

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**



**MONITOREO Y CARACTERIZACIÓN DEL  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS  
DURANTE CRECIDAS O EVENTOS  
EXTREMOS DE EL NIÑO EN EL RÍO  
TUMBES**

Presentado por:

**Andres Goyburo Peña**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA

---

Lima - Perú  
2017

## *DEDICATORIA*

*A mis padres Claudio y Miriam, quienes me brindan su incondicional amor y apoyo. A mis hermanos Claudio y Daniel, quienes son para mí un ejemplo de superación. A mi novia Andrea, por su tanto amor y animo entregado todo el tiempo.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Instituto Geofísico del Perú (IGP), por hacer posible e incentivar la ciencia en nuestro país. Al Dr. Sergio Morera por la oportunidad de poder realizar esta investigación y sus valiosas enseñanzas. A todo el equipo SCAH por lo aprendido y el apoyo durante mi paso por el IGP, también a mis amigos del container.*

*Al proyecto HYBAM por el apoyo brindado, tanto en conocimientos como en facilitar el uso de su instalaciones y materiales. A todos los miembros, en especial a Patricia Turcq, Bruno Turcq, Pascal Fraizy, Elisa Armijos, Gerad Herail, Jean-Sébastien, William Santini y a mis amigos de la casita verde.*

*Al Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (PEBPT) por la información brindada y el apoyo con la toma de datos en la estación El Tigre. Especial agradecimiento al Ing. Deciderio Atoche, al Ing. Darwin Huamán y los técnicos Manuel Mena y Antonio Florián.*

*A mi patrocinador en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), el Dr. Eduardo Chávarri por sus indicaciones para la culminación de la tesis. A los miembros del jurado calificador Mg.Sc. Ricardo Apaella, Mg.Sc. Miguel Sánchez y Mg.Sc. Carlos Llerena.*

# ÍNDICE GENERAL

Página

<b>I. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>II. Revisión de Literatura .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Conceptos fundamentales.....</b>	<b>3</b>
1.1. Hidroclimatología durante el fenómeno “El Niño” .....	3
1.2. Características físicas de una cuenca.....	3
1.3. Transporte de sedimentos .....	5
1.4. Erosión.....	6
1.5. Principio del inicio del movimiento .....	6
1.6. Propiedades físicas del sedimento .....	7
1.6.1. Propiedades individuales.....	7
1.6.2. Propiedades en conjunto .....	10
1.7. Aforo líquido .....	12
1.7.1. Método tradicional.....	12
1.7.2. Métodos acústicos (Efecto Doppler) .....	13
1.8. Aforo de sedimentos .....	14
1.9. Eventos extremos .....	14
<b>2. Transporte de sedimentos .....</b>	<b>16</b>
2.1. Gasto sólido total.....	16
2.2. Gasto sólido en suspensión.....	16
2.2.1. Muestreador instantáneo .....	16
2.2.2. Muestreador puntual.....	16
2.2.3. Muestreador integrador.....	17
2.3. Gasto sólido de fondo .....	17
2.3.1. Tipos de aforo de sedimento de fondo .....	18
2.3.2. Uso de ADCP para determinar el transporte de fondo.....	19
2.3.3. Gasto sólido de fondo por Egashira .....	20
2.3.4. Gasto sólido de fondo por Rennie .....	22
2.4. Gasto sólido en función del gasto líquido .....	23
<b>3. Programas hydracces e hydromesad .....</b>	<b>24</b>
<b>III. Materiales y Métodos .....</b>	<b>25</b>
<b>1. Ubicación y caracterización del área de estudio .....</b>	<b>25</b>
1.1. Ubicación.....	25
1.2. Base de datos y Período de muestreo .....	26
1.3. Recursos hidrológicos superficiales.....	26
<b>2. Materiales .....</b>	<b>27</b>
2.1. Materiales de laboratorio y campo .....	27
2.2. Materiales de gabinete.....	27
<b>3. Metodología .....</b>	<b>28</b>
3.1. Descripción campaña de campo (12/2015 – 05/2016) .....	28
3.1.1. Campaña de campo (17-19/12/2015).....	28
3.2. Monitoreo de líquidos.....	30
3.2.1. Información hidrométrica utilizada .....	30
3.2.2. Gasto líquido estación El Tigre.....	30
3.3. Monitoreo de sedimento de fondo.....	32
3.3.1. Selección y ubicación del muestreador .....	32
3.3.2. Procesamiento en laboratorio de muestras .....	33
3.3.3. Ecuación para cuantificar el gasto sólido observado .....	33

3.3.4.	Cálculo del gasto sólido utilizando muestras de Helley-smith y aforos con ADCP .....	34
3.3.5.	Cálculo del gasto sólido utilizando aforos de ADCP .....	37
3.3.6.	Reproducción del transporte de sedimento de fondo .....	40
3.3.7.	Análisis de confiabilidad del transporte de fondo.....	43
3.4.	Monitoreo del sedimento en suspensión.....	44
3.4.1.	Protocolo de muestreo HYBAM.....	45
3.4.2.	Estrategia de muestreo durante crecidas .....	45
3.4.3.	Procesamiento de las muestras.....	46
3.4.4.	Análisis de confiabilidad del material en suspensión .....	46
3.4.5.	Distribución del material en suspensión en la sección hidrométrica (MES) .....	48
3.5.	Batimetría con aforos ADCP .....	49
<b>IV.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>51</b>
1.1.	Relación del material en suspensión y la velocidad en la sección hidrométrica .....	51
1.2.	Dinámica del transporte de sedimentos (suspensión y de fondo) .....	53
1.2.1.	Modelo hidrosedimentológico entre caudales líquidos y sólidos .....	53
1.2.2.	Dinámica del transporte de sedimentos durante la campaña de muestreo.....	55
1.3.	Batimetría de la sección hidrométrica durante el fenómeno El Niño .....	56
<b>V.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
<b>VI.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>61</b>
<b>VII.</b>	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>63</b>
<b>VIII.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>69</b>

## Índice de tablas

	Página
Tabla 1: Resumen de parámetros morfológicos de las cuencas Puyango-Tumbes (PEBPT, 2012) .....	27
Tabla 2: Parámetros de cálculo del muestreador de fondo Helley-Smith (El Tigre).....	34
Tabla 3: Aforos realizados con ADCP Workhorse Rio Grande, (Datos: IGP, Anexo 5).....	35
Tabla 4: Aforos utilizados para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo con Egashira <i>et al.</i> , (1997), (Datos: IGP, Anexo 5).....	37
Tabla 5: Aforos utilizados para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo con Rennie <i>et al.</i> , (2002), (Datos: IGP, Anexo 5).....	39
Tabla 6: Gasto sólido de fondo total en estación El Tigre (Enero-Abril/2014), (Datos: IGP, Anexo 5). .....	43
Tabla 7: Gasto sólido de fondo total en estación El Tigre (Enero-Mayo/2016), (Datos: IGP, Anexo 5). .....	43
Tabla 8: Aforos realizados durante la campaña del 12/2015 al 04/2016, (Datos: IGP, Anexo 5). .....	49
Tabla 9: Presupuesto de la investigación .....	76
Tabla 10: Velocidades en la celdas del aforo con ADCP del 07/04/2016.....	77

## Índice de figuras

	Página
Figura 1: Esquema del transporte de sedimentos en ríos .....	5
Figura 2: Diagrama de fuerzas actuando en una partícula de sedimento (Yang et al., 2006) .....	7
Figura 3: Curva granulométricas de sedimento de fondo. Est. El Tigre, Tumbes (07/02/2016); ( $Q = 83.82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).....	11
Figura 4: Cálculo de caudal utilizando información de aforo líquido, (Chow <i>et al.</i> , 1994) .....	12
Figura 5: Esquema de un aforo con ADCP, (Teledyne RD Instruments, 2014) .....	13
Figura 6: Río Tumbes, Estación “El Tigre”. Líneas rojas indican inicio y fin del evento extremo. Cotas medias diarias (cm) 01/09/2003 – 31/08/2004. ....	15
Figura 7: Muestreador instantáneo y de punto (Julien, 2010).....	17
Figura 8: Esquema del transporte de suspensión y de fondo (Julien, 2010).....	18
Figura 9: Muestreador trampa de arrastre de fondo (Fuente: FAO).....	18
Figura 10: Muestreador de fondo Helley-Smith (Emmett, 1980).....	19
Figura 11: Diagrama conceptual de la medición del transporte de fondo con ADCP (Okada, 2017).....	21
Figura 12: Ubicación del área de estudio .....	25
Figura 13: Metodología para estimar el gasto sólido total .....	29
Figura 14: Curvas de calibración, estación El Tigre (1995 – 2016), software HYDRACCES, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	30
Figura 15: Variación del nivel de agua, estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	31
Figura 16: Variación de caudales diarios, estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).....	31
Figura 17: Distribución de velocidades promedio y ubicación de la vertical de muestro con Helley-Smith en la estación El Tigre (12/04/14) (Quincho, 2015).....	33
Figura 18: Aforos con ADCP Workhorse Río Grande el 28/01/2016 en Est. El Tigre ( $Q=58.11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).....	35
Figura 19: Ubicación del Helley-Smith durante aforo del 28/01/2016 en Est. El Tigre ( $Q=58.11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).....	36
Figura 20: Relación entre el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) y el gasto líquido ( $Q_l$ ), usando la metodología con Helley-Smith, estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	36
Figura 21: Distribución en la sección hidrométrica del $Q_b$ y $V_p$ . (18/12/2015, $Q=24.12 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	37

Figura 22:	Distribución en la sección hidrométrica del $Q_b$ vs $V_p$ . Media móvil para 3, 5, 10 y 15 observaciones. (18/03/2016, $Q=157.66 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).....	38
Figura 23:	Distribución en la sección hidrométrica del $Q_b$ vs $V_p$ . Media móvil para 3, 5, 10 y 15 observaciones. (05/04/2016, $Q=403.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).....	38
Figura 24:	Relación entre el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) y el gasto líquido ( $Q_l$ ), usando la metodología Egashira <i>et al.</i> , (1997), estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	39
Figura 25:	Relación entre el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) y el gasto líquido ( $Q_l$ ), usando la metodología Rennie <i>et al.</i> , (2002), estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).....	40
Figura 26:	Transporte de fondo ( $\text{td} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) en estación El Tigre (Enero/2015-Junio/2016), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	41
Figura 27:	Serie de datos para el período (enero-abril 2014) obtenidas por los métodos explicados y por (Quincho, 2015), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	42
Figura 28:	Gráfico de barras del transporte de sedimento de fondo anual para el período 01-04/2014, (Datos: IGP, Anexo 5).....	42
Figura 29:	Boxplot de valores estimados para el transporte de sedimento de fondo (enero-mayo 2016) Est. El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	43
Figura 30:	Curva de gasto sólido de fondo en función al gasto líquido (2014-2016), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	44
Figura 31:	Esquema de ubicación de los puntos de control en la estación El Tigre. ....	45
Figura 32:	Boxplot concentración de sedimentos en suspensión para rango de caudales en estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	47
Figura 33:	Curva de gasto sólido en suspensión en función al gasto líquido (2004-2016), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	47
Figura 34:	Datos cargados en el HYDROMESAD, (Datos: IGP, Anexo 5). ....	48
Figura 35:	Muestreo puntual del MES en $\text{mg/L}$ , estación El Tigre (17/03/2017). ( $Q=183.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).....	49
Figura 36:	Mapa de contorno de velocidad de flujo, estación El Tigre - Río Tumbes. 04/04/2016 ( $Q=419.41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	50
Figura 37:	Relación potencial entre el MES vs Velocidad estación El Tigre (enero-mayo 2016), (Datos: IGP, Anexo 5).....	51
Figura 38:	Velocidades en la sección hidrométrica, estación El Tigre (17/03/2016). ( $Q=174.05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5). ....	52
Figura 39:	Distribución del material en suspensión en la sección hidrométrica, estación El Tigre (17/03/2016). ( $Q=174.05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).....	52



