística com o objetivo de verificar uma relação entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes.

Segundo SEFIONE (2002) supondo-se a estação Y, aquela onde se tem registro diário de cotas sem curva-chave e X uma estação, no mesmo rio, com registro de cotas e curva-chave traçada. A partir de dados simultâneos de leitura de réguas nas duas seções (cotograma), determina-se uma equação linear do tipo: $Y = a + bX$, onde X é leitura de régua na seção X e H é a leitura de régua na seção Y. Os coeficientes a e b são facilmente determinados pelo método dos mínimos quadrados numa planilha eletrônica. Dessa forma se obtém uma relação para calcular qualquer cota em X a partir de uma cota em Y.

Aplicando logaritmo na equação (6), temos o seguinte;

$$\log Q = \log (a \cdot (H - h_0)^b \quad (\text{EQ.7})$$

$$\log Q = \log a + \log (H - h_0)^b \quad (\text{EQ.8})$$

$$\log Q = \log a + b \log (H - h_0) \quad (\text{EQ.9})$$

A equação acima é do tipo: $Y = a + b \cdot X$

Onde: $Y = \log Q$; $A = \log a$; $X = \log (H - h_0)$.

Os parâmetros da a e b da equação da reta $Y = a + b \cdot X$ são calculados da seguinte forma:

$$b = \frac{(n \cdot \sum x \cdot y - \sum x \cdot \sum y)}{(n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2)} \quad (\text{EQ.10})$$

Sabendo que o valor de a é calculado usando o antilog na seguinte fórmula $A = \log a$, com log na base 10 ou fazendo $10^A = a$.

Segundo PETERNELLI (2010), o Coeficiente de determinação, também conhecido como R^2 , ou simplesmente r^2 para o caso de regressão linear simples, fornece uma informação auxiliar ao resultado da análise de variância da regressão (apresentado a seguir), como a maneira de se verificar se o modelo proposto é adequado ou não para descrever o fenômeno.

O R^2 é obtido por:

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQTotal}$$

O valor de R^2 varia no intervalo de 0 a 1. Valores próximos de 1 indicam que o modelo proposto é adequado para descrever o fenômeno.

4.7 Ajuste da Curva - chave usando Ferramentas Interativas

Foi utilizado também, um cálculo interativo para obter a expressão da curva-chave, observando o ajuste da curva de descarga utilizando os dois métodos, atribuindo um valor para H_0 para realizar uma regressão linear e obter as constantes a e b da expressão logarítmica. Para tanto, pode-se utilizar ferramentas interativas de planilhas eletrônicas, como o Optimizer do QuattroPro (Corel) ou Solver do Excel (Microsoft). (PORTO et al., 2001).

Empregou-se o Solver, ferramenta do Excel, para auxiliar no ajuste dos parâmetros a , b e h_0 . Neste trabalho obteremos os três parâmetros por interação, dispensando regressão linear.

Para PORTO et al. (2001), ao escolher o Solver, será atribuída as seguintes condições que conduziram os cálculos:

- Minimizar o valor da soma dos desvios (célula de destino);
- Valores de a , b e h_0 como células variáveis;
- Impor limite superior para o valor de h_0 (menor que o nível mínimo observado).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O traçado da Curva-chave não é fixado apenas na análise numérica, pois é importante fazer um balanço das principais características da estação. Cada boletim da estação é fundamental para entender o comportamento do curso d'água, pois nele há informações da natureza do leito e das margens, do seu regime de escoamento e conformação.

5.2 Ajuste da Curva-chave por interação através da ferramenta solver

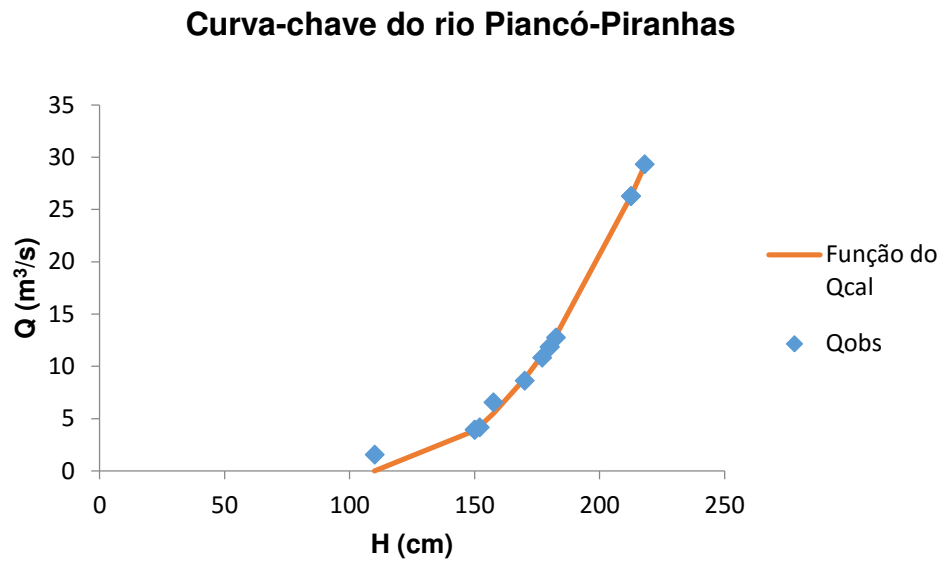
A Tabela 1 contém os valores da interação com o uso Solver, ferramenta do *Excel*, tomando por base os dados de vazão x cota observados pela Agência Nacional da Água - ANA, os mesmos foram utilizados para construção dos gráficos apresentados abaixo.

Tabela 1: Valores de vazão calculada (m^3/s) após a interação do Solver.

