



PERÚ

Ministerio
de Agricultura

Autoridad Nacional
del Agua

Dirección de Conservación
y Planeamiento de Recursos Hídricos

TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE DESCARGA LÍQUIDA EN GRANDES RÍOS



Néstor Emilio Choquehuanca Solorzano

nchoquehuanca@ana.gob.pe

Lima, 26 de octubre del 2012



Autoridad Nacional del Agua

La tecnología de medición del caudal de grandes ríos ha mejorado a lo largo de los años, ampliando una gama de posibilidades en la evaluación comparativa de grandes caudales en diferentes localidades con respecto a las variables ambientales y adversidades logísticas intrínsecas a cada método desarrollado para la obtención de los resultados cada vez más precisos.

En el curso se desarrollo y comparo tres métodos para la determinación del caudal del Río Solimões a la altura del municipio de Manacapuru, con el objetivo de intercambio y formación de las técnicas utilizadas por la Agencia Nacional de Aguas (ANA-Brasil) en asociación con la Compañía de Investigación de Recursos Minerales y Servicios Geológicos de Brasil.



Objetivo Principal:

El objetivo principal del curso fue la determinación de la descarga líquida en grandes ríos, mediante diferentes técnicas de medición.

Objetivos Específicos:

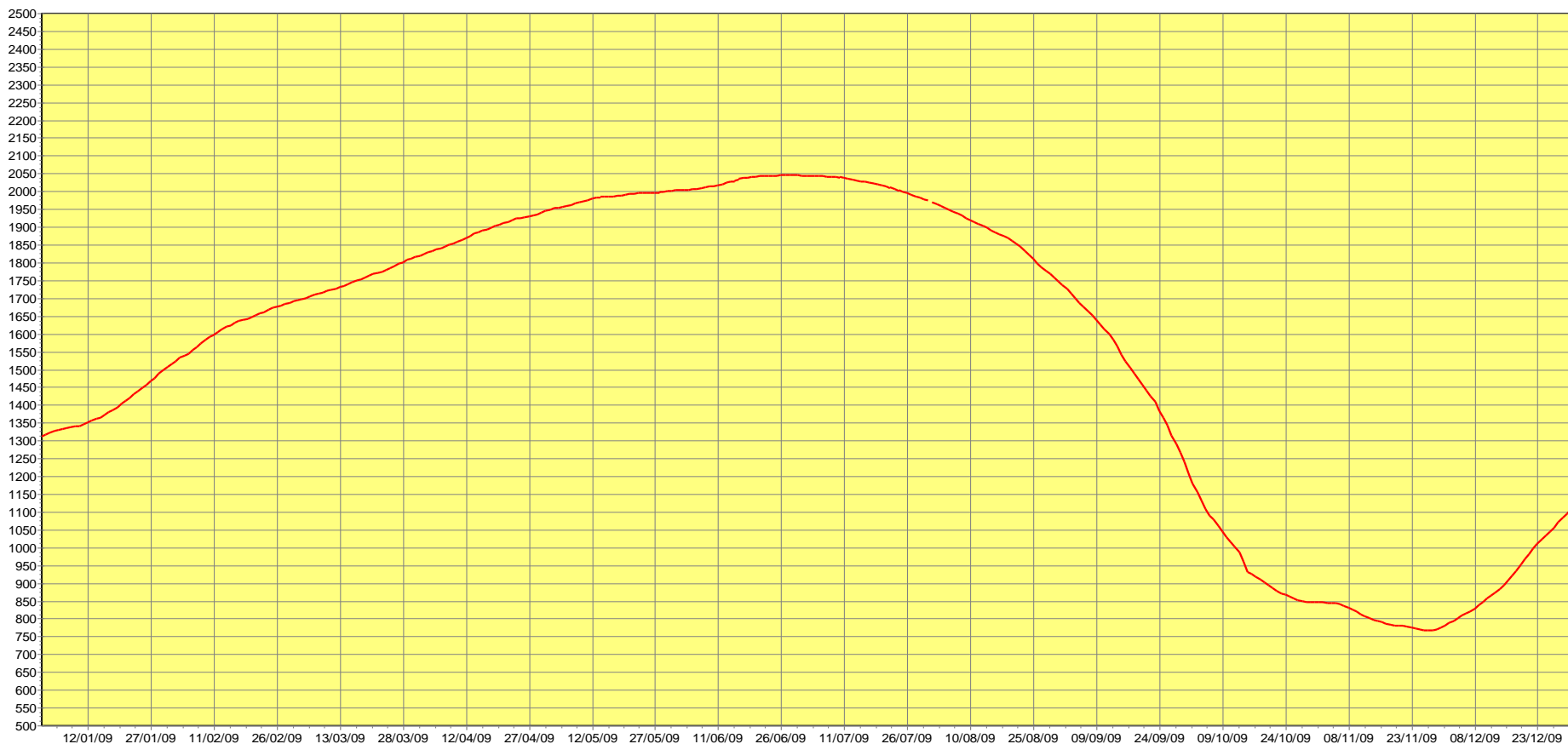
- Evaluar los diferentes métodos de medición de caudales.
- Evaluar las bondades y limitaciones de cada una de las técnicas aplicadas.

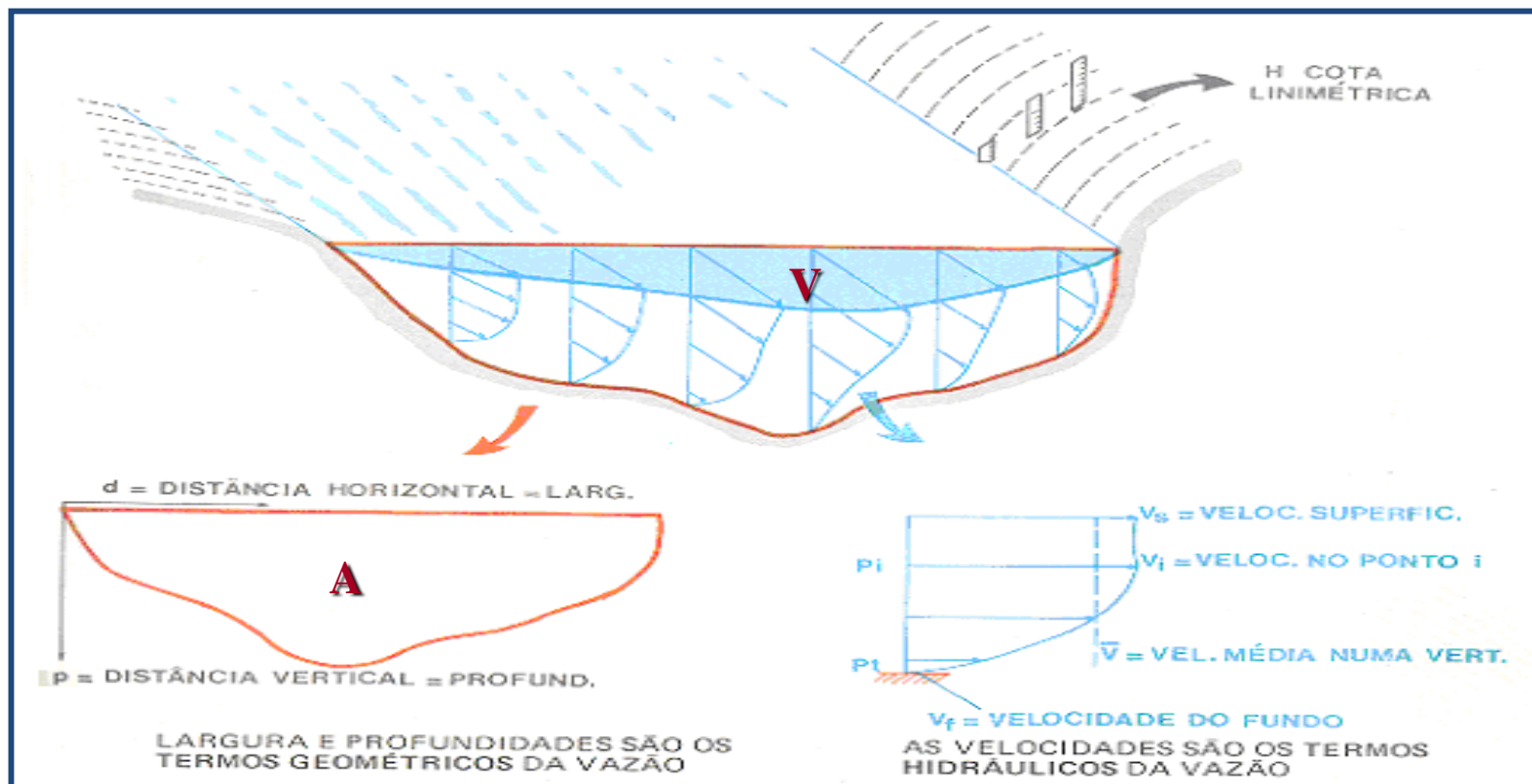




Período de 01/01/2009 a 31/12/2009

Rio Solimões en Manacapuru





$$Q = A \times V$$

$$Q = \text{Caudal (m}^3/\text{s)}$$

$$A = \text{Área mojada (m}^2\text{)}$$

$$V = \text{Velocidade media de escurrimiento (m/s)}$$

MEDICIÓN DE VELOCIDAD CON MOLINETE HIDROMÉTRICO

$$V = a \cdot N + b$$

Donde,

V = velocidad de la corriente (flujo)

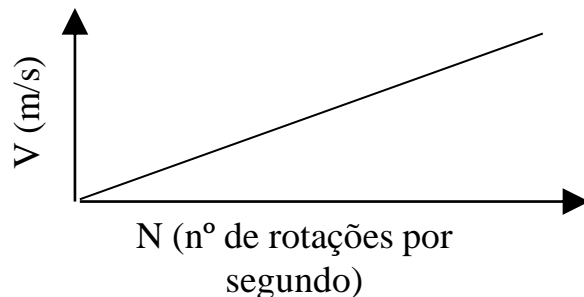
a = constante del molinete (representa o passo da hélice del molinete)