Figura 40:	Relación del gasto sólido (suspensión y fondo) en función del gasto líquido en la estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). .....	54
Figura 41:	Gráfica de caudal y transporte de sedimentos en suspensión acumulados en estación El Tigre para el período (01-05/2016), (Datos: IGP, Anexo 5).....	56
Figura 42:	Batimetría durante la campaña de aforos, estación El Tigre - Río Tumbes. (12/2015-04/2016), (Datos: IGP, Anexo 5). .....	57
Figura 43:	Serie de caudales aforados por ADCP con su respectiva erosión y deposición en la estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5). .....	58
Figura 44:	Componentes principales del ADCP Workhorse Río Grande.....	69
Figura 45:	Prueba de conectividad del ADCP con laptop mediante radio modems .....	70
Figura 46:	Inicio de la primera campaña de aforos con ADCP, en estación El Tigre .....	72
Figura 47:	Aforo realizado el día 18/12/2015 en la estación El Tigre .....	72
Figura 48:	Aforo realizado por ADCP.....	73
Figura 49:	Equipos utilizados para realizar aforos en estación El Tigre .....	73
Figura 50:	Procesamiento de las muestras de sedimentos en suspensión .....	74
Figura 51:	Procesamiento de las muestra de sedimentos de fondo .....	75

## *Índice de anexos*

	Página
Anexo 1 Configuración y prueba del adcp workhorse río grande.....	69
Anexo 2 Primera camapaña de aforos con ADCP.....	72
Anexo 3 Procesamiento de muestras en laboratorio.....	74
Anexo 4 Presupuesto .....	76
Anexo 5 Base de datos.....	77

## *RESUMEN*

El objetivo principal de la presente tesis es la caracterización de la evolución del sedimento en suspensión y de fondo del río Tumbes, en la cuenca Puyango-Tumbes, en función de los caudales líquidos durante grandes crecidas y/o eventos extremos El Niño. Para ello se utilizó un perfilador acústico Doppler (ADCP), para el monitoreo del caudal líquido y al caudal sólido en suspensión y de fondo. La base de datos utilizada para la presente investigación fue proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), esta base de datos se generó durante el proyecto “Monitoreo, caracterización e identificación de las principales fuentes de erosión y sedimentos durante crecidas o eventos extremos El Niño en las cuencas binacionales Puyango-Tumbes y Zarumilla” financiado por INNOVATE PERU. El transporte de sedimento total ( $Q_{st}$ ), durante la campaña de muestreo (Enero-Mayo/2016), para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre fue de 2.79 millones de toneladas, de los cuales el 99 por ciento se transporta en suspensión (2.78 millones de toneladas) y 1 por ciento de fondo (0.015 millones de toneladas). Con respecto al transporte de sedimentos en suspensión se comprobó que su variación se debe al material disponible al lavado por precipitaciones debido a que el mayor transporte se da al inicio de la época húmeda debido al alto material disponible y disminuyendo hasta el fin de la época húmeda. Con respecto al transporte de sedimentos de fondo se determinó que la metodología propuesta por Rennie *et al.*, (2002), es la que mejor se aproxima a los datos observados de gasto sólido de fondo. Obteniendo una correlación  $R=0.43$  entre el gasto sólido de fondo y el gasto líquido observado.

Se detectó y documentó la erosión provocada por las crecidas en la época húmeda mediante aforos realizados con ADCP en el río Tumbes, siendo la más completa llevada a cabo a nivel nacional. Con ello se logró determinar que la sección hidrométrica sufre muchos cambios durante la época húmeda, estos cambios pueden afectar la precisión de la curva de gasto líquido en la estación El Tigre.

Palabras clave: sedimentos en suspensión, sedimentos de fondo, transporte de total de sedimentos, ADCP, batimetría.

## *ABSTRACT*

The main objective of this thesis was the characterization of the evolution of suspended sediment and bedload of the Tumbes river in the Puyango-Tumbes basin, depending on the discharge during large floods in the El Niño event. To achieve the objective we included the use of an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), to monitoring the discharge and the solid flow in suspension and rivers bed. The database used for this research was provided by the Instituto Geofísico del Perú (IGP). This database was generated during the project “Monitoreo, caracterización e identificación de las principales fuentes de erosión y sedimentos durante crecidas o eventos extremos El Niño en las cuencas binacionales Puyango-Tumbes y Zarumilla” funded by INNOVATE PERU. Total sediment transport ( $Q_{st}$ ) during the sampling campaign for the Puyango-Tumbes basin at El Tigre station was 2.79 million tons, of which 99 percent is transported in suspensión (2.78 million tons) and 1 percent for bed load (0.015 million tons). It was found that the transport of suspended sediment is limited by the supply of sediment (washload) because the greater transport occurs at the beginning of the wet season, due to the high available material, and decreasing until the end of the wet season. About the bedload transport, it was determined that the methodology presented by Rennie et al. (2002) is the one that best approximates the observed data of bed load, obtaining a correlation  $R = 0.43$  between the bed load transport and the flow rate.

Erosión was detected and documented during the wet season by ADCP measurements in the Tumbes river, being the most complete at national level. With this, it was possible to determine that the hydrometric section undergoes in many changes during the wet season, these changes can affect the precision of the flow rate calibration curve in the station El Tigre.

Keywords: Acoustic measurement (ADCP); Rivers; Sediment transport; Bed-load movement; Bathymetry.

## I. INTRODUCCIÓN

El río Tumbes es el principal afluente de la cuenca Binacional Puyango Tumbes, que se origina en el Ecuador con el nombre de Puyango y termina su recorrido en el Perú, además aporta la mayor cantidad de agua dulce y sedimentos en el departamento de Tumbes. Las altas concentraciones de sedimentos en el norte del Perú son estacionales y ocurren con gran frecuencia durante eventos extremos El Niño (1982-83 y 1997-98) cambiando la geomorfología y química de todo el ecosistema, así como ocasionar daños a las infraestructuras existentes (Quincho, 2015).

Los sedimentos son materiales sólidos acumulados sobre la superficie terrestre, procedentes de fenómenos o procesos naturales y pueden ser transportados de distintas formas por el flujo en una corriente (Julien, 2010). El transporte de sedimentos en ríos se puede dar por rodamiento o deslizamiento, a saltos por el fondo el flujo denominado “carga de fondo” y en suspensión es decir soportado por la turbulencia dentro del flujo denominado “carga en suspensión” (Apacla, 2014). El transporte de sedimentos ocurre desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura al mar, alterando la flora, fauna, geomorfología, calidad de agua, actividades antrópicas e incluso la permanencia y período de vida útil de obras de infraestructura hidráulica.

La presente investigación se desarrolló dentro del marco del proyecto de investigación “Monitoreo y Caracterización del transporte de sedimentos en suspensión y de fondo durante crecidas o eventos extremos El Niño en la cuencas binacional Puyando-Tumbes”; el cual es financiado por INNOVATE PERU y desarrollado dentro del Instituto Geofísico del Perú (IGP); dicho proyecto tiene como objetivo la caracterización de la evolución del sedimento en suspensión y de fondo en función de los caudales líquidos durante grandes crecidas y/o eventos extremos como El Niño.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Caracterización de la evolución de la descarga de sedimento en suspensión y de fondo del río Tumbes en función de los caudales líquidos durante grandes crecidas en el fenómeno El Niño ocurrido durante los meses de Enero a Mayo del 2016.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar el uso de un Perfilador Acústico Doppler de Corriente (ADCP) para el monitoreo del caudal líquido y sólido tanto de fondo como en suspensión en río Tumbes durante grandes crecidas y eventos extremos El Niño.
- Reconstruir los caudales sólidos mediante el método directo con Helley-Smith e indirecto como los expuestos por Egashira y Rennie.
- Determinar la dinámica del transporte de sedimentos en suspensión y de fondo en el río Tumbes durante grandes crecidas y eventos extremos El Niño.
- Determinar la distribución del material en suspensión (MES) en la sección hidrométrica mediante métodos indirectos.
- Presentar una metodología para el monitoreo del cambio en la batimetría de una sección hidrométrica durante la época de crecidas.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

#### 1.1. HIDROCLIMATOLOGÍA DURANTE EL FENOMENO “EL NIÑO”

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) ha sido foco de diversas investigaciones desde mediados de 1960. La naturaleza diversa del fenómeno ha atraído estudios de muchas disciplinas como las ciencias atmosféricas y con la oceanografía a la cabeza (Tapley & Waylen, 1990). La costa oeste de Sudamérica, desde la costa norte de Chile hasta la costa norte del Perú, se caracteriza por una climatología de ligeras precipitaciones, resultando en un clima semiárido (Lagos & Buizer, 1992). Según Lavado Casimiro *et al.*, (2012) las lluvias y los caudales en el norte de la vertiente del Pacífico peruano son influenciada de manera inversa por la variabilidad del ENSO. Aunque en décadas recientes la relación entre ENSO y precipitaciones ha tenido cambios significativos a lo largo de las costa del Perú debido a la predominancia de eventos El Niño en el pacífico central (Bourrel *et al.*, 2015).

Actualmente el Comité Multisectorial para el Estudio del Fenómeno El Niño (ENFEN), utiliza oficialmente El Índice Costero El Niño (ICEN) (Takahashi *et al.*, 2012) para monitorear El Niño y La Niña en la costa del Perú. El ICEN permite determinar la ocurrencia de un evento El Niño o evento La Niña y además su respectiva intensidad.

#### 1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UNA CUENCA

El comportamiento hidrológico de una cuenca se puede determinar mediante el estudio de sus características físicas. Estas características son de gran utilidad para la ingeniería e hidrología, debido a que permiten la transferencia de información a diversas ubicaciones donde exista poca o ninguna información de registros hidrológicos.

- a. **Área de drenaje de la cuenca:** es el área plana (proyección horizontal), incluida entre su divisoria topográfica; se designa como divisoria la línea que separa las precipitaciones que caen en cuencas inmediatamente vecinas, y que encaminan la escorrentía resultante para uno u otro sistema fluvial. La divisoria sigue una línea atravesando el curso de agua solamente en el punto de salida.

- b. Perímetro de la cuenca:** corresponde a la suma de los lados del polígono (cuenca de drenaje).
- c. Longitud del río:** longitud total de la corriente de agua, expresado en kilómetros.
- d. Ancho promedio:** es a relación entre el área de la cuenca colectora (A) y su longitud de cauce principal (L).
- e. Coeficiente de compacidad:** es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la cuenca. Esta relación nos señala la mayor o menor compacidad de la cuenca. Cuanto más cercano este a la unidad, se considera que la cuenca tiene una forma más circular y si la relación es mayor a la unidad, indica que tiene una forma más alargada. Si la cuenca es más redonda, su tiempo de concentración es menor, y por tanto la tendencia a generar avenida será mayor.
- f. Factor de forma:** Es otro índice numérico con el que se puede expresar la forma y la mayor o menor tendencia a crecientes de una cuenca, en tanto la forma de la cuenca hidrográfica afecta a los hidrogramas de escorrentía y las tasas de flujo máximo. Se define entonces como la relación entre el ancho promedio de la cuenca y el cuadrado de la longitud del curso de agua más largo.
- g. Tiempo de concentración:** es el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de agua de una cuenca demora hasta llegar a una sección de dicha corriente. Se mide en minutos u horas. Existen varios métodos de cálculo como la fórmula de Chow *et al.*, (1994) la cual considera, el tiempo de concentración, longitud del cauce principal y pendiente media de la cuenca, en su cálculo.
- h. Elevación media de la cuenca:** la altura o elevación media de la cuenca tiene importancia principalmente en zonas montañosas donde influye en el escurrimiento y en otros elementos que también afectan el régimen hidrológico, como el tipo de precipitación temperatura, etc.