ANA				
H (cm)	Q_{obs} (m^3/s)	H - h_0	Q_{cal} (m^3/s)	$(Q_{cal} - Q_{obs})^2$
110	1,56	0	0	2,43
150	3,94	40	3,86	0,01
150	3,94	40	3,86	0,01
152	4,17	42	4,26	0,01
157,5	6,56	47,5	5,47	1,19
170	8,63	60	8,81	0,03
177	10,84	67	11,03	0,04
180	11,86	70	12,07	0,04
180	11,86	70	12,07	0,04
182,5	12,76	72,5	12,96	0,04
212,5	26,28	102,5	26,25	0,00
212,5	26,28	102,5	26,25	0,00
218	29,33	108	29,21	0,02
			TOTAL	3,85

A figura 09 traz a representação gráfica da curva-chave do Rio Piancó-Piranhas, com os respectivos dados de vazão calculada, bem como da vazão observada. As constantes foram obtidas a partir da minimização da soma dos desvios, diminuindo o erro entre a vazão calculada e a vazão observada.

Figura 9: Pontos obtidos junto a ANA e curva-chave calculada.



Fonte: Autoria própria.

A interação realizada através da ferramenta Solver ajustou os parâmetros, tendo como resultado:

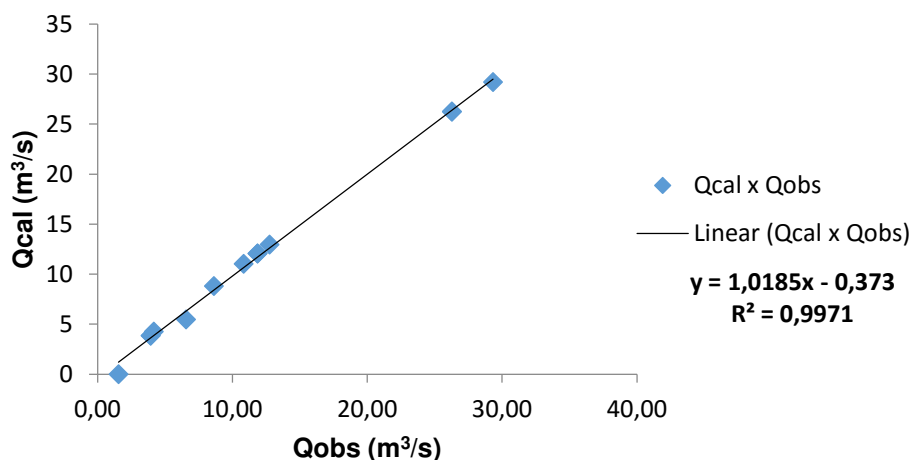
$$a = 0,0021; b = 2,04; h_0 = 110 \text{ cm} .$$

Expressão da Curva-chave:

$$Q = 0,0021 \cdot (H-110)^{2,04} \quad (\text{EQ.11})$$

Observa-se na figura 10, a relação entre a vazão calculada e a vazão observada, tomando por base os valores observados na tabela 1.

Figura 10: Relação entre a vazão calculada e a vazão observada.



Fonte: Autoria própria

Ao analisar os dados de vazão calculados com os dados reais, foi construído um gráfico para comparar a relação entre ambos. Com isso, observou-se uma excelente aproximação entre os valores, sendo o $R^2 = 0,9971$, esse resultado corrobora com o encontrado por GRISON (2008) que trabalhando com metodologia semelhante na Bacia Hidrográfica do rio Cubatão do Norte encontrou esse mesmo valor que é considerado o ótimo resultado do ajuste, podendo está associado ao fato de que a vazão observada foi obtida a partir da curva-chave disponibilizada pela ANA, pois tal procedimento se fez necessário porque não haviam dados de vazão observados disponíveis, logo com a entrada dos valores de cota na curva-chave estabelecida pela agência das águas, foi possível obter os dados de vazão necessários para tal comparação.

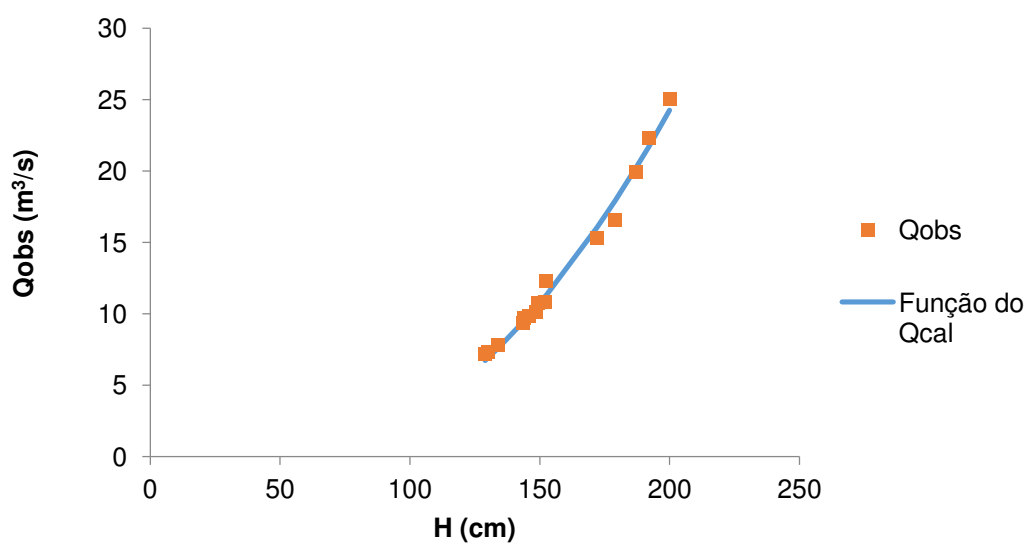
O mesmo procedimento foi feito aos dados coletados pelo ADCP, como pode-se verificar na tabela 2, no qual os valores da vazão observados foram coletados em campo através do ADCP e as cotas foram consideradas com o auxílio das réguas limnimétricas na referida estação. Os dados serviram de base para os gráficos seguintes.

Tabela 2: Valores de vazão calculada após a interação do Solver, para os dados de vazão e cota.