$N = n/t$, donde:

n = número de rotaciones de la hélice y t = tiempo en que se produjeron las rotaciones

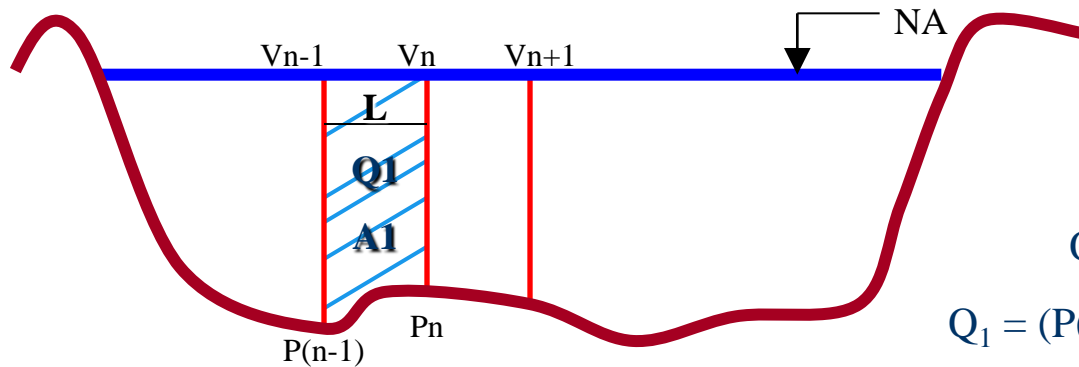
b = constante del molinete (representa la inercia del molinete)

OBS.: LA ECUACIÓN ES DETERMINADA MEDIANTE MEDICIÓN EN CANAL.



OBS.: Contadores digitales miden las rotaciones en una unidad de tiempo.

Método de la “Sección Media”



$$Q \text{ TOTAL} = \Sigma Q \text{ SECTOR}$$

$$Q_1 = A_1 \times V_m$$

$$Q_1 = A_1 \times (V_m(n-1) + V_m(n))/2$$

$$Q_1 = (P(n-1) + P(n)) \times L \times (V_m(n-1) + V_m(n))/2$$

donde:

Q_1 = caudal del sector 1 (m^3/s)

A_1 = área molhada do setor 1 (m^2)

V_m = velocidade média no setor (m/s)

$V_m(n-1)$ = velocidade média na vertical (n-1) (m/s)

$V_m(n)$ = velocidade média na vertical (n) (m/s)

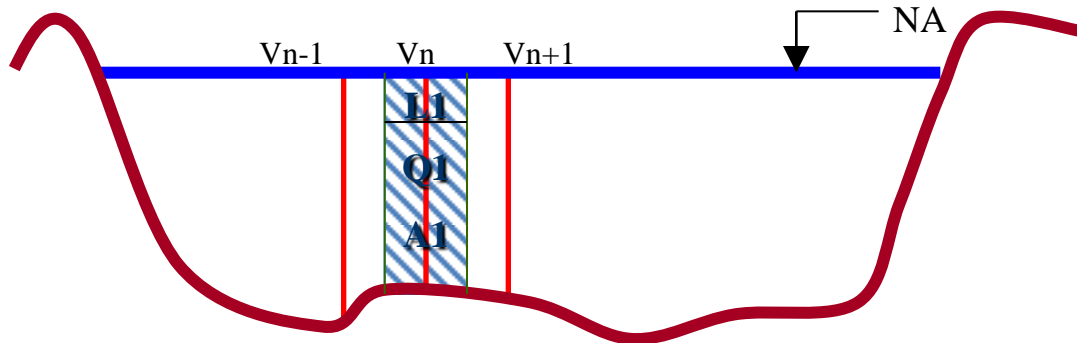
$V_m(n+1)$ = velocidade média na vertical (n+1) (m/s)

$P(n-1)$ = profundidad da vertical (n-1) (m)

$P(n)$ = profundidad da vertical (n) (m)

L = largura do setor (m)

Método de la “Media Sección”



$$Q_{\text{TOTAL}} = \sum Q_{\text{SECTOR}}$$

$$Q_1 = A_1 \times V_m(n)$$

$$Q_1 = P(n) \times L_1 \times V_m(n)$$

como:

~~$$L_1 = (\text{Abscissa}(n) - \text{Abscissa}(n-1))/2 + (\text{Abscissa}(n+1) - \text{Abscissa}(n))/2$$~~

$$L_1 = (\text{Abscissa}(n+1) - \text{Abscissa}(n-1))/2$$

luego:

$$Q_1 = P(n) \times (\text{Abscissa}(n+1) - \text{Abscissa}(n-1))/2 \times V_m(n)$$

donde:

Q_1 = vazão do setor 1 (m³/s)

$P(n)$ = profundidade da vertical (n) (m)

Abscissa (n+1) = Distância do PI até a vertical (n+1) (m)

Abscissa (n-1) = Distância do PI até a vertical (n-1) (m)

Abscissa (n) = Distância do PI até a vertical (n) (m)

$V_m(n)$ = velocidade média na vertical n (m/s)

EMBARCACIÓN DE MEDICIÓN



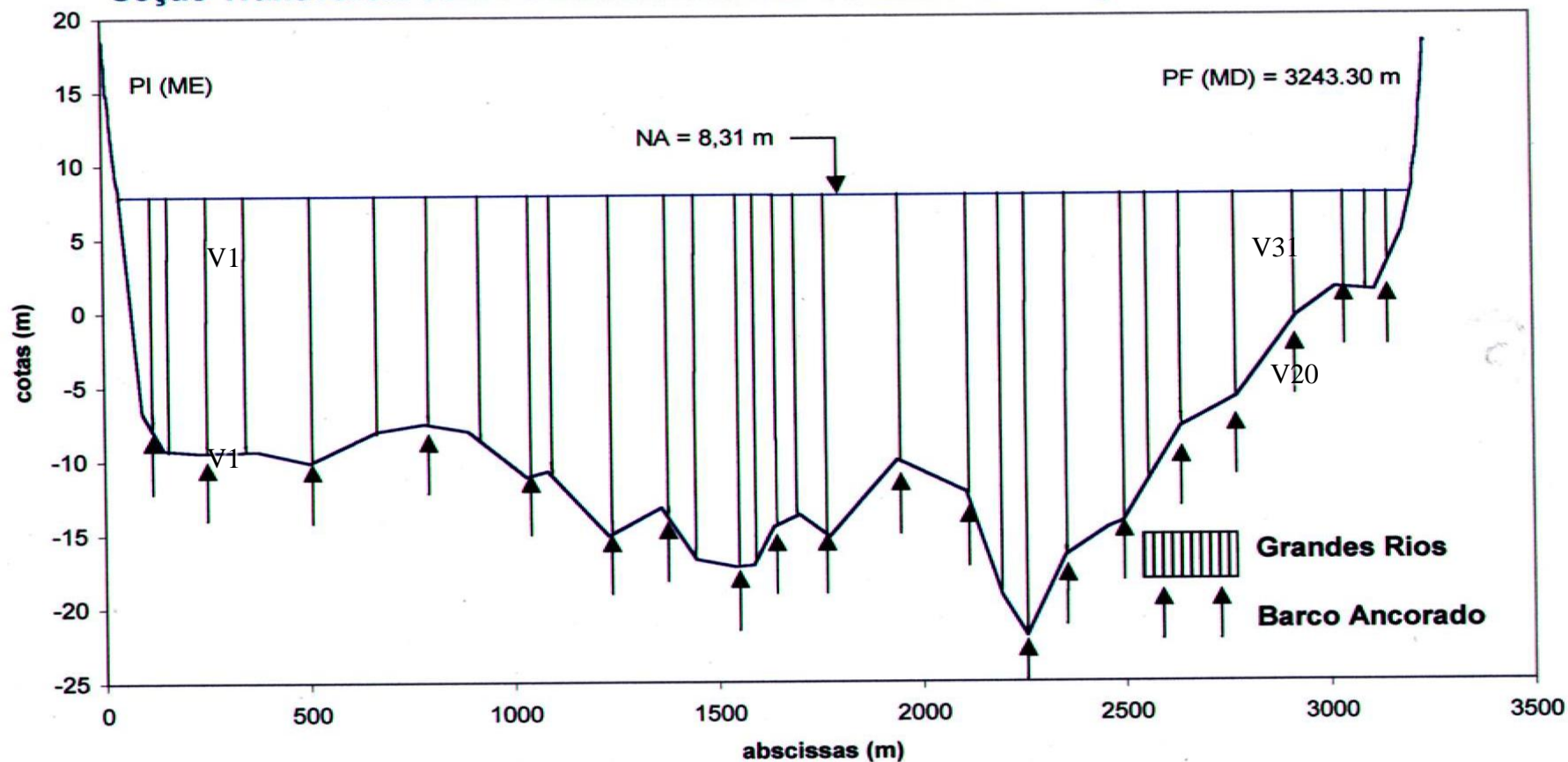
(MEDICIÓN DE PROFUNDIDADES)



Sección Transversal con Posicionamiento de las Verticales de Medición

RIO SOLIMÕES em Manacapuru (16/11/2001)