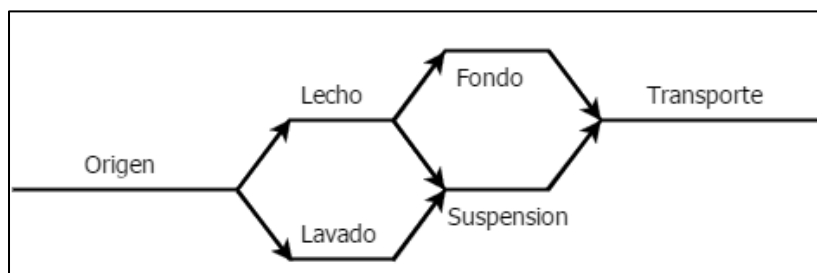


### 1.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos, son materiales producto de la fragmentación de suelo y roca de los cauces y cuencas, pueden ser transportados de diversas formas por el flujo de una corriente cuando el esfuerzo cortante promedio sobre el fondo del cauce excede el esfuerzo crítico tractivo del material de fondo (Apaclla, 2014).

Según Espinoza (2004), los cursos de agua realizan su básica labor transportadora de forma selectiva y aplicando a cada tipo de partículas una modalidad específica de desplazamiento. Al igual que el resto de los flujos de baja densidad, los ríos seleccionan para su transporte las partículas que se encuentran al alcance de su competencia y las desplazan por medio del impulso mecánico derivado de la escorrentía turbulenta de sus aguas.

Los ríos pueden llevar los sedimentos de dos formas. Los sedimentos de fondo se transportan rodando, saltando o deslizándose y siempre en contacto con el lecho del río. En los sedimentos en suspensión, el peso de las partículas es soportado por las fuerzas de la turbulencia en el agua y las partículas pueden viajar distancias considerables sin entrar en contacto con el lecho del río (Turowski *et al.*, 2010).



**Figura 1: Esquema del transporte de sedimentos en ríos**

El transporte de sedimentos total será:  $Q_{st} = Q_{ss} + Q_{sf}$

$Q_{st}$  : Gasto sólido total

$Q_{ss}$ : Gasto sólido en suspensión

$Q_{sf}$ : Gasto sólido de fondo

#### **1.4. EROSIÓN**

Erosión y sedimentación refieren al movimiento de partículas sólidas, llamadas sedimentos. El proceso natural de erosión, transporte y sedimentación se ha venido dando desde siempre y da forma al paisaje actual. Hoy en día el proceso de erosión puede causar severos problemas ambientales e ingenieriles. (Julien, 2010)

La producción de sedimentos es el producto final de la erosión o desgaste de la superficie de la tierra por la acción del agua, el viento, el hielo y la gravedad. La suma total de material en la capa superficial, en surcos y cárcavas en una cuenca es conocida como la erosión bruta. Sin embargo no todo el material erosionado ingresa al sistema hídrico. La porción de material erosionado que es transportado a través del sistema hídrico, se le refiere como el sedimento producido. (Yang *et al.*, 2006)

#### **1.5. PRINCIPIO DEL INICIO DEL MOVIMIENTO**

El principio del movimiento es importante para el estudio del transporte de sedimentos, degradación de cauce, y diseño de estabilidad de bancos. Debido a su naturaleza estocástica del movimiento de los sedimentos a lo largo del cauce fluvial es difícil definir con precisión en que condición de flujo una partícula se empezará a mover (Yang *et al.*, 2006).

El movimiento de una partícula es el resultado de la interacción de dos fuerzas opuestas: las fuerzas que actúan (que se aplican) y las fuerzas que se oponen (fuerzas de resistencia). Las de primer tipo son causadas por la hidrodinámica del flujo y las segundas están asociadas con el peso sumergido (Apacla, 2014).

En la Fig. 2 se muestra las fuerzas actuando en una partícula esférica de sedimento en el fondo de un río. Las fuerzas que se consideran son la de arrastre  $F_D$ , fuerza  $F_L$  normal al flujo, peso sumergido  $W_S$  y la de resistencia  $F_R$ . La partícula de sedimento está en el principio de movimiento cuando unas de las siguientes condiciones se cumplen (Yang *et al.*, 2006).

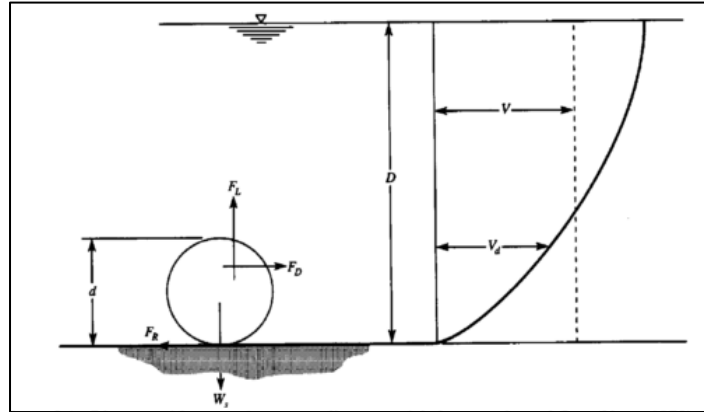


Figura 2: Diagrama de fuerzas actuando en una partícula de sedimento (Yang et al., 2006)

$$F_L = W_S$$

$$F_D = F_R$$

$$M_O = M_R$$

Dónde:

$M_O$  = momento generado por  $F_D$  y  $F_L$

$M_R$  = momento de resistencia debido  $F_L$  y  $W_S$

## 1.6. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SEDIMENTO

Las propiedades de los sedimentos se pueden clasificar en individuales y en conjunto. En conjunto se refiere a las presentes en una muestra representativa del material en suspensión o de fondo.

### 1.6.1. PROPIEDADES INDIVIDUALES

#### a. Tamaño

Es la propiedad que más se utiliza para clasificar al material arrastrado por un río; sin embargo no pueden determinarse con una sola dimensión (Apacla, 2014).

El tamaño se puede determinar de muchas maneras; el diámetro nominal se refiere al diámetro de una esfera con el mismo volumen de la partícula usualmente medido por el volumen desplazado por la partícula, diámetro de cribado es la abertura mínima de la malla por la cual pasa la partícula, diámetro de caída es el diámetro de una esfera con densidad

relativa de 2.65 y que tiene la misma velocidad de caída de la partícula cuando ambas se precipitan en agua destilada a 24°C (Julien, 2010).

Según Van Rijn, (1993) el tamaño de las partículas puede ser usado como indicador de energía. Granos finos son usualmente dominantes en condiciones de baja energía cerca a los bancos del río, en zonas inundables o en cuencas reguladas. Granos gruesos son hallados en condiciones de alta energía en el canal más profundo de los ríos y estuarios.

#### **b. Forma**

Según Van Rijn, (1993) la forma de las partículas se representa con el factor de forma Corey, definido como:

$$SF = \frac{c}{(a \times b)^{0.5}} \quad 2.1$$

Dónde:

a = largo del mayor eje perpendicular a los otros 2 ejes.

b = largo del eje intermedio perpendicular a los otros 2 ejes.

c = largo del menor eje perpendicular a los otros 2 ejes.

El factor SF para arenas naturales es de aproximadamente 0.7.

El factor forma es esencialmente un coeficiente de delgadez y no toma en cuenta la distribución del área superficial y el volumen de la partícula.

#### **c. Velocidad de caída**

Se define como la velocidad máxima que adquiere la partícula al caer dentro del agua: se alcanza cuando el peso sumergido de la partícula se equilibra con el empuje del agua, también llamada velocidad terminal (Apacla, 2014).

Según Van Rijn, (1993) la velocidad de las partículas se puede determinar bajo 2 condiciones. La primera, como una esfera cayendo en un fluido estable y la segunda como partículas no esféricas.

### c.1. Esfera cayendo en un fluido estable

Básicamente la velocidad de caída es una propiedad con distintos comportamientos. La velocidad terminal ( $w_s$ ) de la esfera se da cuando la fuerza de arrastre del fluido en la partícula se equilibra con la fuerza de gravedad:

$$w_s = \sqrt{\frac{4(s-1)gd}{3C_D}} \quad 2.2$$

Dónde:

$w_s$  = velocidad de caída de la esfera.

$d$  = diámetro de la esfera.

$s$  = gravedad específica (2.65).

$C_D$  = coeficiente de arrastre.

$g$  = aceleración de la gravedad

El coeficiente  $C_D$  es una función del número de Reynolds y del factor de forma. En la región de Stokes ( $Re < 1$ ) el coeficiente está dado por:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad 2.3$$

### c.2. Partículas no esféricas

La expresión válida para esferas no puede ser aplicada para sedimentos naturales por las diversas formas que tienen. El efecto de la forma es mayor para partículas relativamente grandes ( $> 300 \mu m$ ). Experimentos muestran diferencias en la velocidad de caída en el orden del 30% para SF en el rango del 0.5 a 1.

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad \text{para} \quad 1 < d \leq 100 \mu m \quad 2.4$$

$$w_s = \frac{10\nu}{d} \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{\nu^2}\right)} - 1 \right] \quad \text{para} \quad 100 < d \leq 1000 \mu m \quad 2.5$$

$$w_s = 1.1\sqrt{(s - 1)gd} \quad \text{para} \quad d \geq 1000 \mu m \quad 2.6$$

Dónde:

$d$  = diámetro de cribado

$v$  = coeficiente viscosidad cinética.

$s$  = gravedad específica (2.65).

## 1.6.2. PROPIEDADES EN CONJUNTO

### a. Densidad y porosidad

Según Van Rijn, (1993) la densidad del cuarzo y arcillas minerales es igual a 2650 kg/m<sup>3</sup>. La densidad de los materiales carbonados está entre 2500 a 2650 kg/m<sup>3</sup>. La gravedad específica es definida como la división entre la densidad de sedimento y la densidad del fluido es igual a 2.65.

La densidad del sedimento seco es el peso por unidad de volumen y es igual a:

$$\rho_{seco} = (1 - p)\rho_s \quad 2.7$$

Dónde:

$\rho_{seco}$  = densidad del sedimento seco (kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_s$  = densidad del sedimento (kg/m<sup>3</sup>).

$p$  = porosidad.

La densidad mojada o peso del volumen de material depositado (asumiendo total saturación) es el peso del agua y sedimento por unidad de volumen y es igual a:

$$\rho_{mojado} = p\rho + (1 - p)\rho_s \quad 2.8$$

Dónde:

$\rho_{mojado}$  = densidad del sedimento mojado (kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_s$  = densidad del sedimento (kg/m<sup>3</sup>).

$p$  = porosidad.