ADCP				
H (cm)	Qobs (m ³ /s)	H-ho	Qcal (m ³ /s)	(Qcal-Qobs) ²
129	7,18	80,45	6,73	0,20
130	7,31	81,45	6,90	0,16
134,1	7,85	85,55	7,63	0,05
143,5	9,35	94,95	9,42	0,00
144	9,68	95,45	9,52	0,03
146	9,84	97,45	9,93	0,01
148,5	10,12	99,95	10,45	0,11
149,5	10,76	100,95	10,66	0,01
152	10,86	103,45	11,21	0,12
152,5	12,3	103,95	11,32	0,97
172	15,31	123,45	16,03	0,52
179	16,57	130,45	17,92	1,84
187	19,93	138,45	20,22	0,08
192	22,33	143,45	21,73	0,36
200	25,06	151,45	24,25	0,65
			TOTAL	5,11

Pode-se observar na figura 11, o comportamento da Curva Chave com a utilização dos dados do ADCP para o cálculo de vazão.

Figura 11: Pontos obtidos pela medição junto ao ADCP e curva-chave calculada.



Fonte: Autoria própria

Para os dados observados junto ao ADCP, o Solver ajustou os parâmetros, de maneira que os valores abaixo foram obtidos.

$$a = 0,0009; b = 2,03; h_0 = 48,54 \text{ cm.}$$

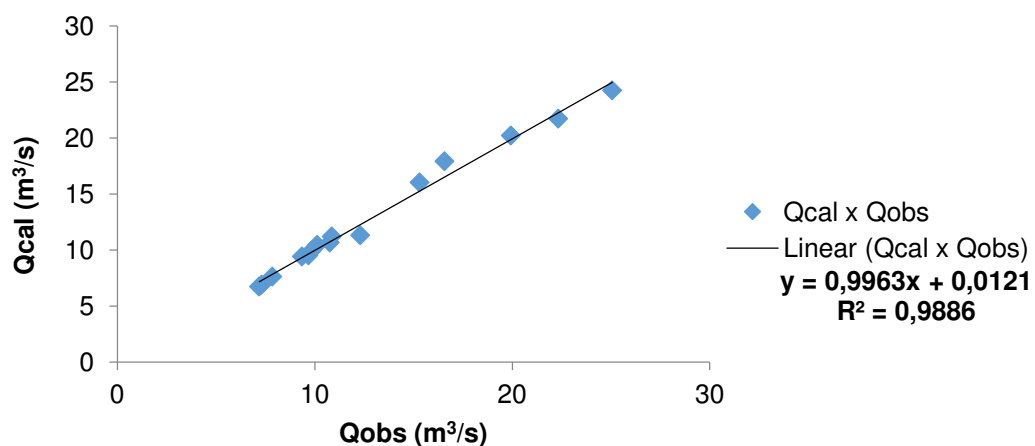
Após a interação do Solver, foram encontrados os valores dos parâmetros supracitados e conseqüentemente, obteve-se a curva-chave, expressa por:

$$Q = 0,0009 \cdot (H - 48,54)^{2,03} \quad (\text{EQ.12})$$

Para analisar a consistência no uso do Solver, também foi construído á nível de comparação, um gráfico relacionando a vazão calculada com a vazão observada com o uso do ADCP, conforme observa-se na figura 12.

GRISON (2008), em estudo semelhante afirma que essa diferença existente entre as partes altas e baixas pode ter acontecido devido a pouca quantidade de dados nas cotas altas. O que pode ter provocado a dispersão dos pontos é a mudança da seção de medição ou até de controle do canal. Ao contrário, pode-se ver que as medições do ADCP se concentram tendendo a um alinhamento. Essa tendência de alinhamento pode ter ocorrido talvez pelas medições terem sido realizadas no mesmo dia num único evento de vazão, ou por ter ocorrido pouca variação das cotas entre cada medição, o que concentrou os pontos.

Figura 12: Gráfico de comparação entre a vazão calculada e a vazão observada.



Fonte: Autoria própria

Podemos verificar no gráfico acima, uma boa relação, sendo $R^2=0,9055$, averbando ainda mais o bom funcionamento da metodologia usada.

5.2 Verificação do ajuste da Curva-chave por Regressão Linear

Na tabela 3, pode ser verificado os valores dos parâmetros a, b e h_0 , obtidos com o ajuste da regressão linear, tomando por base os valores de vazão e cota observados em campo, sendo as vazões obtidas através do ADCP e as cotas com o auxílio das réguas limnimétricas que se encontram na estação em estudo (vide Anexo A2).

Tabela 3: Valores obtidos a partir da regressão linear, tomando por base os valores de vazão e cota.

	$\log (H-h_0)$	$\log (Q_{obs})$	$(\log (H-h_0))^2$	$\log (H-h_0) \cdot \log (Q_{obs})$
	1,89	0,85	3,60	1,62
	1,90	0,86	3,62	1,64
	1,92	0,89	3,70	1,72
	1,97	0,97	3,88	1,91
	1,97	0,98	3,89	1,94
	1,98	0,99	3,92	1,96
	1,99	1,01	3,97	2,00
	1,99	1,03	3,99	2,06
	2,01	1,03	4,03	2,08
	2,01	1,08	4,04	2,19
	2,08	1,18	4,35	2,47
	2,11	1,21	4,45	2,57
	2,13	1,29	4,56	2,77
	2,15	1,34	4,63	2,90
	2,17	1,39	4,73	3,04
SOMA	30,32	16,17	61,41	32,92

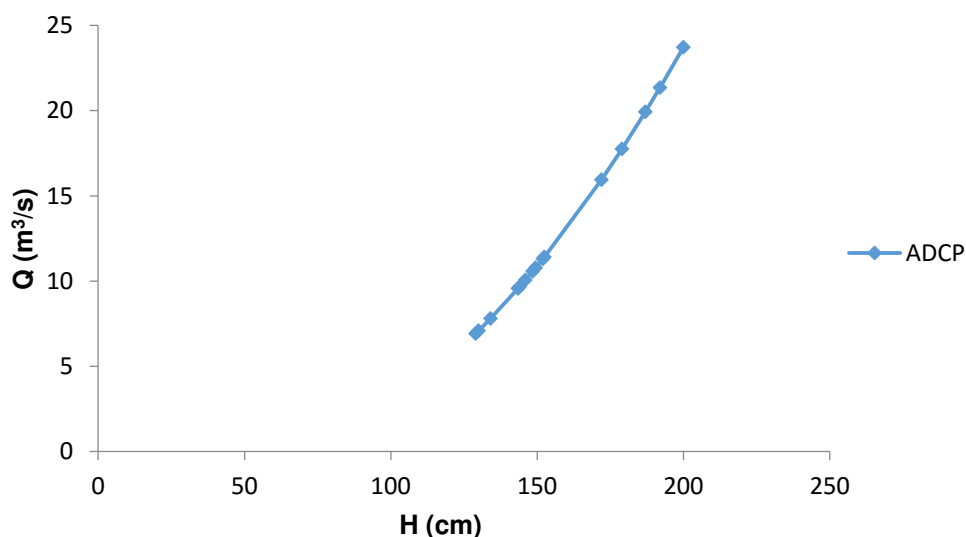
Verificam-se na tabela 4, os valores de cota, vazão observada, diferença de cota e vazão calculada a partir da curva-chave ajustada:

Tabela 4: Valores de vazões e níveis obtidos por meio da curva-chave calculada.

H (cm)	Qobs (m ³ /s)	H-h0	Qcal (m ³ /s)
129	7,18	79	6,92
130	7,31	80	7,09
134,1	7,85	84,1	7,81
143,5	9,35	93,5	9,57
144	9,68	94	9,67
146	9,84	96	10,06
148,5	10,12	98,5	10,57
149,5	10,76	99,5	10,78
152	10,86	102	11,31
152,5	12,3	102,5	11,42
172	15,31	122	15,95
179	16,57	129	17,76
187	19,93	137	19,93
192	22,33	142	21,35
200	25,06	150	23,72

De acordo com a figura 13, podemos verificar a relação entre as vazões calculadas a partir do ajuste da curva-chave através da regressão linear e os valores de cota observados em campo:

Figura13: Ajuste da curva-chave com dados do ADCP.



Fonte: Autoria própria.

Através da regressão linear, obteve-se os seguintes valores para os parâmetros de entrada da equação da curva-chave:

$$b = 1,92; a = 0,0015; h_0 = 50 \text{ cm}$$

A partir dos valores dos parâmetros supracitados foi construída a equação da curva-chave:

$$Q = 0,0015 \cdot (H - 50)^{1,92} \quad (\text{EQ.13})$$

Verifica-se na tabela 5, os valores ajustados através da regressão linear, tomando por base os valores de cota e vazão, onde a vazão foi obtida a partir do emprego da curva-chave estabelecida pela ANA, e ambos os parâmetros /estão disponíveis no banco de dados da referida agência (HidroWeb). GRISON (2008) trabalhando com essa mesma metodologia afirma que isso se deve ao fato de apesar de existirem poucas medições, mas os dados do ADCP estão muito próximos da curva, o que indica uma tendência adequada das medições.

Tabela 5: Valores ajustados através da regressão linear pelo emprego da curva-chave com os dados da ANA.

	$\log (H-h_0)$	$\log (Q_{obs})$	$(\log (H-h_0))^2$	$\log (H-h_0) \cdot \log (Q_{obs})$
	1,30	0,19	1,69	0,25
	1,77	0,59	3,16	1,05
	1,77	0,59	3,16	1,06
	1,79	0,62	3,21	1,11
	1,82	0,81	3,34	1,49
	1,90	0,93	3,62	1,78
	1,93	1,03	3,76	2,01
	1,95	1,07	3,82	2,09
	1,95	1,07	3,81	2,10
	1,96	1,10	3,86	2,17
	2,08	1,41	4,36	2,96
	2,09	1,41	4,36	2,964
	2,11	1,46	4,44	3,09
Soma	24,47	12,35	46,62	24,15

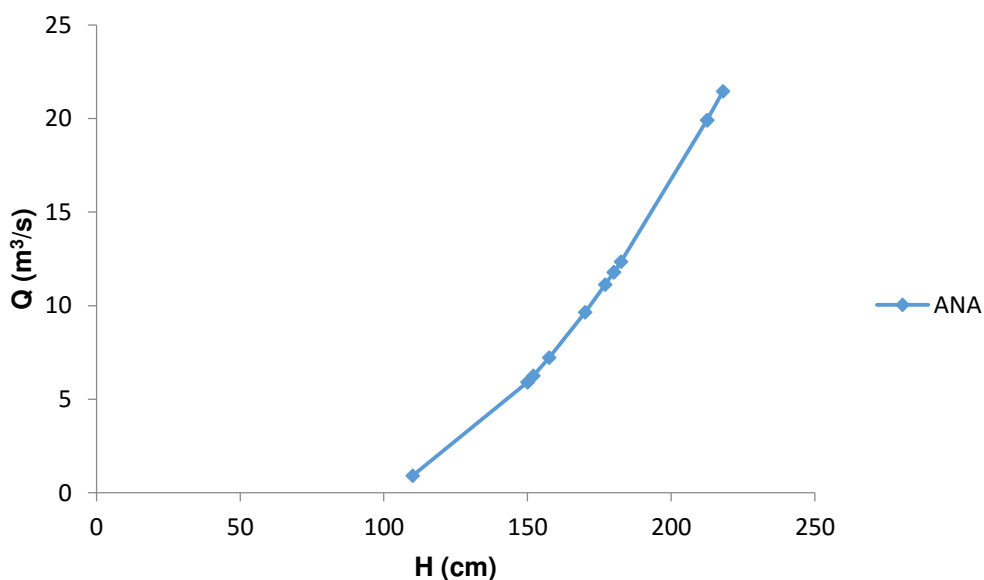
Podemos verificar na tabela 6 os valores de cota, vazão observada, diferença de cota e vazão calculada a partir da curva-chave ajustada:

Tabela 6: Valores de cota, vazão observada, diferença de cota e vazão calculada a partir da curva-chave ajustada.