Seção Transversal com Posicionamento de Verticais de Medição



POSICIONAMIENTO DE EMBARCACIÓN



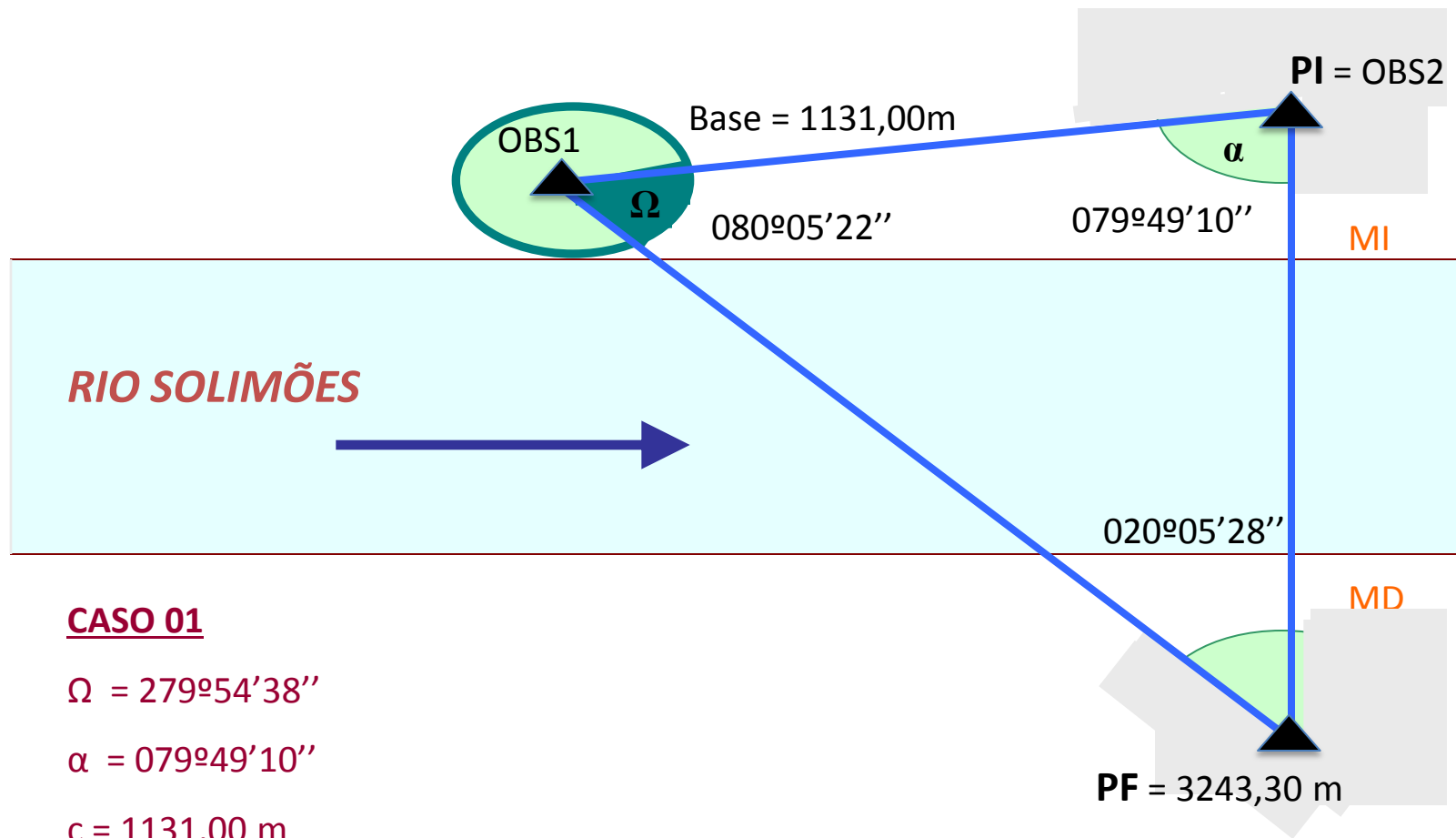
Equipamiento topográfico para triangulación entre los observadores en tierra y el barco en movimiento o anclado.



Uso de GPS diferencial para disminuir los errores de medición.



Rio Solimões en MANACAPURU



CASO 01

$$\Omega = 279^{\circ}54'38''$$

$$\alpha = 079^{\circ}49'10''$$

$$c = 1131,00 \text{ m}$$

$$M = 0,00 \text{ m}$$

$$PI - PF = 3.243,30 \text{ m}$$

1. Zona de Medición
2. Equipamiento Hidrometeorológico
3. Métodos de Medición de Caudales
4. Análisis y Resultados
5. Conclusiones



1. ZONA DE MEDICIÓN







2.

EQUIPAMIENTO HIDROMETEOROLÓGICO



Visita a las estaciones meteorológicas



Formas de medición y control de niveles del río



Control de nivel de
máximas

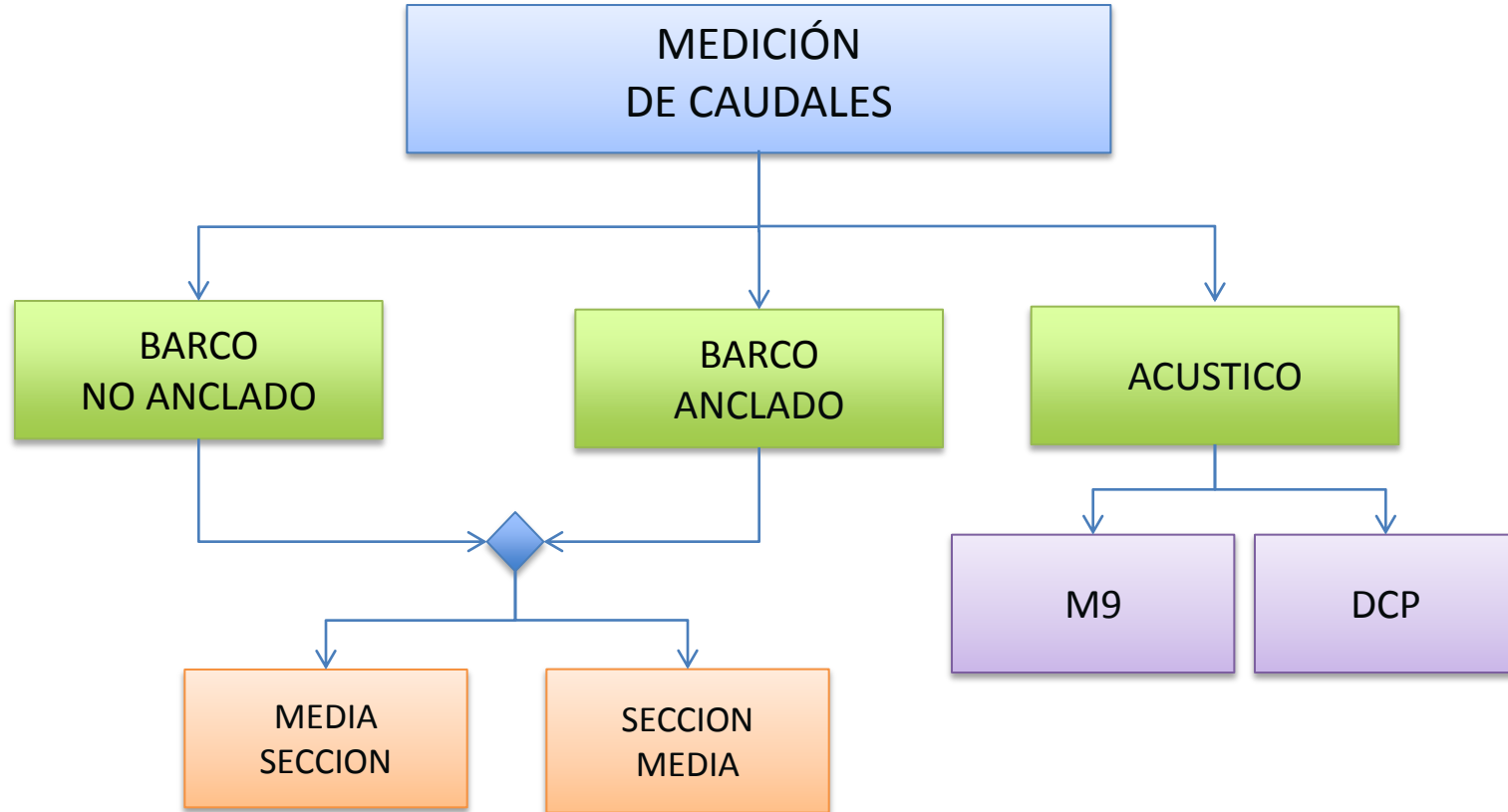


Sensor ultra-sónico

3.

METODOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES



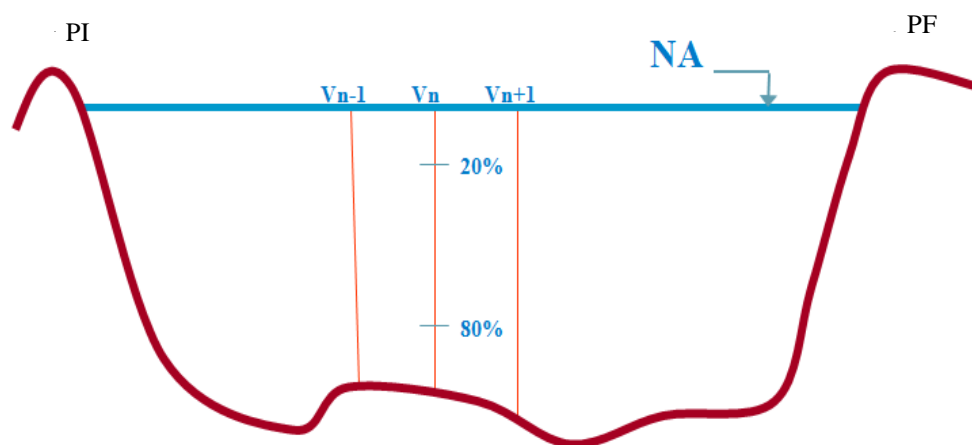


3.1 Método

“Grandes Ríos” - Barco No Anclado

Este método tiene como base la medición de la velocidad media en 32 verticales sucesivas definidas en el transecto perpendicular al río, mediante el uso de un molinete.