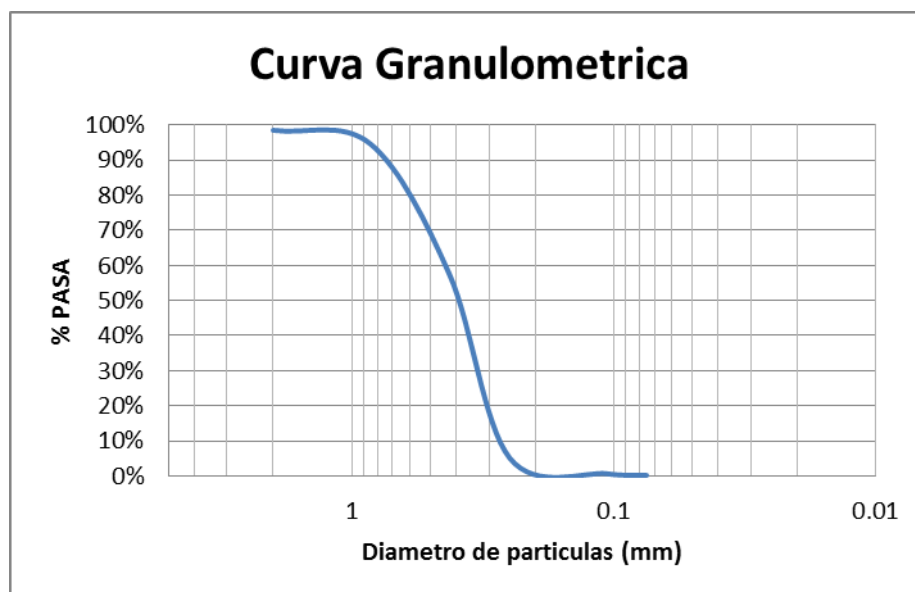
$\rho$  = densidad del líquido ( $\text{kg/m}^3$ )

### b. Distribución granulométrica

Los lechos de los ríos pueden ser granulares o cohesivos. En el primer caso, el lecho está constituido por partículas sueltas de distintos tamaños (Martin Vide, 1997). Para poder caracterizar todos los tamaños es necesario el uso de métodos estadísticos.

La curva granulométrica se obtiene midiendo la distribución de tamaños de las partículas en una muestra representativa (Apaclla, 2014). El procedimiento para obtener la distribución de tamaños, consiste en cerner la muestra de suelo a través de una serie de mallas y pesar la cantidad de suelo retenidas en cada malla (Bowles, 1982).

En la Fig. 3 se muestra el porcentaje en peso del material más fino que un tamaño de sedimento dado. El sedimento de diámetro  $d_{50}$  indica que el 50% en peso del material es menor o igual a  $d$  y es llamado el tamaño medio.



**Figura 3:** Curva granulométricas de sedimento de fondo. Est. El Tigre, Tumbes (07/02/2016); ( $Q = 83.82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

## 1.7. AFORO LÍQUIDO

El caudal fluvial, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo, es la tasa a la que el agua discurre a través de una sección transversal. El caudal en un instante dado puede medirse utilizando varios métodos diferentes, y la sección entre estos dependerá de las condiciones existentes en un emplazamiento dado (OMM, 2011). El método a utilizar en la investigación se explica a continuación.

### 1.7.1. MÉTODO TRADICIONAL

Según Chow *et al.*, (1994) el caudal en un río se calcula utilizando las mediciones de velocidad y profundidad. Una línea de marcación se extiende a través de la corriente. A intervalos regulares a lo largo de la línea, se mide la profundidad del agua utilizando una barra calibrada o bajando una cuerda con contrapeso desde la superficie hasta el lecho del río y luego se mide la velocidad utilizando un correntómetro.

El caudal en una sección transversal de área A se encuentra con:

$$Q = \iint V \times dA \quad 2.9$$

La integral se aproxima sumando los caudales incrementales calculados para cada medición  $i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , de velocidad  $V_i$  y profundidad  $d_i$  (Fig. 4). Las mediciones representa valores promedio a lo largo de un ancho  $\Delta w_i$  de la corriente, luego el caudal se calcula como:

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i \times d_i \times \Delta w_i \quad 2.10$$

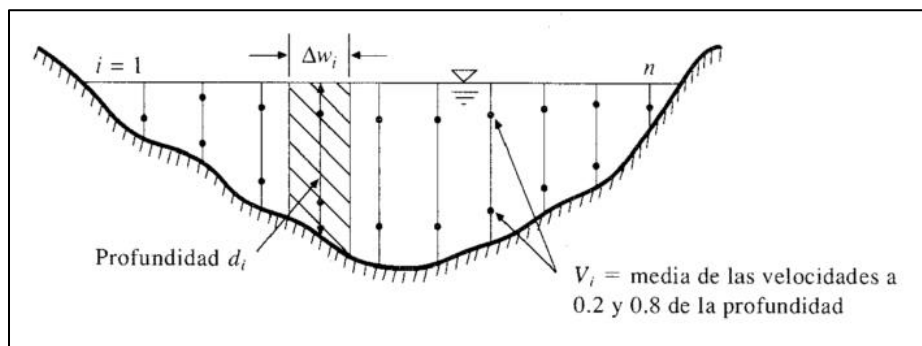


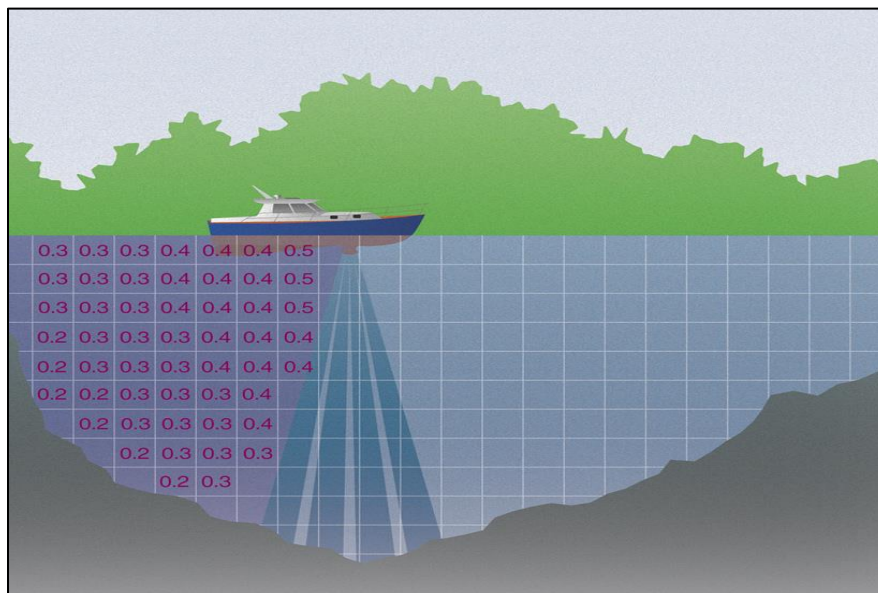
Figura 4: Cálculo de caudal utilizando información de aforo líquido, (Chow *et al.*, 1994)



### 1.7.2. MÉTODOS ACÚSTICOS (EFECTO DOPPLER)

Este método de aforo indirecto (no invasivo) se basa en el denominado Efecto Doppler, llamado así por Christian Andreas Doppler (1842), que consiste en la variación de la longitud de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento. El dispositivo mayormente usado se le denomina perfilador acústico de corriente o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*).

El uso de ADCP para la observación del flujo en los ríos, ha venido siendo más aceptada en los últimos años. Debido a que los aforos con ADCP pueden obtener datos en cortos períodos de tiempo y con alta resolución (Hashiba *et al.*, 2000). El dispositivo transmite un impulso acústico de energía a través del agua de manera semejante a los submarinos, aunque a frecuencias mucho más altas. Esta energía se refleja en las partículas presentes en suspensión en el agua, que se desplazan con esta, y regresan parcialmente al instrumento. Mide el desplazamiento Doppler (variación de la frecuencia) de la energía reflejada, y utiliza ese valor para calcular la velocidad del agua del instrumento; mide simultáneamente la velocidad, profundidad del agua y la trayectoria de la embarcación para calcular el caudal, como se indica en la Fig.5 (Teledyne RD Instruments, 2014).



**Figura 5:** Esquema de un aforo con ADCP, (Teledyne RD Instruments, 2014)

## **1.8. AFORO DE SEDIMENTOS**

Para obtener el conocimiento de la erosión, movimiento y depósito de sedimentos en el suelo, corrientes, almacenamiento y otros cuerpos de agua, es necesario aforar el sedimento transportado tanto en suspensión como en el fondo. La obtención de esta información es costosa, si se compara con otra clase de datos (Unesco, 2010).

Los procesos que rigen el transporte de sedimentos son complejos, como tales, las observaciones precisas del transporte de sedimentos son cruciales para lograr correctamente la comprensión del proceso de transporte de sedimentos (Holmes & Holmes, Robert R, 2010). Para obtener dichas observaciones se cuentan con técnicas de mediciones directas e indirectas así como activas y pasivas. i) Dentro de las técnicas directas, para el aforo del transporte de sedimento de fondo, se encuentra en uso de trampas de fondo, colocación de baldes y uso de Helley-Smith. Estos métodos producen información considerable pero limitada espacialmente debido a que son tomadas en un punto del río y extrapoladas a lo largo de la sección. ii) En las técnicas indirectas se encuentra el uso de Perfiladores Acústicos (ADCP). Los cuales utilizan el efecto Doppler para medir el movimiento de pequeñas partículas en la columna de agua (Curran et al., 2015). El método de aplicación del ADCP puede ser ajustado para que la señal registre el transporte de sedimento en suspensión (Teledyne RD Instruments, 2014a). Además la aplicación de ADCP para medir el transporte de carga de fondo y la forma del fondo son particularmente útiles durante inundaciones.

## **1.9. EVENTOS EXTREMOS**

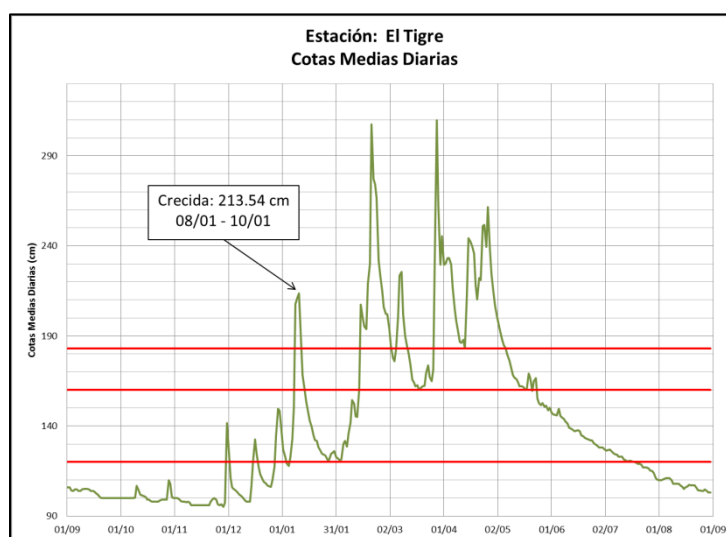
Los eventos hidrológicos extremos desarrollados en la superficie terrestre son de poca frecuencia y gran magnitud. Usualmente están muy relacionados con fuerzas naturales de otros aspectos de la geofísica, como meteorología, oceanografía, y procesos sismológicos. Son siempre complejos en términos de su distribución de agua con tiempo y espacio, sus fases, y sus impactos en el almacenamiento (Cudennec et al., 2015).