H (cm)	Qobs (m ³ /s)	H-h ₀	Qcal (m ³ /s)
110	1,56	20	0,91
150	3,94	60	5,91
150	3,94	60	5,91
152	4,17	62	6,25
157,5	6,56	67,5	7,22
170	8,63	80	9,64
177	10,84	87	11,12
180	11,86	90	11,78
180	11,86	90	11,78
182,5	12,76	92,5	12,34
212,5	26,28	122,5	19,90
212,5	26,28	122,5	19,90
218	29,33	128	21,44

Observa-se na figura 14 a seguir, a relação entre as vazões calculadas a partir da curva-chave ajustada através da regressão linear:

Figura 14: Ajuste da curva-chave a partir da vazão calculada.



Fonte: Autoria própria.

Através da regressão linear, obteve-se os seguintes valores para os parâmetros de entrada da equação da curva-chave:

$$\mathbf{b = 1,7; a = 0,0055; h_0 = 90 \text{ cm}}$$

A partir dos valores dos parâmetros supracitados construiu-se a equação da curva-chave, expressa por:

$$Q = 0,0055 \cdot (H - 90)^{1,7} \quad (\text{EQ.14})$$

5.3 Comparação entre as Curvas-chaves a partir dos dados disponíveis no banco de dados da ANA e os dados observados pelo ADCP.

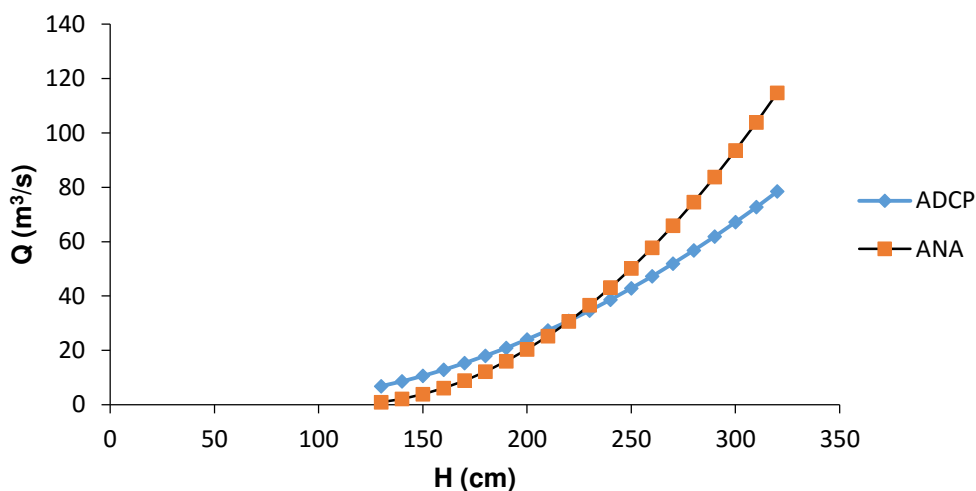
Verifica-se na tabela 7 ajuste dos parâmetros das equações das curvas-chave através da interação da ferramenta Solver para os valores obtidos no banco de dados da ANA, bem como os valores observados com o ADCP.

Tabela 7: Parâmetros a, h_0 e b ajustados a partir da interação do Solver.

Estação	Solver			Equação
	A	h_0	b	
Sítios Vassouras (37410000)				
ANA	0,0021	110	2,04	$Q = 0,0021 \cdot (H - 110)^{2,04}$
ADCP	0,0009	48,54	2,03	$Q = 0,0009 \cdot (H - 48,54)^{2,03}$

A figura 15 apresenta o comportamento das curvas-chave, tomando por base os valores obtidos através da interação da ferramenta do Solver.

Figura 15: Comparação entre as curvas-chaves usando a ferramenta Solver.



Fonte: Autoria própria.

Na figura acima, pode ser observado às curvas-chave que o comportamento hidráulico ou hidrológico da seção está bem determinado pelas duas curvas, sendo que para os valores de cotas mais baixos é onde elas se aproximam mais, ou seja, tem menos diferença entre as vazões calculadas.

Alterações geométricas na seção ou na declividade do rio gerado por erosões ou assoreamentos ao longo do tempo causam mudanças na velocidade do escoamento e nas relações entre a área, raio hidráulico e profundidade, afetando a relação cota-descarga. Portanto, a curva-chave depende de forma intrínseca das condições do escoamento no curso d'água. Segundo JACCON E CUDO (1989) é necessário, portanto, que o hidrólogo conheça bem as características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho onde esta se localiza.

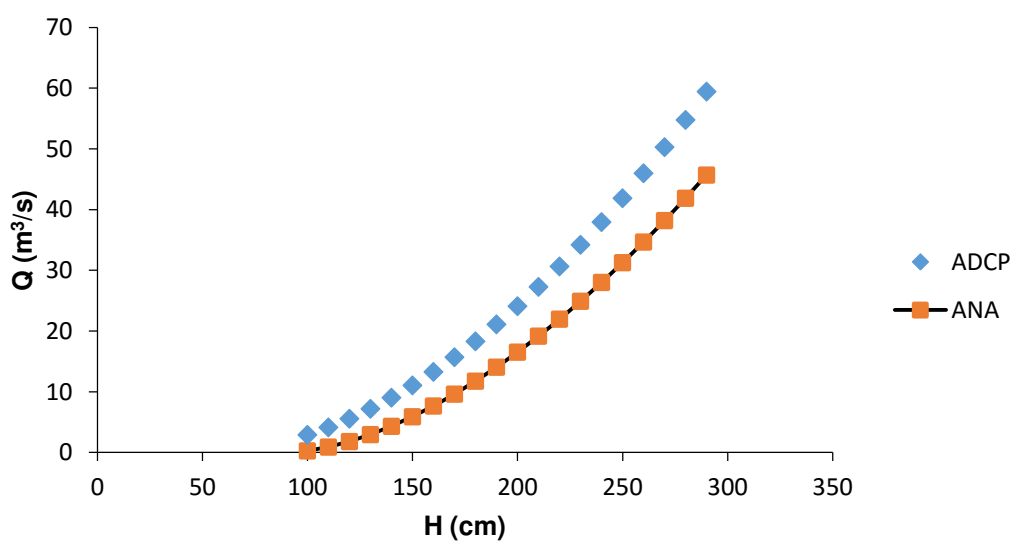
Observa-se na tabela 8 o ajuste dos parâmetros das equações das curvas-chave através da regressão linear para os valores obtidos no banco de dados da ANA, bem como os valores observados com o ADCP.