Mantenido en las proximidades de la posición vertical por la acción del motor, con la embarcación colocada contra el flujo de la corriente y guiado por los operadores de teodolitos. **Número mayor de verticales, con menor tiempo de operación y riesgo inferior.**



El registro de velocidades fue determinado en dos posiciones por cada vertical, correspondientes al 20% y 80% de la profundidad total.

Continúa...

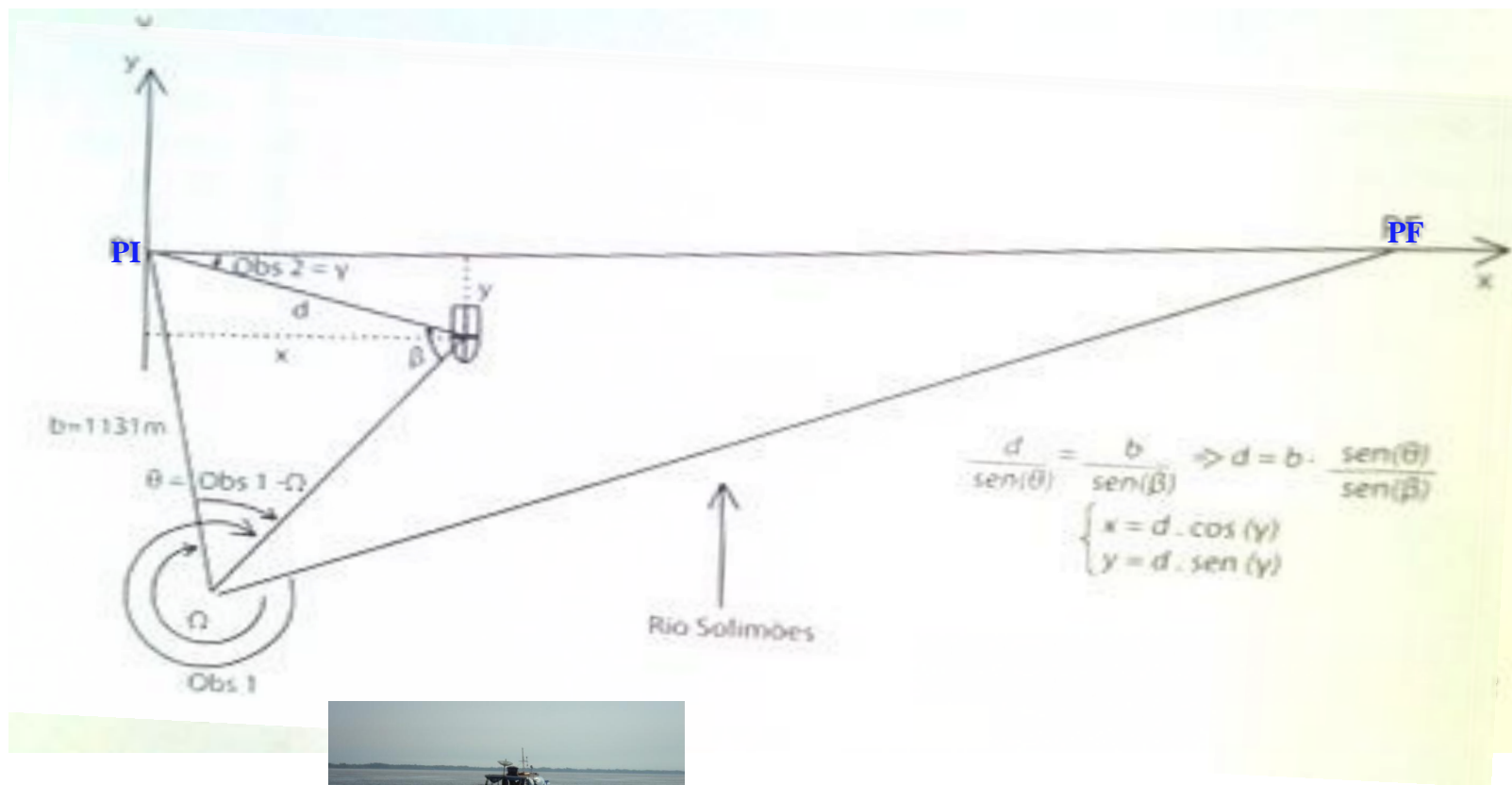


3.1 Método

“Grandes Ríos” - Barco No Anclado

...Sigue

Para obtener de la posición real de la embarcación en el momento de la toma de datos es necesario realizar una triangulación entre los observadores en los puntos PI y PF ubicados en ambas margenes del río con un tercer observador que mide el ángulo de desplazamiento del barco, determinandose la ubicación del barco en la vertical deseada.

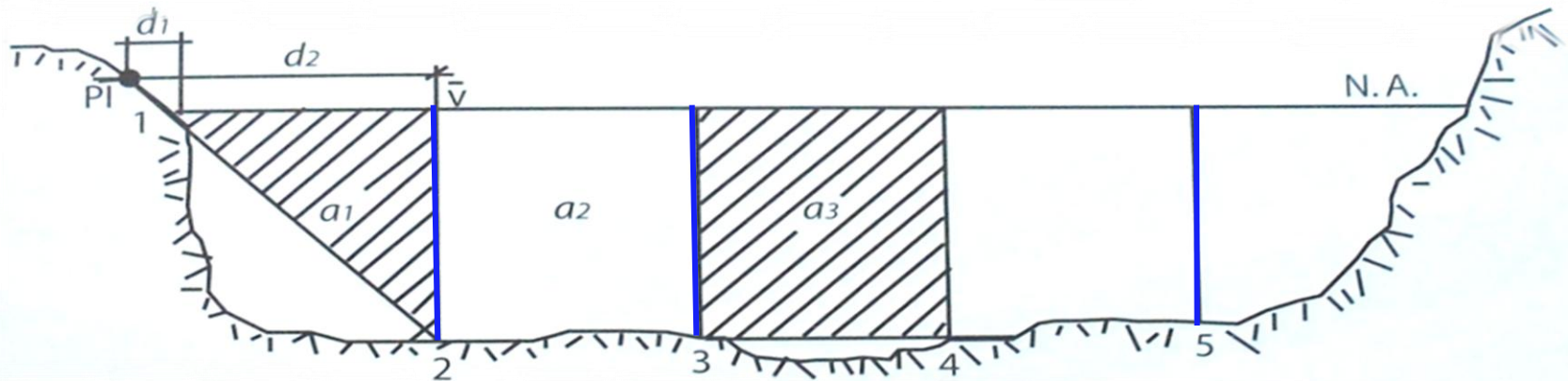


3.1 Método

“Grandes Ríos” - Barco No Anclado

...Sigue

El caudal total de esta sección se determina mediante la suma de del resultado de la multiplicación de cada área (“media sección” o “sección media”) por la velocidad media de cada vertical.



“Este método es adecuado para grandes ríos que presenten dificultades de anclaje de la embarcación o riesgos en la operación”.

Similar al método de medición de grandes ríos, esta técnica se basa en la medición de velocidad a lo largo de la vertical, por aproximadamente 40seg, en cada posición. Menor número de verticales a lo largo de la sección de medición, debido al largo tiempo de la operación.



Observándose la batimetría y el delineamiento del lecho del río para una selección de la mejor representatividad de las diversas velocidades influenciadas por la forma del lecho.

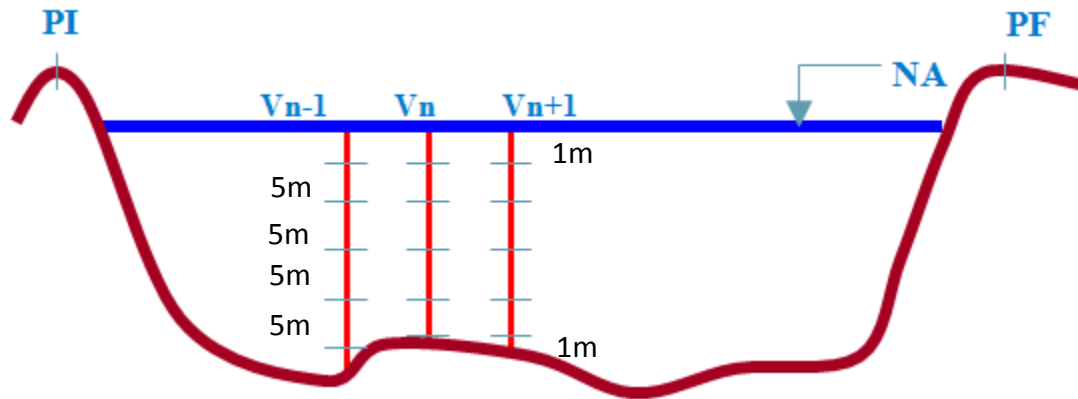


La precisión de la ubicación real de la embarcación en el momento de las mediciones es determinada mediante una **triangulación con observadores fijos** en las margenes del río. Además, del **anclaje de la embarcación en la posición deseada**.

3.2 Método Barco Anclado

...Sigue

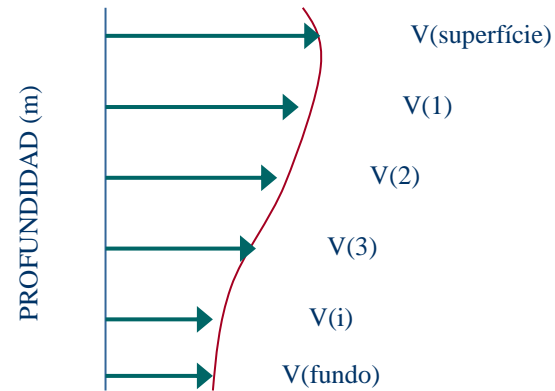
En este caso, se determino la velocidad media de 20 verticales. La toma de velocidades en cada vertical se realizó a intervalos de cinco metros de profundidad.