Estos eventos hidrológicos, deben ser analizados y explicados en un sentido probabilístico debido a su inherente aleatoriedad. Afortunadamente, métodos estadísticos están disponibles para organizar, presentar y reducir los datos a una forma que facilita su interpretación y evaluación (Bedient *et al.*, 2012)

Un evento puede ser clasificado como extremo basado en sus impactos (incremento en el riesgo de incendios forestales, olas de calor, inundaciones, sequías, etc.), en caso no se cuente con una serie de datos para compararlo. Utilizar uno o más indicadores para caracterizarlo permite conocer de una forma más acertada sus dimensiones.

Un evento hidrológico, es aquel que se da durante el ciclo hidrológico en una cuenca. Los eventos como crecidas, sequías y precipitaciones, se registran para caracterizar a la cuenca. Por ejemplo Marengo & Espinoza (2015), utilizaron la altura de nivel de agua en el Río Negro Manos en una serie histórica de 110 años para determinar los años donde se registraron los niveles más bajos, los que califico como sequías.

Se define un evento extremo como una o varias observaciones en un intervalo de tiempo, que rompe la continuidad media de las observaciones, ya sea aumentando o disminuyendo el indicador o magnitud de la variable analizada. En la cuenca Puyango-Tumbes, las crecidas son comunes durante los meses enero-mayo. Por ejemplo en la base de datos utilizada por Quincho (2015), se registró una crecida entre el 08/01 y 10/04 del año hidrológico 2003-04 (Fig. 6) sin embargo se mantuvo el cauce. Si consideramos un “Evento extremo” por su impacto, esta crecida momentánea, no califica como tal por que no produce un impacto visible. Pero si consideramos el estado anterior y posterior, del río, podemos calificarlas como eventos extremos ya que cumple con la definición anterior expuesta.



**Figura 6: Río Tumbes, Estación “El Tigre”. Líneas rojas indican inicio y fin del evento extremo. Cotas medias diarias (cm) 01/09/2003 – 31/08/2004.**

## **2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

### **2.1. GASTO SÓLIDO TOTAL**

El gasto sólido total es el peso del material (suspensión y fondo) transportado en un curso fluvial por unidad de tiempo, puede ser expresado en t.año<sup>-1</sup>, kg,s<sup>-1</sup>, kg.m<sup>-1</sup>, ...etc. (Quincho, 2015). En la actualidad es posible aplicar formulas empíricas para determinar el gasto sólido total sin separarlo en sus componentes (suspensión y fondo), sin embargo estas fórmulas presentan no contemplan crecidas o eventos extremos, por ejemplo los ocurridos durante el mega El Niño (82-83).

### **2.2. GASTO SÓLIDO EN SUSPENSIÓN**

El sedimento en suspensión son finas partículas que son puestas en suspensión cuando la variación de velocidad de la turbulencia son suficientemente duraderas para mantener las partículas en el interior del fluido sin entrar en contacto con el lecho (Julien, 2010).

Mediante este proceso se pueden desplazar grandes cantidades de material a gran distancia, incluso directamente hasta la desembocadura, ya que debido al escasísimo peso de las partículas, el desplazamiento no se interrumpe a no ser que la turbulencia se reduzca drásticamente como consecuencia de una sustancial disminución de la velocidad de la corriente (Espinoza, 2004).

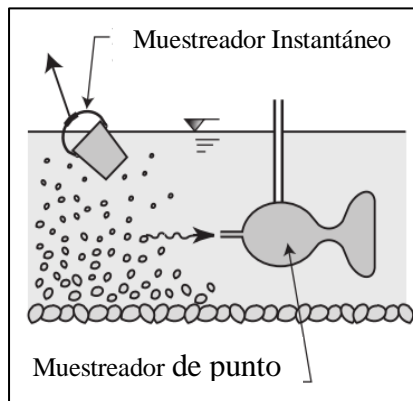
La cantidad de sedimentos contenida en suspensión en el flujo puede ser medida da partir de muestras representativas de agua mezclada con sedimentos. Las muestras son divididas en 3 tipos de acuerdo al tipo de concentración que se desea obtener (Julien, 2010).

#### **2.2.1. MUESTREADOR INSTANTÁNEO**

Los muestreadores instantáneos capturan un volumen de sedimentos en el flujo a través de un tubo cilíndrico, cerrado simultáneamente por ambos lados. Muestras con un recipiente en la superficie también resulta en muestra instantánea. La muestra es filtrada y secada para obtener una medida de concentración de sedimentos en función del volumen (Julien, 2010).

#### **2.2.2. MUESTREADOR PUNTUAL**

Son diseñados para coleccionar muestras en un tiempo establecido en un punto determinado en una vertical en el flujo. La muestra secada mide la concentración de sedimentos promedio en función del tiempo. El muestreador contiene aire el cual es comprimido por el líquido entrante de forma que la presión se equilibra con la presión hidrostática (Julien, 2010).



**Figura 7: Muestreador instantáneo y de punto (Julien, 2010).**

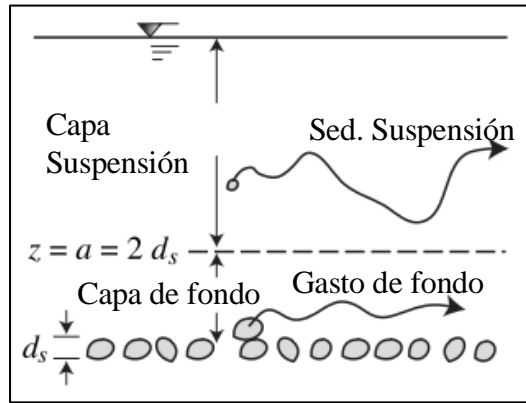
### 2.2.3. MUESTREADOR INTEGRADOR

Los muestreadores integrados se mueven verticalmente a velocidad constante con una boquilla apuntando aguas arriba. Bueno muestreadores están diseñados para mantener condiciones isocinéticas. De tal forma, que la velocidad de la muestra tomada es igual a la velocidad natural del flujo en cada punto. La muestra es secada para medir la concentración de sedimentos promedio en función al flujo. (Julien, 2010)

Un método relativamente nuevo para determinar in situ la concentración de sedimentos en suspensión consiste en la utilización de medidores ópticos. El funcionamiento de estos instrumentos está basado en el principio de que un haz de luz visible emitido por una fuente de intensidad constante es dispersado y/o absorbido por las partículas de los sedimentos en suspensión (OMM, 2011).

### 2.3. GASTO SÓLIDO DE FONDO

Las partículas no cohesivas del lecho entran en movimiento tan pronto como el esfuerzo cortante aplicado al material de fondo excede el esfuerzo crítico. Las partículas de arena y grava se deslizan y ruedan en una capa delgada llamada capa de fondo. Gasto de fondo se refiere al transporte de partículas sedimentarias las cuales siempre están en contacto con el lecho. El gasto sólido puede ser tratado por métodos determinísticos o probabilísticos. Los métodos determinísticos fueron propuestos por DuBoys y Meyer-Peter Muller; métodos probabilísticos fueron desarrollados por Kalinske y Einstein (Julien, 2010). Según Espinoza, (2004) la formulaciones tienen resultados muy dispares en algunos casos. Esta disparidad se debe a las diferentes condiciones de experimentación y/o medida, selección de variables, etc., en la obtención o establecimiento del método de cálculo.



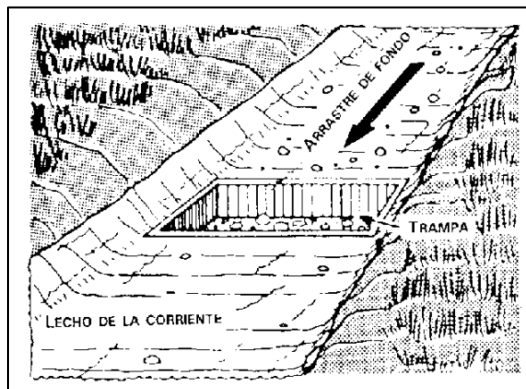
**Figura 8:** Esquema del transporte de suspensión y de fondo (Julien, 2010).

### 2.3.1. TIPOS DE AFORO DE SEDIMENTO DE FONDO

Monitorear el transporte de sedimento de fondo es difícil, debido a su naturaleza estocástica del movimiento del sedimento. Actualmente existe gran cantidad de equipos de medición que han sido desarrollados para medir el transporte de sedimento de fondo. Muy pocos de los equipos de medición desarrollados son aceptados universalmente, por ello se hace necesario utilizarlos con extremo cuidado y dentro de su rango de aplicación (OMM, 2011).

#### a. Medición directa

La forma más sencilla de calcular el arrastre de fondo consiste en cavar un agujero en el lecho de la corriente como en la Fig. 9 y en retirar y pesar el material que cae en él. La cuenca aguas arriba de un vertedero o canal de aforo puede actuar análogamente como una trampa de sedimentos, pero es posible que no se sepa si se ha recogido todo el arrastre de fondo. En lugares como grandes cargas de arrastre, este procedimiento puede necesitar mucho tiempo y resultar engorroso.

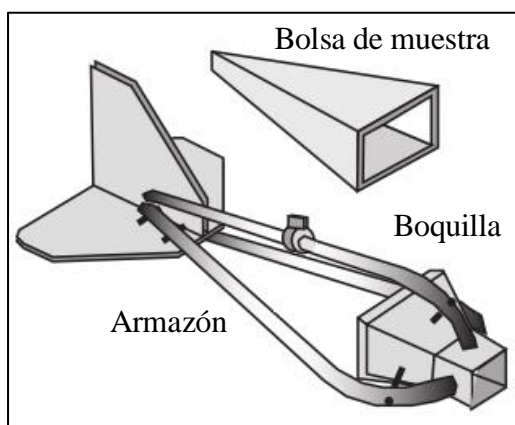


**Figura 9:** Muestreador trampa de arrastre de fondo (Fuente: FAO)

**b. Muestreador tipo trampa:**

Muestreador tipo trampa Helley Smith (Fig. 10), es el más usado en las mediciones del transporte de sedimentos de fondo. Consiste en una tobera, una bolsa para muestras y un bastidor. Sus aletas traseras y su colar corredizo permiten orientarlo y balancearlo de acuerdo con las condiciones de flujo. Existen varias versiones para diferentes condiciones de campo. Para el estudio realizado por Quincho, (2015) se utilizó el muestreador (404- 018 Helley Smith 8035 3”x3”), el cual será utilizado también para el presente estudio.

Los métodos para bajar los Muestreadores al fondo de las corrientes son similares a los que se usan con los molinetes para medición de velocidades de flujo, esto es suspensión con cable y suspensión con varilla. La suspensión con cable puede hacerse desde botes, puentes y canastillas. La suspensión con varilla es indicada para el muestreo en corrientes poco profundas (Emmett, 1980)



**Figura 10: Muestreador de fondo Helley-Smith (Emmett, 1980)**

**2.3.2. USO DE ADCP PARA DETERMINAR EL TRANSPORTE DE FONDO**

El transporte de sedimento de fondo es un aspecto fundamental de los ríos. La distribución espacio-temporal del material transportado en el río determina la morfología del mismo (Rennie, 2004).