Tabela 8: Parâmetros a, h_0 e b ajustado usando a regressão linear.

Estação	Regressão Linear			Equação
	A	h_0	b	
Sítios Vassouras (37410000)				
ANA	0,0055	90	1,70	$Q = 0,0055 \cdot (H - 90)^{1,70}$
ADCP	0,0015	50	1,92	$Q = 0,0015 \cdot (H - 50)^{1,92}$

Podemos verificar na figura 16 a relação gráfica do ajuste das curvas obtidas a partir da regressão linear, com os dados adquiridos do bando de dados da ANA com os dados observados junto ao ADCP.

Figura 16: Comparação entre as curvas-chaves pelo método da regressão linear.



Fonte: Autoria própria.

Assim como no ajuste das curvas através da ferramenta Solver, o método da regressão linear também se mostrou satisfatório no ajuste das curvas. Isso pode ser comprovado através do comportamento entre as curvas, as mesmas mostraram uma tendência em seu comportamento, bem como pelo valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,997$.

6. CONCLUSÕES

O ADCP como ferramenta no traçado da curva-chave do rio Piancó Piranhas, mostrou-se uma ferramenta muito eficaz e eficiente nesse processo de construção, com alta confiabilidade. Percebeu-se que com apenas poucas medições diretas observadas, foi possível saber a curva-chave desse rio. Isso porque as medições podem ser realizadas rapidamente quando comparado aos métodos tradicionais.

As metodologias utilizadas para o traçado e ajuste das curvas-chave com os dados fornecidos pela ANA e os dados obtidos pelo ADCP mostraram-se satisfatório. Com o banco de dados utilizados nesse trabalho é muito difícil determinar qual das curvas é a melhor. As duas podem representar valores de vazões satisfatórios. É preciso mais medições nesse ponto de estudo do rio Piancó Piranhas. Mas, as curvas foram bem ajustadas, mostrando comportamentos próximos. Esses resultados comprovam a veracidade dos dados obtidos pelo ADCP quando comparados aos dados fornecidos pela ANA, o que retrata a eficiência do instrumento para realização de estudos que buscam estimar valores de vazão e nível de água.

A pesquisa mostrou-se de grande relevância, uma vez que foi possível avaliar o comportamento da vazão em vários níveis de cota. Permitindo o melhor dimensionamento de reservatórios na região e para melhor quantificação e alocação de água dado os múltiplos usos da água. Acarretando assim, no melhor gerenciamento de sistemas hídricos.

REFERÊNCIAS

AESA – **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Comitê de Bacias**. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/comites/piranhasacu/>. Acesso em: 11 de mar. 2016.

ANA - **Agência Nacional de águas (Brasil). Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico**. p. 88, Brasília: ANA; SGH, 2009.

ANA; **Agência Nacional De Águas e Ministério Do Meio Ambiente; Plano De Recursos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Rio Piranhas-Açu**. 1 ed.; Brasília – DF, 2014.

ANDRÉ, C. B. M.; ALMIR J. C.; **Geoprocessamento em Recursos Hídricos, Princípios, Integração e Aplicação**. 2 ed.; 2013.

BRUSA L.C.; CLARKE R.T.; **Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Caso de estudo: bacia do rio ibicuí-rs**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ed. 4, p. 91-102, Rio Grande do Sul, 1999.

CARVALHO, M. S.; **Investigações sobre um Perfilador Acústico (ADCP) de faixa larga**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

CBHRPPA – **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó Piranhas Acú**. Disponível em: <http://www.cbhpiancopiranhasacu.org.nr/site/a-bacia/>. Acesso em: 11 de Mar. 2016.

CLARK, R. T.; DIAS, P. L. S.; **As necessidades de observação e monitoramento dos ambientes brasileiros quanto aos recursos hídricos**. CT Hidro – Secretaria técnica do fundo setorial de recursos hídricos, 2002.

CONNOR, R., KONCAGUL, E.; **Relatório Mundial Das Nações Unidas Sobre Desenvolvimento Dos Recursos Hídricos, Relatório Água Para Um Mundo Sustentável**. Sumário Executivo, 2015.

FILHO, G. L. T.; VIANA, A. N. C.; CAETANO, G. T.; SANTOS, R. M.; **O Uso do Adcp em Pequenos e Médios Cursos D'água**. In: Grupo de trabalho sobre hidromecânica - 5ª Reunião, Montevideu – Uruguai, 1999, 10p.

GAMARO, P. E.; **Medidores Acústicos Doppler de Vazão**. Itaipu Binacional – Foz do Iguaçu, 1 ed., 21012.

GARRIDO, J. W. A.; **Transporte de Sedimentos em Suspensão e de fundo na Bacia Hidrográfica do Rio Piancó Piranhas Açu**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – PB, 2013.

GRISON, F.; **Uso do ADCP como Ferramenta de Apoio no Traçado e Extrapolação de Curva-Chave na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2008.

GUIMARÃES, V. S., FILIZOLA, N. P., OLIVEIRA, E., GUYOT, J. L. e CALLÈDE, J.; **O Uso do ADCP para medição de vazão e estimativa do fluxo de sedimentos nos grandes rios da Bacia Amazônica**. In XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória-ES, 8p, 1997.

JACCON G., CUDO, K. J.; **Hidrologia, Curva-Chave- Análise e traçado**. MME-DNAEE, 273 pp, 1989.

KOBIYAMA, M., MOTA, A. A., CORSEUIL, C. W.; **Recursos Hídricos E Saneamento**. 1ª Ed, Curitiba – PR, 2008.

LIMA, C. A. G. **Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do rio Piancó, situada no estado da Paraíba**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2004. 274 f.

LOPES, G. R.; **Estudos Hidrológicos e Hidrossedimentológicos na Bacia do córrego do Capão Comprido**; Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Brasília, Brasília – DF, 2010.

MITO, A. D.; **A utilização de um Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (ADCP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS)**. Porto Alegre, 2009.