3.2 Método Barco Anclado

...Sigue

Adicionalmente es realizada la toma de velocidad integrada, elevándose el molinete, el cual registra la velocidad a lo largo del recorrido vertical.



“Este método permite obtener resultados con buena precisión. Además de la posibilidad de verificación del régimen del río en cada sección de medición”.

3.3 Método

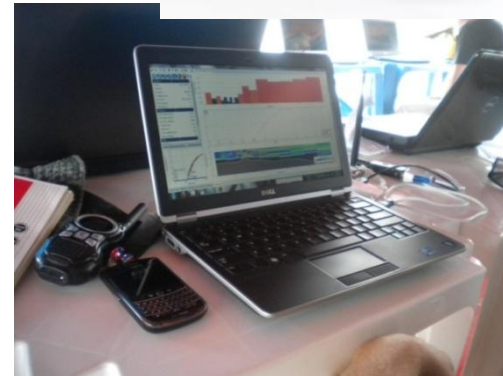
Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

Este método de medición de caudales utiliza la tecnología doppler para medición de caudal. Se utilizarán dos equipos el M9 compuesto por una sonda con 9 transductores y el ADCP con 4 transductores que emiten señales eletromagnéticas y son capaces de identificar variaciones en las frecuencias de las señales cuando retornan a los sensores.

M9



ADCP



Continua...

3.3 Método

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

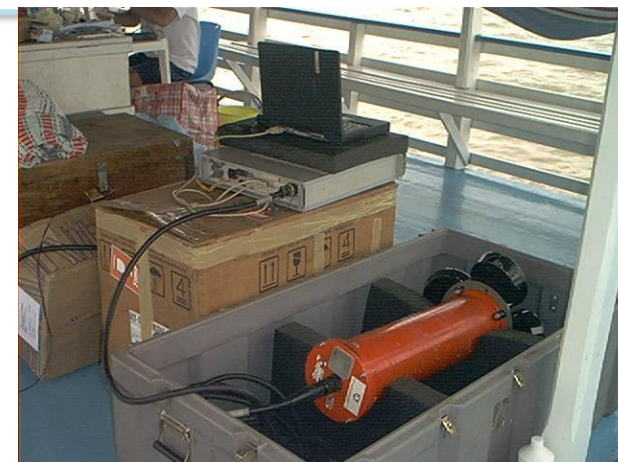
Equipamiento para medición en ríos



WH Rio Grande



WH Monitor



BroadBand

O WH Rio Grande (1200 kHz) vem com nova cerâmica, novo modo de operação 12 (1-255 células), BM7 (*ZedHead*), faixa de 0.3 – 20 m, *zero blanking* e *fast ping rate*

Channel Master H-ADCP



Alcance horiz. de 1 a 300 m

Stream-Pro (arroyos)

Profundidades de 0,15 a 2 m



<http://www.sontek.com/>

3.3 Método

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

Equipamiento para medición en ríos



Min. cell size	2cm
Max. cell size	10cm
Max. range	Prof. Máx. → 2m
1st cell start	7-30cm

Electronics housing: 15 x 20 x 10cm

Transducer: 3.5cm diam. x 15cm length

Float: 44 x 70 x 11cm

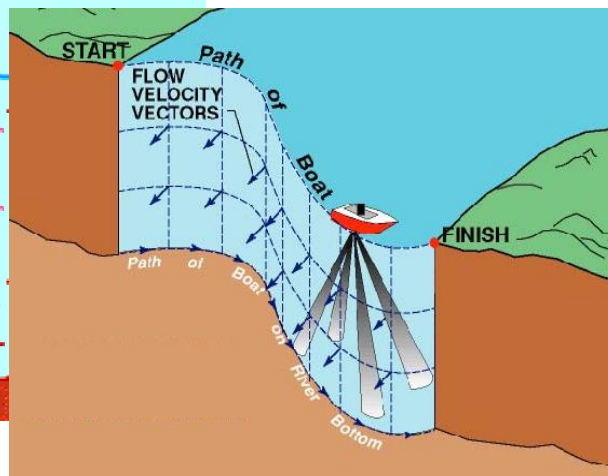
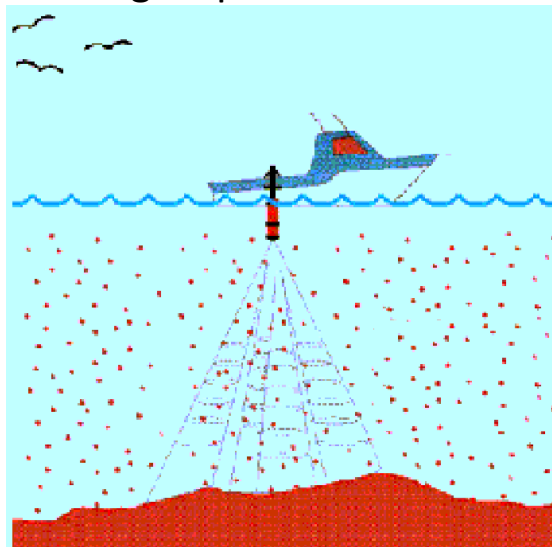
Continua...

3.3 Método

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

...Sigue

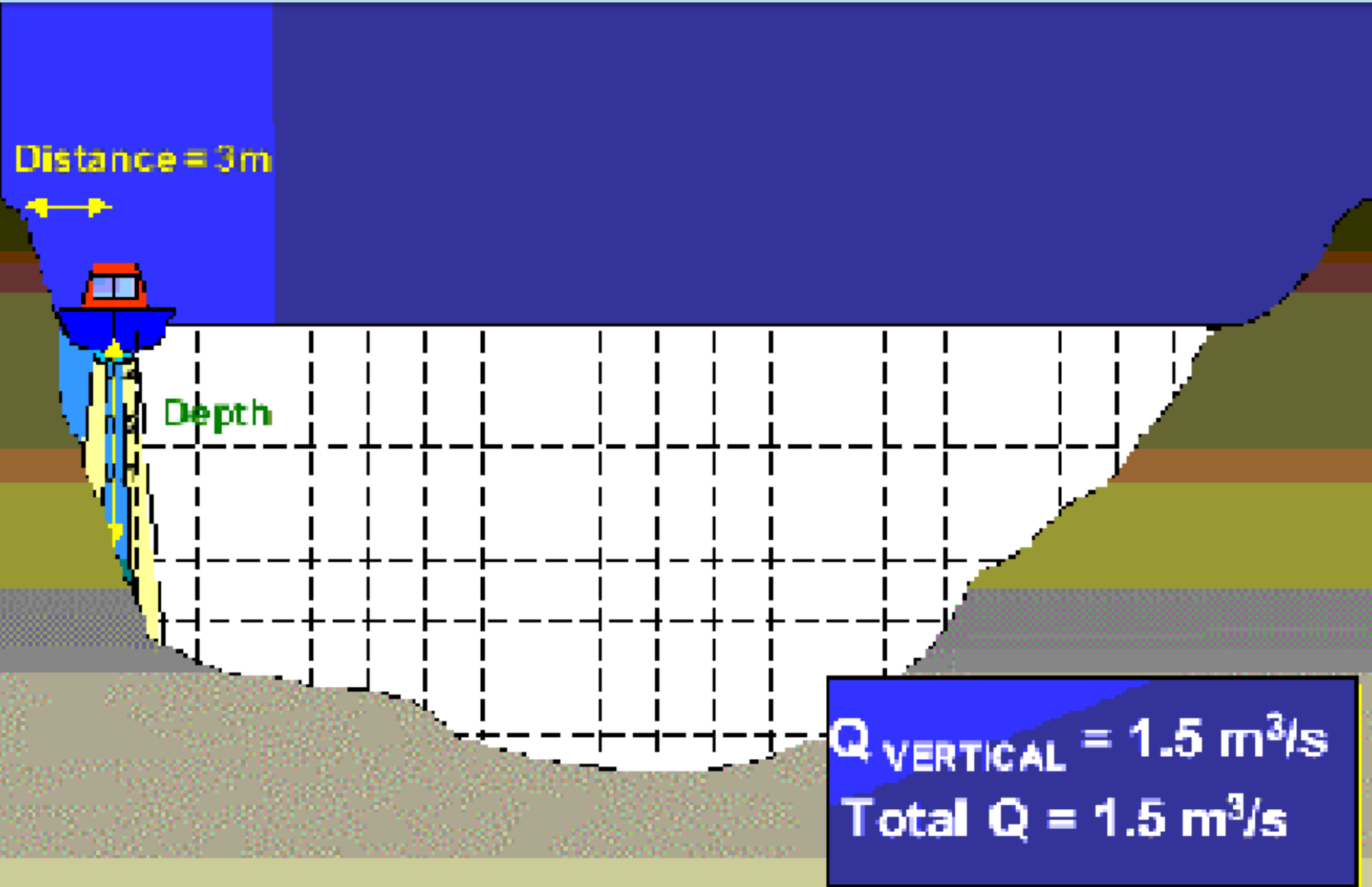
Estas variaciones permiten la evaluación comparativa de velocidades de partículas en suspensión en el agua, asumiéndose ser esta la misma velocidad del fluido. La sonda recorre un transecto perpendicular al río y realiza la toma de velocidades a lo largo de todo el trayecto, obteniéndose así la velocidad média del río y através del cálculo del área de este tramo, se determina la descarga líquida total.