La carga de fondo es difícil de medir, especialmente por mediciones directas. Es altamente variable en espacio y tiempo a lo largo del río, por lo que todo esquema de muestreo debe tener esto en cuenta. Esta variabilidad se incrementa cuando se toma en cuenta la forma del lecho. El aforo del sedimento de fondo pueden ser aforados de forma indirecta utilizando alguna clase de sensor remoto (Holmes & Holmes, Robert R, 2010)

Estudios previos [Rennie, 2004; Gaeuman & Jacobson, 2006; Ramoos & Rennie, 2010] sugieren que podría ser práctico medir el transporte de sedimento de fondo usando aforos obtenidos con un perfilador acústico Doppler (ADCP). El uso de un ADCP ofrece muchas ventajas sobre los métodos tradicionales. Un aforo realizado a lo largo de la sección del río puede ser terminado en minutos además, la gran cantidad de información tomada por el ADCP permite reducir la variabilidad espacial y temporal a una escala más pequeña. Al ser un instrumento remoto, los aforos pueden ser realizados en ubicaciones y condiciones hidráulicas donde los métodos convencionales son inconvenientes. La tecnología acústica es también no intrusiva, por lo tanto no interfiere con el proceso del transporte de sedimentos.

El ADCP puede determinar por separado la velocidad del bote y la velocidad del flujo utilizando la función bottom-track (BT). La condición para la función es el lecho debe ser inmóvil. Sin embargo, la precisión de la medición de la velocidad del flujo se reduce en condiciones de lecho móvil (Okada, 2017). Para realizar mediciones en condiciones de lecho móvil se utiliza un GPS diferencial para determinar con precisión la posición del bote.

### 2.3.3. GASTO SÓLIDO DE FONDO POR EGASHIRA

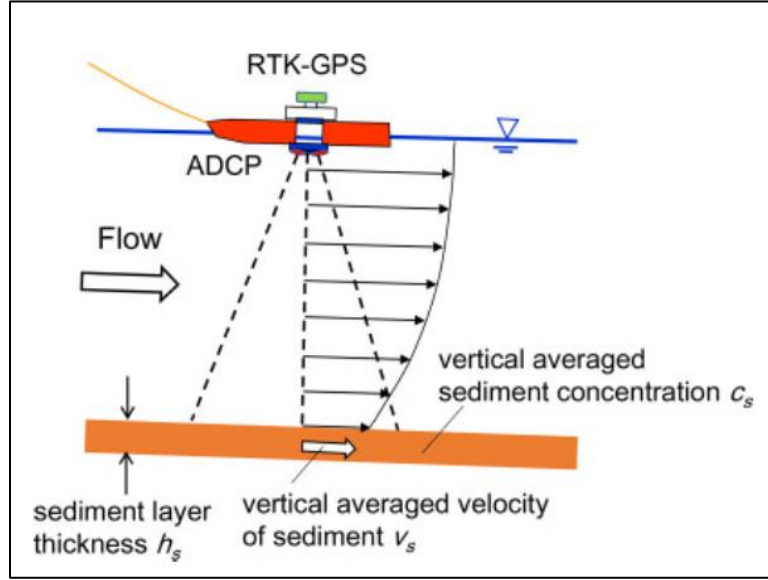
Durante condiciones de fondo móvil, la función BT puede ser utilizada para otros cálculos además la medición del caudal. Por ejemplo, la velocidad del fondo móvil puede ser determinada por la diferencia entre la velocidad determinada por el BT y la determinada por GPS. Rennie *et al.*, (2002) fue el primero en utilizar esta relación para determinar la velocidad del fondo móvil. Sin embargo para calcular el transporte de fondo, es necesario tomar en cuenta el ancho de la capa móvil (Okada, 2017).

En la Fig. 11 se muestra un diagrama conceptual de la medición del transporte de fondo usando un ADCP. Egashira *et al.*, (1997) determino el transporte de fondo como el “movimiento del sedimento” multiplicado por el “ancho de la capa de fondo” y su concentración.

$$q_b = \int_0^h c \times u \times dz \cong v_s \times h_s \times c_s \quad 2.11$$



Donde  $q_b$  es la unidad de transporte de fondo ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ),  $c$  es la concentración de sedimentos,  $u$  es la velocidad del sedimento de fondo y  $h_s$  es el ancho del lecho móvil. Además,  $v_s$  es la velocidad del sedimento en la vertical, y  $c_s$  es la concentración de sedimento promedio en la capa móvil.



**Figura 11: Diagrama conceptual de la medición del transporte de fondo con ADCP (Okada, 2017)**

La Ecuación (2.11) tiene tres componentes, velocidad del transporte de sedimento  $v_s$ , el ancho del lecho móvil  $h_s$ , y la concentración de sedimentos  $c_s$ . El ancho del lecho y la concentración están determinados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{h_s}{d} = \frac{\tau_*}{c_s K_1} \quad 2.12$$

$$\frac{u_s}{u_*} = \frac{4}{15} \frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_* \quad 2.13$$

$$K_1 = \frac{1}{\cos(\theta) \left[ \frac{\tan(\phi_s)}{1 + \alpha} - \tan(\theta) \right]} \quad 2.14$$

$$K_2 = \frac{1}{c_s} \sqrt{1 - \frac{h_s}{h_t}} \quad 2.15$$

$$f_d = k_d(1 - e^2) \left( \frac{\sigma}{\rho} \right) c_s^{1/3} \quad 2.16$$

$$f_f = k_f(1 - c_s)^{5/3} c_s^{1/3} \quad 2.18$$

Donde  $q_b$  = transporte de fondo;  $u_s$  = velocidad promedio del sedimento de fondo;  $c_s = c^*/2$  concentración de sedimentos promedio por el ancho del lecho  $h_s$ ;  $c^* = 0.6$  concentración de sedimentos en la capa inmóvil;  $d$  = tamaño de la partícula;  $\phi_s$  = ángulo de fricción entre partículas;  $\theta$  = pendiente;  $k_d = 0.0828$ ;  $k_f = 0.16$ ;  $e = 0.85$  coeficiente de restitución;  $h_t$  = tirante;  $\sigma$  = densidad en masa las partículas del sedimento;  $\rho$  = densidad en masa del agua;  $\tau^*$  = esfuerzo cortante adimensional;  $\alpha = 0.25$  constante de presión dinámica/estática;  $u_*$  = “shear velocity” (Koseki *et al.*, 2016).

Según VanRijn, (1993) la concentración promedio del sedimento ( $C^*$ ) en la capa del transporte de fondo se puede determinar por la ecuación (2):

$$C_b = C_s = 0.18 C_o \frac{T}{D_*} \quad 2.19$$

Dónde  $C_b$  = Concentración del sedimento de fondo (volumétrico);  $C_o$  = Máxima concentración volumétrica (0.65);  $T$  = Esfuerzo cortante del lecho (adimensional);  $D_*$  = Tamaño de partícula (adimensional).

#### 2.3.4. GASTO SÓLIDO DE FONDO POR RENNIE

Las velocidades del ADCP son medidas con relación al marco de referencia que utilice el instrumento. Si el instrumento va montado en una plataforma móvil, como una embarcación, las velocidades obtenidas deben ser corregidas para la velocidad del bote para obtener velocidades absolutas. La velocidad del bote puede ser determinada por la función bottom tracking (vBT) o usando datos de un GPS diferencial (vDGPS). La velocidad obtenida por bottom tracking es precisa solo en lechos inmóviles. En condiciones de lecho móvil, la aparente velocidad del sedimento de fondo ( $v_a$ ) se puede obtener si la velocidad del bote es conocida, ya sea por DGPS o manteniendo el ADCP estacionado (Rennie *et al.*, 2002)

$$v_a = v_{DGPS} - v_{BT} \quad 2.20$$

Donde  $v_a$  es la velocidad aparente de desplazamiento del fondo,  $v_{DGPS}$  es la velocidad del bote obtenida con DGPS y  $v_{BT}$  es la velocidad del bote obtenida con la función BT del ADCP.

Según Rennie et al., (2002) es posible calcular el gasto sólido de fondo por unidad de ancho,  $g_b$ , cuando se conocen los valores de la velocidad actual promedio de lecho móvil ( $v_B$ ), espesor de la capa de fondo en movimiento ( $d_a$ ) y porosidad ( $\lambda_a$ ) de la capa activa del transporte y la densidad de las partículas de sedimento ( $\rho_s$ ):

$$g_b = v_B d_a (1 - \lambda_a) \rho_s \quad 2.21$$

Debemos asumir que la velocidad aparente del fondo obtenida con la ecuación (2.20) es acorde con la velocidad real del fondo,  $v_B$ . Adicionalmente, a pesar de que la porosidad y profundidad de la capa móvil de fondo no han sido medidas directamente, se entiende que ambos parámetros así como la densidad del sedimento, no experimentan gran variabilidad (Rennie et al., 2002). De este modo, utilizando la velocidad del fondo obtenida por bottom track (Ecuación 2.20) y valores de tasas de transporte de fondo obtenidas por métodos tradicionales es posible calibrar el modelo así como plantearse regresiones en ambas variables para determinar valores de carga de fondo a mayores velocidades o profundidades.

#### 2.4. GASTO SÓLIDO EN FUNCIÓN DEL GASTO LÍQUIDO

Según Lewis & Saunders, (1989) la relación entre el transporte de sedimentos y el caudal líquido puede ser representada en general con una función de potencia.

$$Q_{sólido} = \alpha \times Q_{líquido}^\beta \quad 2.11$$

$Q_{sólido}$ : transporte de sedimento

$Q_{líquido}$ : caudal líquido

$\alpha$  : constante de la ecuación

$\beta$  : exponente de la ecuación

Cuando el exponente de la ecuación  $\beta$  es 1.0 la concentración se mantiene constante. Sin embargo son posibles tres tipos de desviaciones.

Exponente  $>1$ , indica que las concentraciones crecen cuando las descargas se incrementan (efecto purga).

Exponente  $>0$  y  $<1$ , indica que decrecen las concentraciones cuando las descargas aumentan, pero la proporción es menos rápida que el incremento de la descarga (efecto dilución).

Exponente  $<0$ , indica que las concentraciones decrecen rápido con el correspondiente incremento en la descarga, entonces el transporte declina cuando las descargas aumentan (efecto conservación)

### **3. PROGRAMAS HYDRACCES E HYDROMESAD**

El programa HYDRACCES, permite importar y almacenar varios tipos de datos hidrológicos en una base de datos Microsoft Access, y realizar todos los procesos hidrológicos básicos. Su desarrollo empezó en el año 2000 por el hidrólogo Philippe Vauchel del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD). Este programa, además, de manejar un banco de datos, ofrece muchos tratamientos básicos como el Vector regional, que permiten hacer los análisis, la crítica y el tratamiento de la información. El HYDRACCES permite analizar la información hidrométrica de la siguiente manera:

- Almacenar características de estaciones (ubicación, cuenca, río, administrador, informe, histórico, inventario de datos disponibles, etc)
- Calcular datos diarios, mensuales y anuales a partir de datos instantáneos (con el método de trapecios)
- Exportar a Excel los aforos, a partir de los caudales se puede elaborar curvas de calibración.
- Utilizar las curvas de calibración para traducir las cotas en caudales.