PORTO, R. L.; FILHO, K. Z.; SILVA, R. M.; **Medição de Vazão e Curva-chave**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2001.

RDI (1989). **Acoustic Doppler current profilers. Principles of operation: a practical primer.** Publ. RDI, San Diego, 36p.

SANTOS I.; SUGAI M. R. R.; FILL H. D.; BUBA H.; KISHI R. T.; KORONE E.; LAUTERT L. F. C.; **Hidrometria Aplicada.** 1 ed; Curitiba, 2001.
SEFIONE, A. L.; **Estudo Comparativo de Métodos de Extrapolação Superior de Curvas-Chave.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SIMPSON, M. R.; **Discharge measurement using a broad-band acoustic doppler current.** United States Geological Survey – USGS, Open-file: 2001, Report 01-1.

SONTEK. **Manual do Sistema RiverSurveyor S5/M9 versão de software 1.0.** 9940 summers ridge road. San Diego, CA 92121-3091 EUA, 2009, 131 p.

ANEXOS

ANEXOS 1

Software RiverSurveyor for PC

Este software foi desenvolvido pela Sontek, é compatível com o sistema operacional Windows (Vista e XP). Este software é a interface para medição de vazão junto aos sistemas RiverSurveyor **S5** e **M9**. Inclui tudo que é necessário para realizar medições de vazão em tempo real, como também o pós-processamento dos dados (Sontek, 2009). Entre as principais funções desenvolvidas pelo programa estão: coleta de dados de vazão, bem como organizar os arquivos da memória e executar os teste de pré-medição sob o menu de utilidades, exibição do perfil de velocidade da seção, corrigindo a velocidade do barco. A figura A1 mostra o Layout do software.

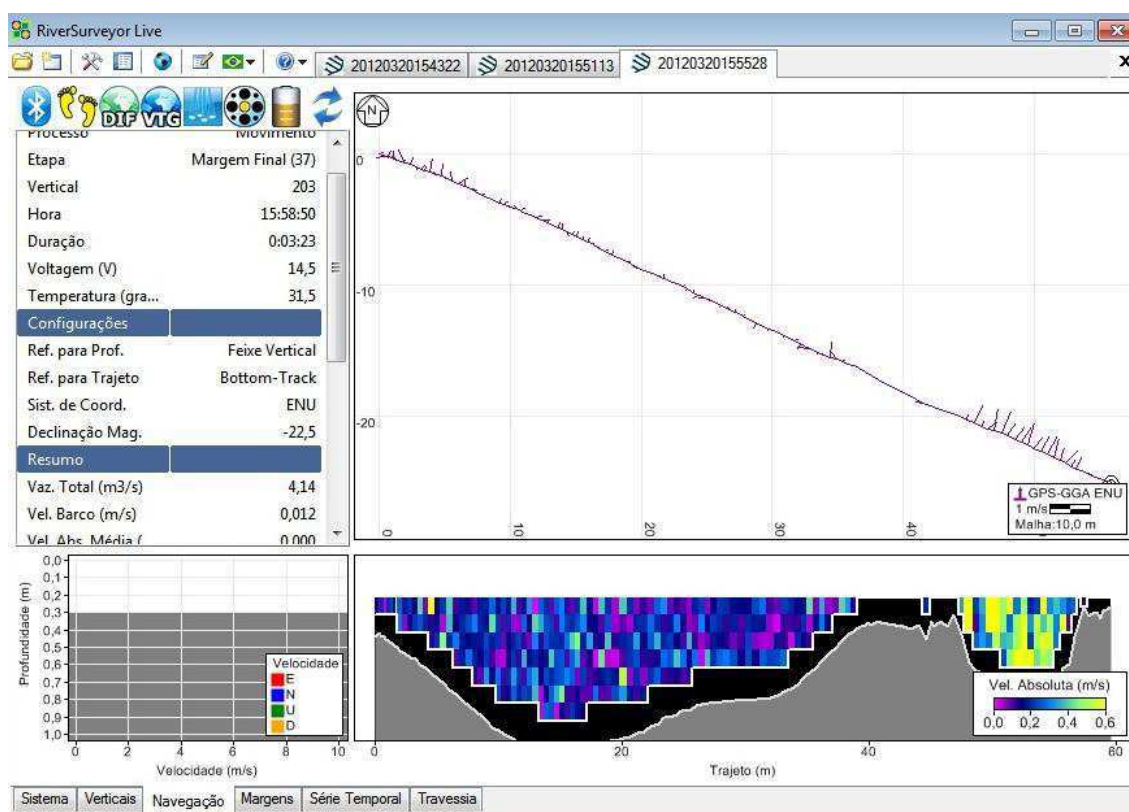


Figura A1: Layout do software.

Para realização da medição inicialmente é feita uma comunicação do ADCP com o Riversurveyor via bluetooth. Após, inicia-se uma etapa de configuração do ADCP na qual são introduzidos dados iniciais como: intervalo médio para lançamento dos pulsos acústicos, sistemas de coordenadas (ENU), declinação magnética, profundidade máxima, tamanho das células de profundidades, etc.

Também, é necessário sincronizar o programa com o horário e a data do computador. Ao iniciar a gravação dos dados é preciso informar a margem de início da medição (direita ou esquerda, olhando para jusante do rio), e a distância da margem até o ADCP quando houver no mínimo duas células de profundidade válidas (ou seja, já 37 passaram da parte com águas rasas). O cálculo da vazão total é feito após a medição (GRISON, 2008).

ANEXO 02

A figura A2 mostra a seção de réguas milimétricas, bem como o nível de referencia da estação fluviométrica do Sítios Vassouras.



Figura A2: Réguas Linimétricas da estação Sítios Vassouras. **Fonte:** Autoria própria.