Esta metodología proporciona información valiosa cuando es aplicado adecuadamente dentro de los límites de la técnica. Es importante resaltar la posibilidad de errores presentados por las mediciones, como las realizadas en lugares donde el río presenta una grande o poca cantidad de material en suspensión o donde el lecho del río presente mucha movilidad del sedimento de fondo que impida la evaluación comparativa precisa de su batimetría.

3.4 Medición de Caudales

con un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)



Continua...

3.4 Medición de Caudales

con un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

...Sigue

Distance = 39m

0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9
0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4		
						0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	

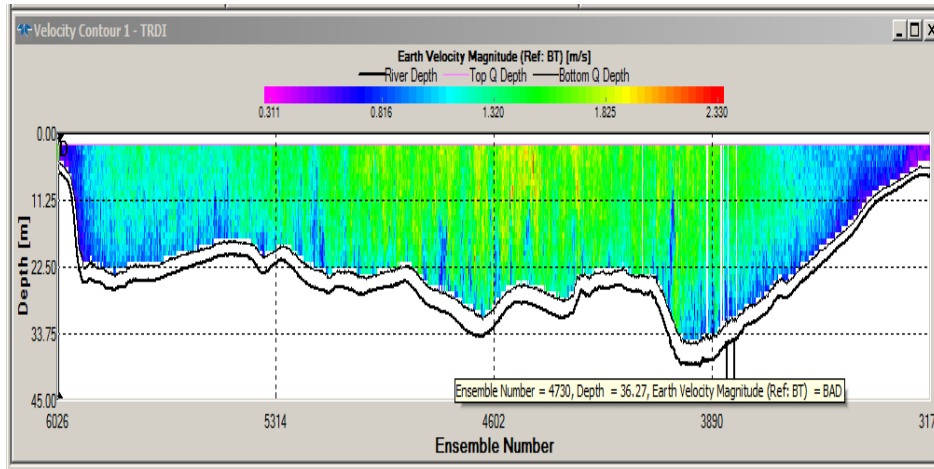
Depth

$Q_{\text{VERTICAL}} = 28.2 \text{ m}^3/\text{s}$

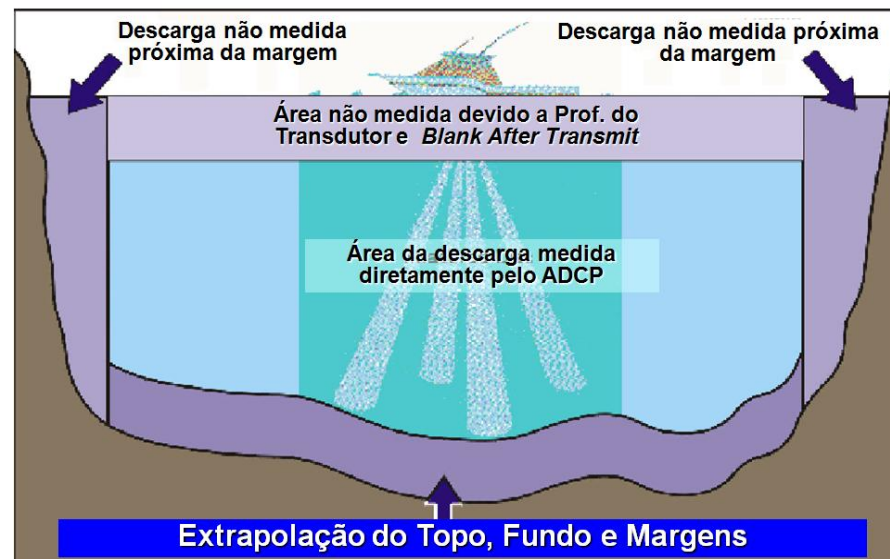
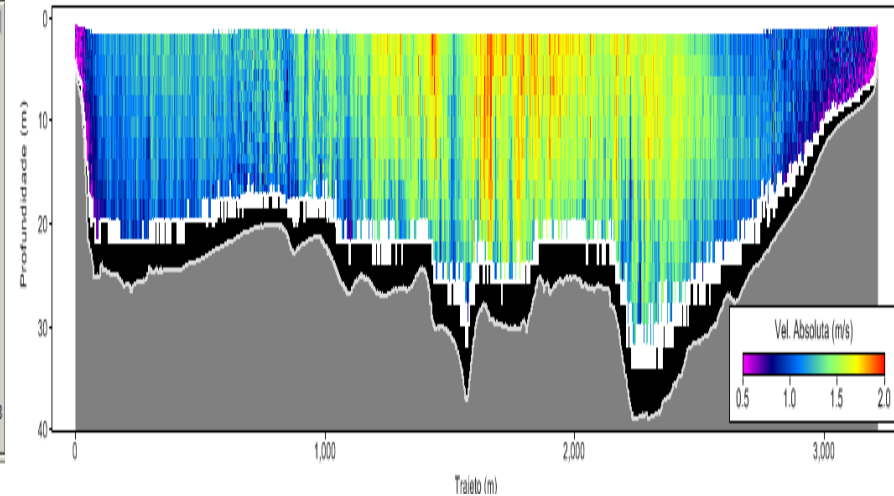
Total $Q = 113.1 \text{ m}^3/\text{s}$