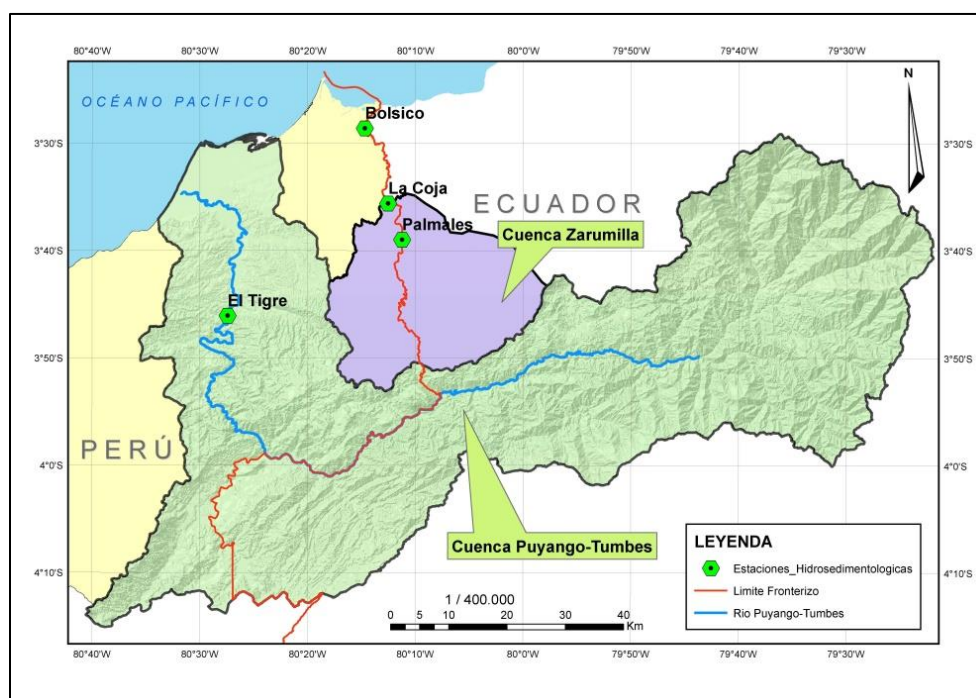
El programa también incluye algunos utilitarios que permiten hacer un tratamiento avanzado de la información (caudales líquidos y sólidos). El programa HYDROMESAD según Vauchel, (2009) permite combinar aforos realizados por un Perfilador Acústico Doppler (ADCP) con información de concentración de sedimentos en suspensión, de forma espacial en la sección transversal del río, es decir es posible generar líneas de contorno de concentración en la sección hidrométrica del río.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

##### 1.1. UBICACIÓN

El área de estudio se localiza en el norte del Perú en la región Tumbes, cuenca binacional Puyango-Tumbes. En la Fig. 12 se muestra la ubicación del área de estudio.



**Figura 12:** Ubicación del área de estudio

La cuenca del río Puyango-Tumbes se encuentra ubicada en el departamento de Tumbes en el Perú y las provincias del Oro y Loja en Ecuador. Su extensión total es 5530 km<sup>2</sup> de los cuales el 65 por ciento del área es ecuatoriano y un 35 por ciento es peruano. En la parte alta el río Puyango es nombrado río Grande hasta alcanzar la unión con el río Yaguachi, luego es denominado Puyango hasta la confluencia con la quebrada Cazaderos y finalmente toma el nombre de río Tumbes hasta la desembocadura con el Océano Pacífico (Núñez J & Zegarra L, 2006).

## **1.2. BASE DE DATOS Y PERÍODO DE MUESTRÉO**

Para el desarrollo de la presente tesis se utilizaron datos de caudales líquido y de sedimentos en suspensión y de fondo históricos durante el período comprendido desde el día 04/02/2004 hasta el 31/05/2016. De la base datos, para caudal líquido y sedimentos desde el 04/02/2004 al 21/11/2013 son datos históricos del Instituto Geofísico del Perú (IGP), del 01/01/2014 al 21/05/2014 fueron generados por Quincho, (2015) y del 22/01/2016 al 31/05/2016 fueron obtenidos para esta tesis. En el Anexo 5 se presenta más información con respecto a la base de datos.

## **1.3. RECURSOS HIDROLÓGICOS SUPERFICIALES**

El río Tumbes es el único río navegable de la costa peruana. La precipitación anual de la cuenca Puyango-Tumbes está en el orden de 300 mm en la parte baja, 1150 mm en la parte media y 2600 mm en zonas altas de montaña del sector ecuatorial. Las precipitaciones en general se concentran de 85 por ciento a 95 por ciento entre los meses de enero a marzo (Núñez J & Zegarra L, 2006).

A nivel anual la estación El Tigre (río Tumbes) registra un caudal medio anual de 111.47 m<sup>3</sup>/s representativo al período 1969-1999 (Acuña A. *et al.*, 2007). A nivel mensual la estación El Tigre (río Puyango-Tumbes) registra un caudal medio mensual de 114.0 m<sup>3</sup>/s un máximo mensual de 336.3 m<sup>3</sup>/s en el mes de marzo y un mínimo mensual de 19.6 m<sup>3</sup>/s en el mes de octubre. El caudal medio mensual durante período de avenidas entre enero y abril es de 245.1 m<sup>3</sup>/s (Núñez J & Zegarra L, 2006).

La temperatura media anual de la cuenca Puyango-Tumbes en la parte peruana con una base de seis estaciones (Cabo, Inga, Cañaverl, El Caucho, Los Cedros, Puerto Pizarro y Rica Playa) es de 24.16°C (Núñez J & Zegarra L, 2006)

La humedad relativa media anual en la cuenca Puyango-Tumbes varia de 72 a 82 por ciento; velocidad de viento con fluctuaciones de 2.5 a 55 m/s; las horas de sol fluctúan de 176 a 192 he/año; la evapotranspiración de referencia varia de 145 mm/mes a 165 mm/mes durante diciembre a mayo y los menores de 105 mm/mes a 125 mm/mes de mayo a diciembre. El coeficiente de cultivo varia de 0.77 a 0.88 durante enero-abril, de 0.82-0.92 de mayo a agosto y de 0.76-0.92 de setiembre a diciembre, (Acuña A. *et al.*, 2007).

En la Tabla 1 se resumen los parámetros morfológicos de la cuenca Puyango-Tumbes.

**Tabla 1: Resumen de parámetros morfológicos de las cuencas Puyango-Tumbes (PEBPT, 2012)**

<b>Parametro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Puyango-Tumbes</b>		<b>Descripcion</b>
Área	Km <sup>2</sup>	5530		Mediana
Perímetro	km	620		Mediana
Long.cauce principal	km	247.5		Perú: Río Tumbes Ecuador: Río Puyango
Ancho promedio	km	22.5		Ancha en parte alta
Coef. capacidad	-	2.3		
Factor forma	-	0.1		
Elev. media	msnm	924.7		Baja elevación
Pendiente del cauce principal	%	Parte baja	Parte media-alta	Baja: Perú Alta: Ecuador
		0.2	7.6	
Orden de las corrientes	-	4		
Densidad de drenaje	-	0.29		

## 2. MATERIALES

### 2.1. MATERIALES DE LABORATORIO Y CAMPO

- Balanza analítica.
- Muestreador de fondo Helley Smith (Helley-Smith 8035 3"x3")
- Cable de acero
- Perfilador de corriente acústico Doppler Workhorse Río Grande – 1200 kHz (ADCP por sus siglas en ingles)
- Frascos y bolsas ziplox para muestras
- Filtros de 22 micras de porosidad-celulosa
- Estufa
- Bomba de vacío
- Agua destilada
- Cámara fotográfica

### 2.2. MATERIALES DE GABINETE

- Información de aforos de caudal líquido y sólido, proporcionado por el IGP, IRD y Proyecto especial Binacional Puyango Tumbes.
- GeoData base de la región Tumbes
- Libreta de apuntes
- Equipo de hardware
- Una laptops – ASUS Windows 8.1 – corei5

### **3. METODOLOGÍA**

La dinámica del transporte de sedimentos se puede obtener mediante el análisis en conjunto del gasto líquido (Ql), gasto sólido en suspensión (Qss), gasto sólido de fondo (Qsf) y batimetría. En la Fig. 13 se muestra un mapa conceptual de las metodologías empleadas.

#### **3.1. DESCRIPCIÓN CAMPAÑA DE CAMPO (12/2015 – 05/2016)**

Todo el trabajo de campo se realizó en la estación “El Tigre” la que se ubica en el centro poblado Higuerón perteneciente a la provincia de Tumbes. Cuenta con una regla para el registro de cotas diarias y con un sistema de carro huaro para realizar aforos líquidos con correntómetro. Este sistema de carro huaro se utilizó también para realizar aforos con el ADCP así como la recolección de muestras diarias de sedimentos en suspensión y de fondo. Esta estación es utilizada por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT).

##### **3.1.1. CAMPAÑA DE CAMPO (17-19/12/2015)**

Comprendió:

- Reconocimiento de campo y ubicación de la estación de monitoreo “El Tigre”
- Montaje y prueba de campo del ADCP Workhorse Río Grande.
- Capacitación en el uso, armado y mantenimiento del ADCP.
- Capacitación de los técnicos para la medición del flujo sólido en suspensión y de fondo y líquido.

El objetivo principal de esta campaña fue realizar la primera prueba de campo con el ADCP para realizar aforos líquidos en la estación El Tigre, y consistió en realizar el montaje, calibración y puesta en funcionamiento del equipo.