ANEXO 03

Ficha descritiva da estação fluviométrica do Sítios Vassouras

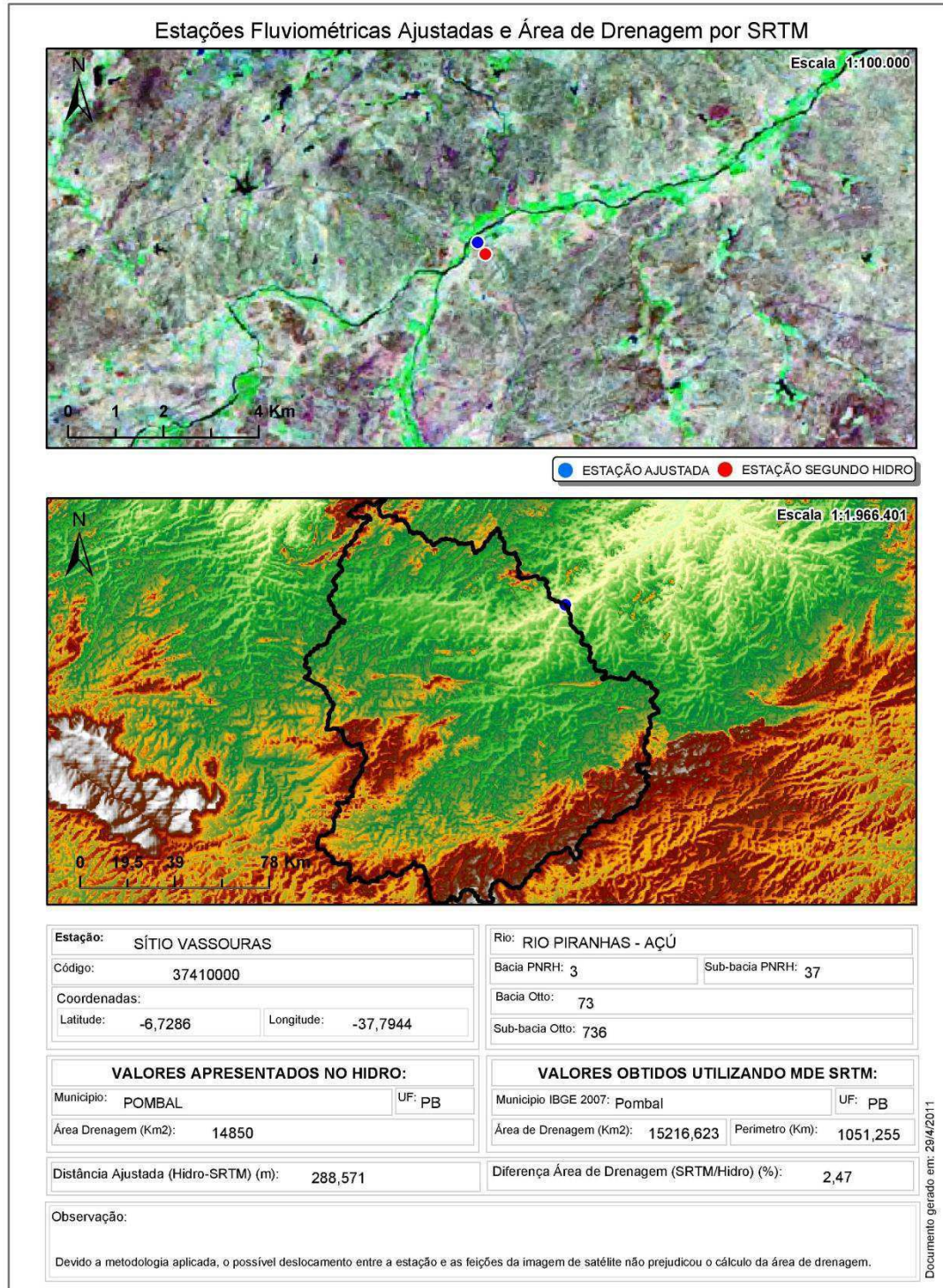


Figura A3: Ficha Descritiva. Fonte: ANA, 2016.

ANEXO 4
Tabela de dados medidos

Período	Medição	Data da campanha	H (m)	A (m ²)	L (m)	V (m s ⁻¹)	Pm (m)	Q (m ³ s ⁻¹)
Seco	1	20/11/2012	0,52	33,7	51,28	0,315	0,68	10,76
	2	26/12/2012	0,46	31,8	50,83	0,300	0,65	9,68
	3	31/01/2013	0,485	32,6	51,02	0,306	0,66	10,12
	4	28/02/2013	0,495	32,9	51,09	0,308	0,67	10,30
Chuvoso	5	19/03/2013	0,87	47,6	53,98	0,420	0,91	19,93
	6	22/03/2013	1,0	54,0	55,02	0,467	1,02	25,06
	7	26/03/2013	0,79	43,1	53,11	0,384	0,85	16,57
	8	27/03/2013	0,72	41,1	52,80	0,371	0,81	15,31
	9	28/03/2013	0,92	50,5	54,54	0,442	0,95	22,33
	10	30/03/2013	0,525	33,9	51,32	0,316	0,69	10,86
	11	02/04/2013	0,341	28,3	49,95	0,272	0,59	7,85
	12	10/04/2013	0,29	26,9	49,58	0,260	0,56	7,18
	13	15/04/2013	0,3	27,2	49,65	0,263	0,57	7,31
	14	25/04/2013	0,44	31,2	50,68	0,295	0,64	9,35
	15	14/05/2013	0,435	32	50,78	0,308	0,66	9,84
Valor médio			0,57	36,46	51,71	0,34	0,73	12,87

Fonte: GARRIDO, 2013.

ANEXO 5

Tabela de Dados validados pela Ana

Data	H (cm)	Q (m ³ /s)
20/11/2012	158	13,9203
26/12/2012	152,5	11,9141
31/01/2013	150	3,9383
28/02/2013	150	3,9383
19/03/2013	177	10,8351
22/03/2013	218	29,3304
26/03/2013	170	8,6297
27/03/2013	212,5	26,2812
28/03/2013	212,5	26,2812
30/03/2013	180	11,8631
02/04/2013	157,5	6,5629
10/04/2013	180	11,8631
15/04/2013	152	4,1721
25/04/2013	182,5	12,7581
14/05/2013	110	1,5578

Fonte: ANA, 2016 (HIDROWEB).