3.5 Determinación de Caudales por Extrapolación

WinRiver II



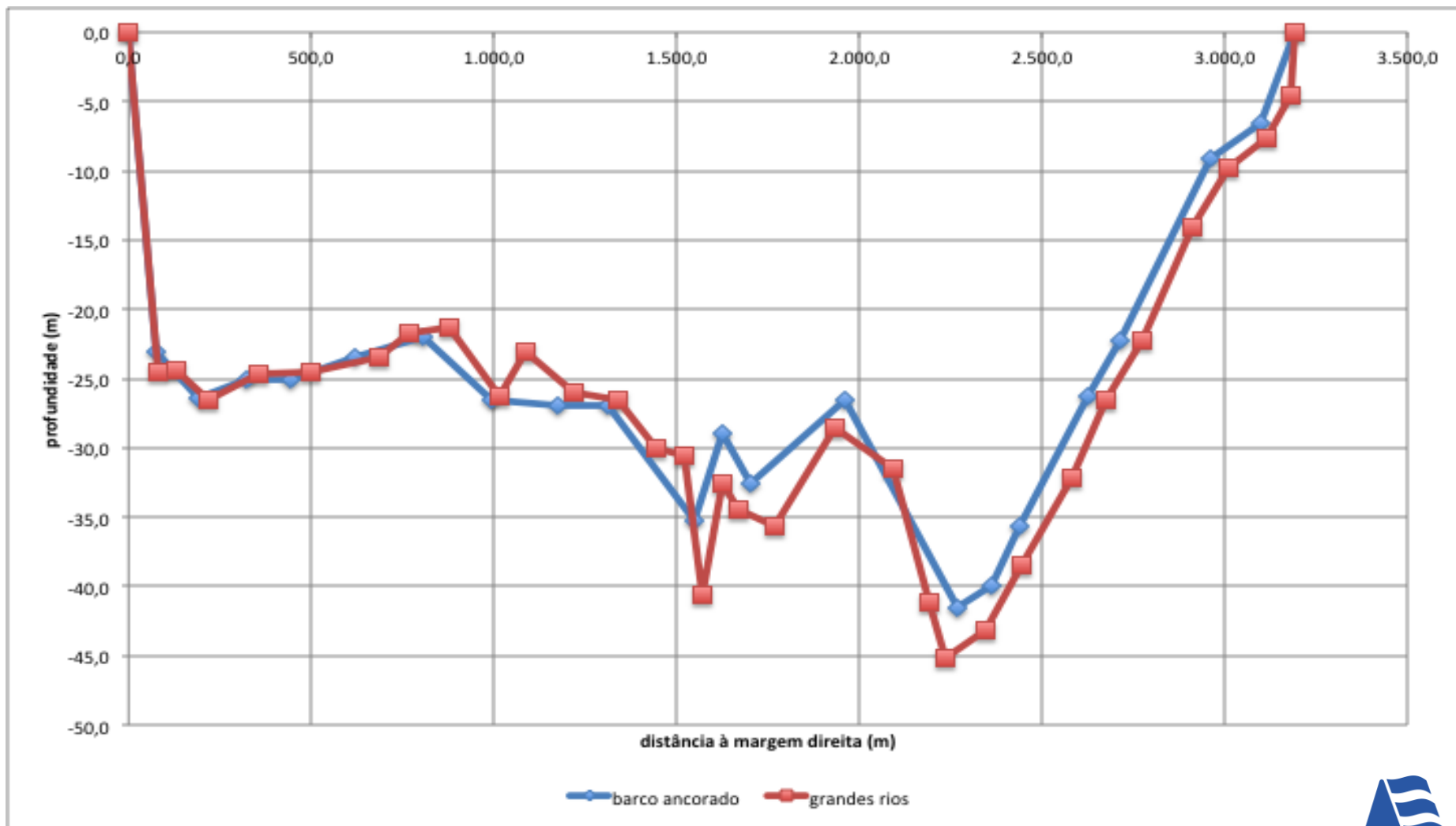
RiverSurveyor Live



4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

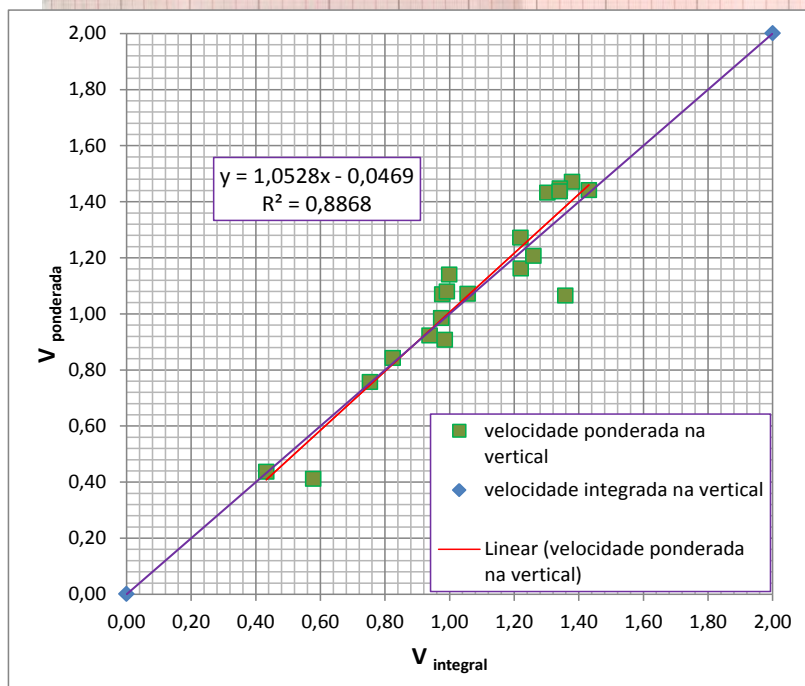
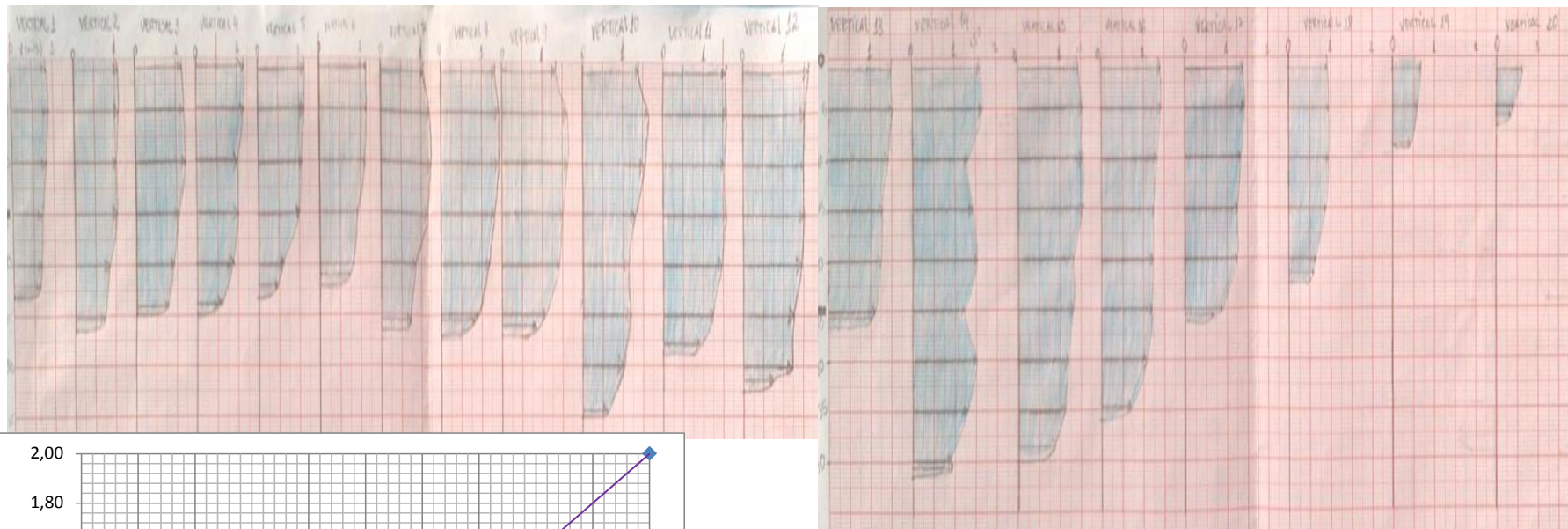


MÉTODO DE BARCO ANCLADO Y BARCO NO ANCLADO



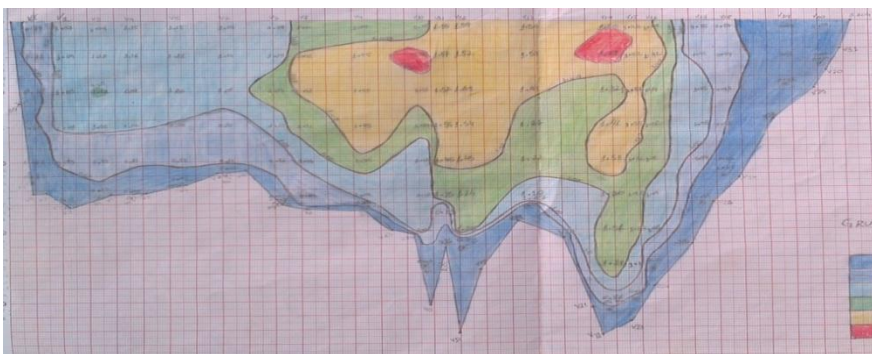
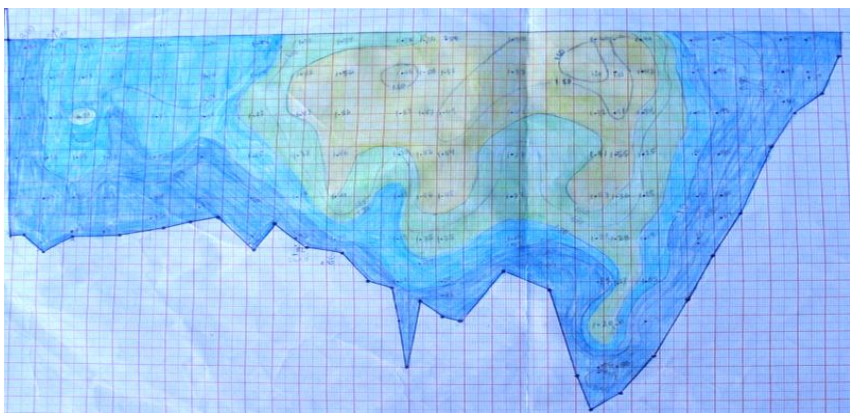
4.2 Distribución del perfil de velocidades

Perfil de velocidad de 20 verticales medidas mediante el método de barco anclado.

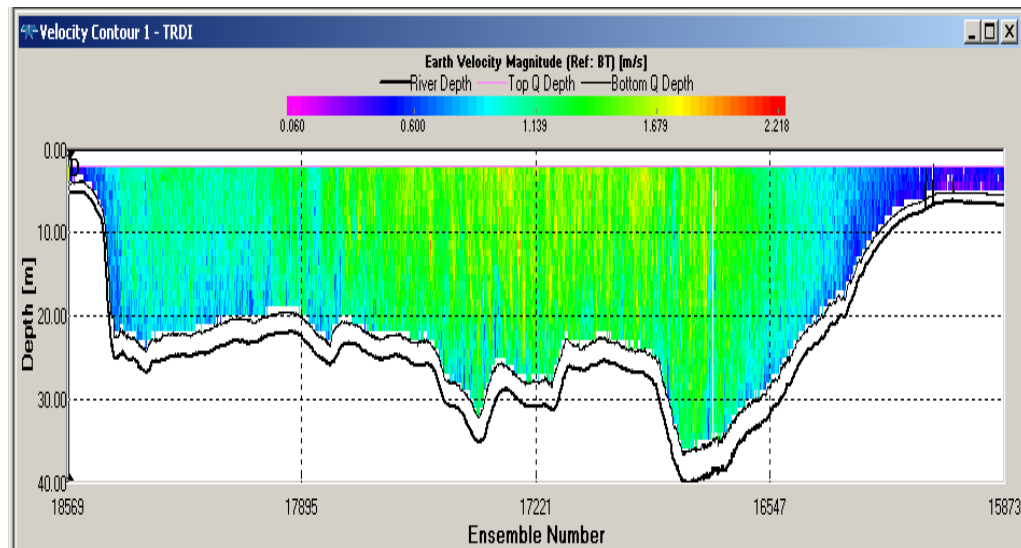


Resultado comparativo de medición de velocidad mediante un registro integrado de la velocidad en la vertical, de forma de mostrar que la medición de estas dos formas son posiblemente similares.

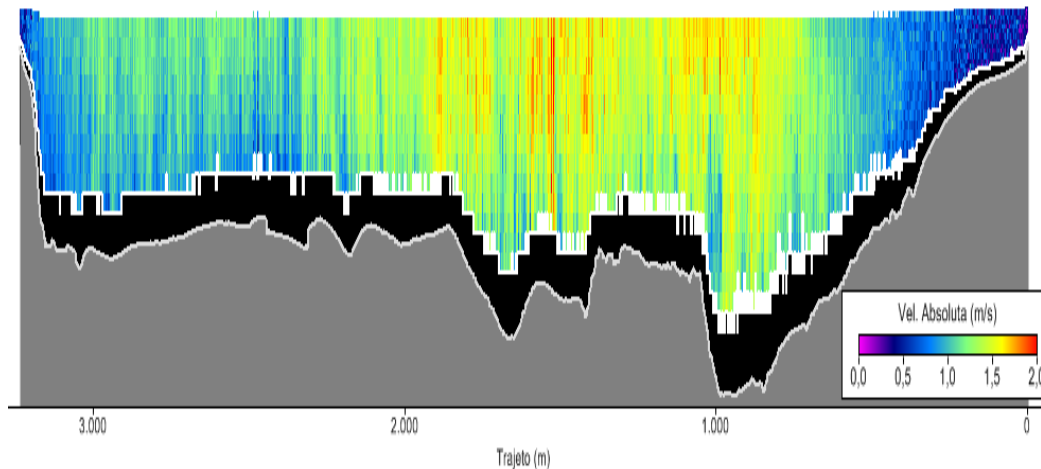
BARCO ANCLADO



MÉTODO ACÚSTICO -ADCP



MÉTODO ACÚSTICO -M9



MÉTODO DE BARCO ANCLADO Y BARCO NO ANCLADO

MÉTODO		VELOCIDAD (m/s)	ÁREA (m ²)	CAUDAL (m ³ /s)
NO ANCLADO	MEDIA SECCION	1.10	85,444	103,893.74
	SECCION MEDIA	1.09	84,618	102,884.48
ANCLADO	MEDIA SECCION	1.13	82,485	93,352.43
	SECCION MEDIA	1.14	81,475	92,721.35

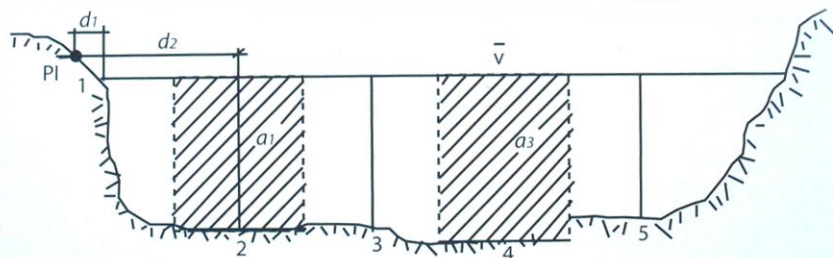


Figura 26
Cálculo da meia seção - Verificação das verticais e áreas.

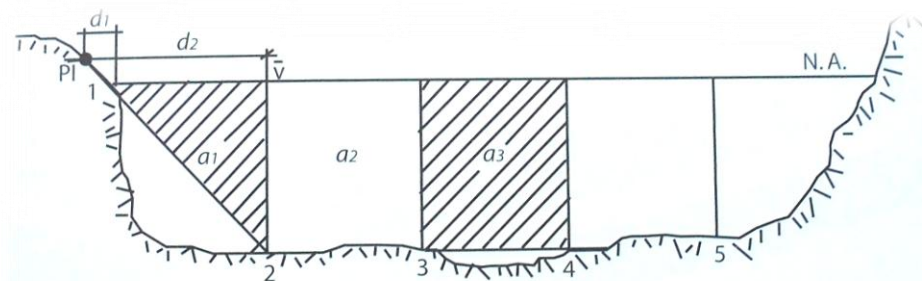


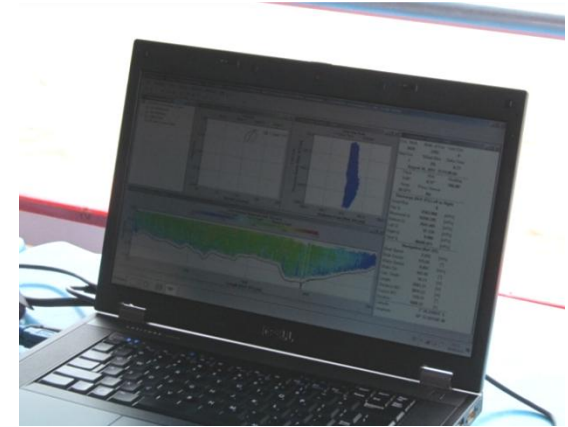
Figura 25
Cálculo da seção média - Verificação das verticais e áreas.

Continua...

...Sigue

MÉTODO ACÚSTICO

METODO	VELOCIDAD (m/s)	AREA (m ²)	CAUDAL (m ³ /s)
ADCP	1,17	80,092.89	89,668.09
M9	1,13	80,530.70	90,899.58



4.5 Resultados de todos los métodos

MÉTODO ACÚSTICO – M9

Travesía	Caudal (m ³ /s)		Diferencia
	Con corrección	Sin corrección	
1	91.755,55	95.007,07	3,54%
2	90.657,00	90.657,00	
3	91.371,18	94.282,35	3,19%
4	89.569,64	85.855,00	
5	92.380,15	96.253,84	4,19%
6	89.875,66	89.875,66	
7	91.794,40	96.180,78	4,78%
8	89.903,88	89.903,88	
9	91.602,48	96.059,06	4,87%
10	90.085,91	90.085,91	

MÉTODO ACÚSTICO - DCP

Travesía	Caudal (m ³ /s)
1	88.789,86
2	89.579,81
3	90.200,47
4	89.429,77
5	89.948,50
6	89.451,67
7	90.300,94
8	89.934,57
9	89.592,79
10	89.452,53
Média	89.668,09

Método	Caudal (m ³ /s)	Fecha	Cota (m)
Grandes Rios SM	100.997,13	26/08/2012	15,94
Grandes Rios MS	101.651,62	26/08/2012	15,94
Barco Anclado SM	92.352,23	27 e 28/08/2012	15,82 e 15,59
Barco Anclado MS	93.163,87	27 e 28/08/2012	15,82 e 15,59
M9	91.006,88	29/08/2012	15,40
ADCP	89.668,09	29/08/2012	15,40



4.5 Resultados de todos los métodos

COMPARACIÓN ENTRE LOS DIVERSOS MÉTODOS:

Método		Área	Variación	Velocidade	Variación	Vazão	Variación
Método dos Grandes Rios	Meia Seção	85.444,27	-4%	1,10	2%	103.893,74	-9%
	Seção Média	84.618,05	-3%	1,09	3%	102.884,48	-8%
Método do Barco Ancorado	Meia Seção	82.484,71	0%	1,13	0%	93.352,43	2%
	Seção Média	81.474,66	1%	1,14	-1%	92.721,35	3%
M9			Variación em relação à média do método M9		Variación em relação à média do método M9		Variación em relação à média do método M9
	Grupo 1	80.655,20	0%	1,138	-1%	91.755,55	-1%
		80.508,20	0%	1,126	0%	90.657,00	0%
	Grupo 2	80.501,90	0%	1,135	-1%	91.371,18	-1%
		80.100,70	1%	1,118	1%	89.569,64	1%
	Grupo 3	81.246,90	-1%	1,137	-1%	92.380,15	-2%
		80.039,20	1%	1,123	1%	89.875,66	1%
	Grupo 4	80.361,90	0%	1,142	-1%	91.794,40	-1%
		80.539,80	0%	1,116	1%	89.903,88	1%
	Grupo 5	81.196,50	-1%	1,128	0%	91.602,48	-1%
80.156,70		0%	1,124	0%	90.085,91	1%	
Média	80.530,70	Variación em relação à TOTAL	1,13	Variación em relação à TOTAL	90.899,58	Variación em relação à TOTAL	
		2%		0%		5%	
ADCP	Medições		Variación em relação à média do método ADCP		Variación em relação à média do método ADCP		Variación em relação à média do método ADCP
	1	80.011,42	1%	1,159	-3%	88.789,86	2%
		79.544,60	1%	1,175	-4%	89.579,81	1%
	2	80.237,50	0%	1,168	-3%	90.200,47	1%
		79.820,36	1%	1,171	-4%	89.429,77	2%
	3	80.550,56	0%	1,163	-3%	89.948,50	1%
		79.326,02	1%	1,184	-5%	89.451,67	2%
	4	80.511,02	0%	1,166	-3%	90.300,94	1%
		80.092,81	1%	1,183	-5%	89.934,57	1%
	5	81.322,31	-1%	1,139	-1%	89.592,79	1%
		79.512,29	1%	1,178	-4%	89.452,53	2%
	Média	80.092,89	Variación em relação à TOTAL	1,17	Variación em relação à TOTAL	89.668,09	Variación em relação à TOTAL
		3%		-4%		6%	
Média	Meia Seção	83.964,49		1,12		98.623,08	
	Seção Média	83.046,36		1,11		97.802,91	
	MS-SM	83.505,42		1,11		98.213,00	
	TOTAL	82.440,88		1,13		95.569,94	

Método	Bondades	Limitaciones
Barco Anclado	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de mediciones • Personal calificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige datos de inicio para corrección • Riesgo de objetos flotantes • Mayor Tiempo • Mayor Presupuesto • No recomendable donde exista problemas de operación
Barco No Anclado	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor Seguridad • Personal calificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige mas datos de inicio para corrección • Mas trabajo por parte de observadores • Mayor Tiempo • Mayor Presupuesto
M9	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene y almacena mayor cantidad de datos • Menor Tiempo • Menor Presupuesto a largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> • Personal mucho más calificado • Mayor control del sistema de comunicación y almacenamiento de datos.
ADCP	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor profundidad • Menor Tiempo • Menor Presupuesto 	<ul style="list-style-type: none"> • Personal mucho más calificado • Mayor control del sistema de comunicación y almacenamiento de datos.

5. CONCLUSIONES



1. Durante la información presentada, las mediciones de caudal en grandes ríos pueden ser realizadas por varios métodos. Todos los métodos presentados en este curso dieron resultados con precisión satisfactoria, mostrando que tanto las tecnologías tradicionales como las nuevas pueden ser utilizadas. Sin embargo, la elección de cual método o equipamiento a utilizar en cada medición dependerá del presupuesto; condiciones locales, climáticas; objetivo del trabajo; tiempo disponible, entre otros.

2. Los métodos tradicionales son capaces de proporcionar información precisa, sin presencia de factores externos, tales como datos de satélites, que pueden por sí sólo contener errores; declinación magnética, que, dependiendo del lugar y del momento, podría incurrir en grandes errores, por la presencia de por ejemplo, de estructuras metálicas que forman un campo magnético que desajustaría la brújula. Los métodos basados en efectos acústicos, por otra parte, son extremadamente caros y necesitan de equipos de alta calificación técnica principalmente para la interpretación de los resultados de cada medición, pero que permiten obtener la medición de caudales en un menor tiempo.

GRACIAS



Autoridad Nacional del Agua

*Comprometidos con una nueva
cultura del agua para la paz*