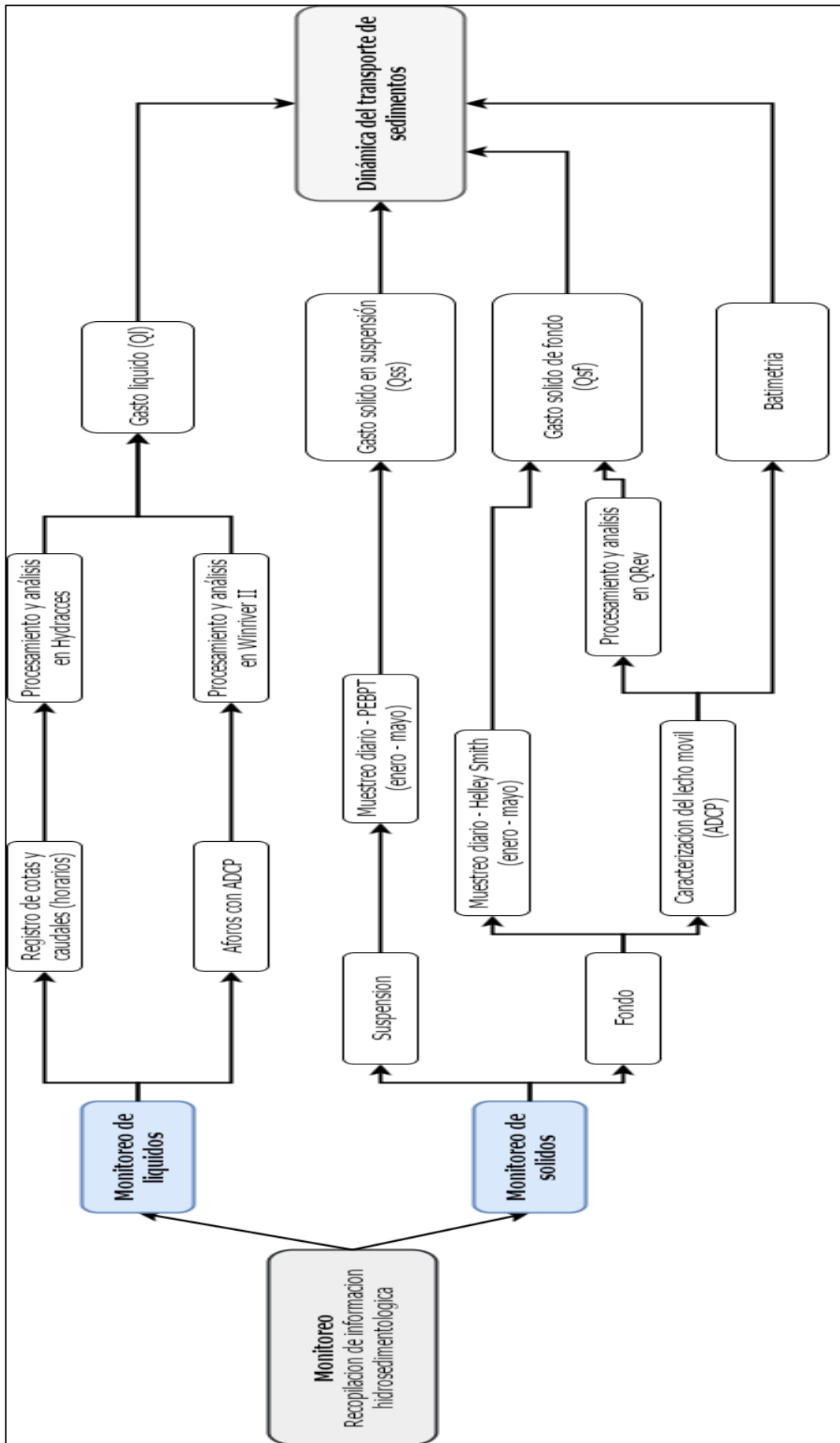


Figura 13: Metodología para estimar el gasto sólido total

### 3.2. MONITOREO DE LÍQUIDOS

#### 3.2.1. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA UTILIZADA

Se utilizó una base de datos hidrométricos en formato Hydracces. Esta base de datos contiene registros de caudales, cotas instantáneas y diarias de la estación El Tigre (2004-2014) fue proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Durante todo la campaña de muestro (enero a mayo del 2016), registros complementarios de caudales y cotas, fueron proporcionados por el Proyecto Binacional Puyango Tumbes. Esta información fue adicionada a la base Hydracces, con lo cual se actualizó la curva de calibración de gasto líquido en función de cotas para la estación El Tigre.

#### 3.2.2. GASTO LÍQUIDO ESTACIÓN EL TIGRE

Con la base de datos Hydracces completa se realizaron las curvas de calibración mensuales (caudal en función de la cotas) para los meses de enero a marzo del 2016. El software Hydracces permite generar y calibrar curvas de calibración en intervalos de días, meses o años. Utiliza los registros de cotas y caudales introducidos en su base de datos. En la Fig. 14 se muestran las curvas de calibración, con registros de aforos desde 1995 hasta el 2016. Las curvas no se cruzan y para caudales mayores son paralelas entre así. Los cambios en el cauce generan descalibraciones que afectan más a los caudales bajos que a los altos.

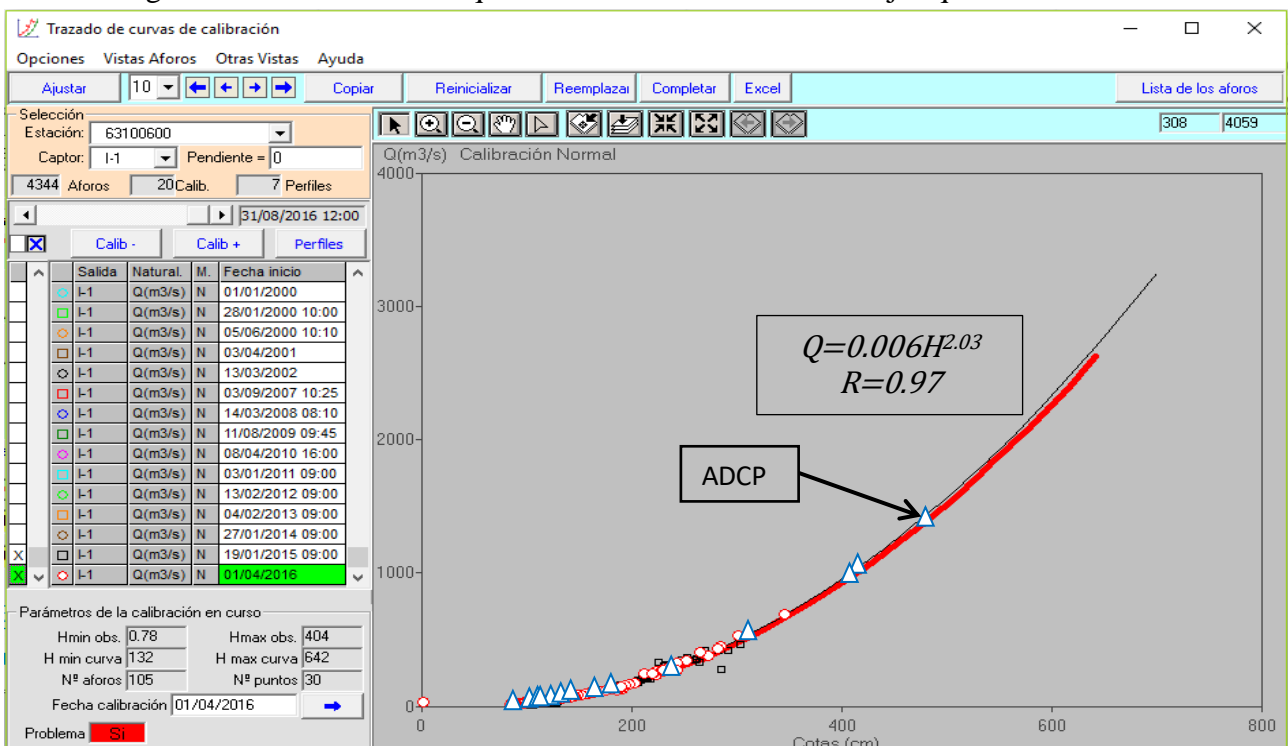
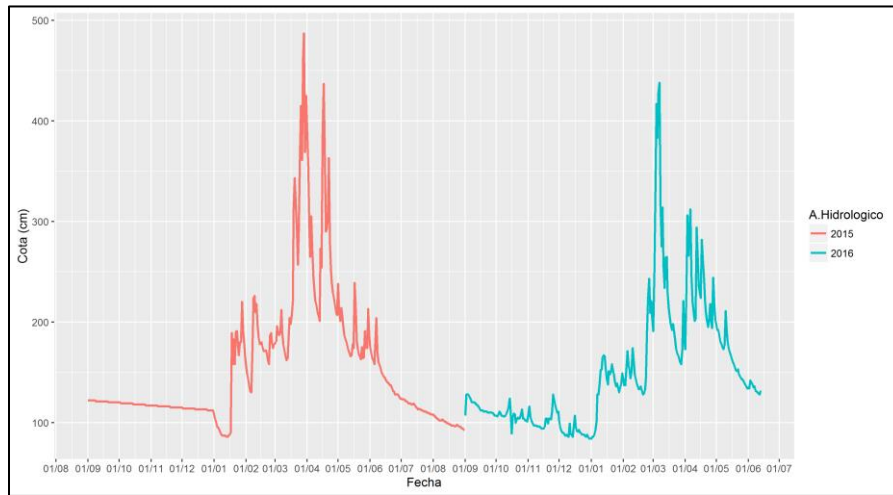


Figura 14: Curvas de calibración, estación El Tigre (1995 – 2016), software HYDRACCES, (Datos: IGP, Anexo 5).

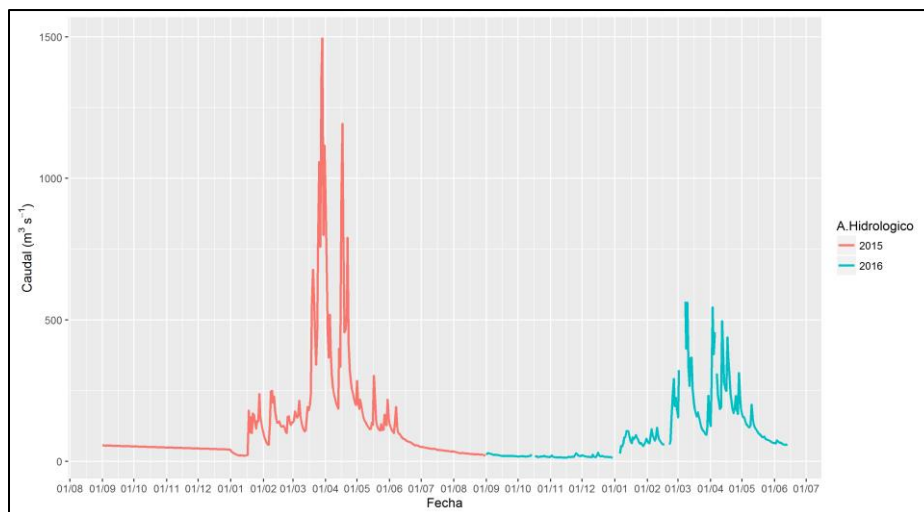
**a. Caudales Instantáneos**

Para calcular los caudales instantáneos se utilizaron las curvas de calibración y los registros de cotas diarias dentro del software Hydracces. El nivel máximo registrado durante el período de monitoreo en 2016 fue de 4.38 m, el día 07/03, coincidiendo en el período de crecidas. En la Fig. 15 se muestra la variación del nivel de agua durante el período de crecidas del 2015 y 2016.



**Figura 15: Variación del nivel de agua, estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).**

En la Fig. 16 se muestran los caudales instantáneos calculados a partir de las curvas de calibración. El máximo caudal registrado durante el período de muestreo es de  $564.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , correspondiente al día 08/03/2016.



**Figura 16: Variación de caudales diarios, estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).**

### **3.3. MONITOREO DE SEDIMENTO DE FONDO**

El monitoreo de sedimento de fondo resulta una tarea difícil, debido a que demanda mucho tiempo y recursos, sin embargo el uso de tecnología tradicional, como el muestreador tipo Helley-Smith, y tecnología innovadora como ADCP, permite realizar monitoreo de forma más rápida y con resultados más confiables. La campaña de muestreo se realizó durante la época húmeda (enero-mayo/2016) en la estación El Tigre, los datos generados durante la campaña de muestreo fueron agregados a los proporcionados por el IGP. Durante la campaña de muestreo se utilizaron tres metodologías para determinar el gasto sólido de fondo. A continuación se detalla la selección del tipo de muestreador, protocolo de muestreo, metodologías para el procesamiento de información de ADCP y análisis de muestras para obtener el gasto sólido de fondo.

#### **3.3.1. SELECCIÓN Y UBICACIÓN DEL MUESTREADOR**

El muestreador utilizado fue diseñado y construido por Quincho, (2015). Los requisitos técnicos que se utilizaron para la selección (Pan *et al.*, 2016) son:

- El muestreo debe ejercer la mínima perturbación en el flujo, especialmente en las proximidades de la boca del muestreador.
- El muestreador debe tener un diseño simple y ser robusto, la versión portátil debe ser suficientemente fuerte y fácil de operar.
- El tamaño de la entrada debe ser adecuada para hacer frente a la medición de sedimento de suspensión y también ser al menos 1.5 veces el tamaño máximo del sedimento de fondo.

El muestreador seleccionado es tipo trampa Helley Smith 76x76 mm cumple con las características anterior mencionadas. Está compuesto por un marco de acero, una malla de 0.2 mm de poliéster y una boquilla (Emmett, 1980).

La ubicación del muestreador fue determinada mediante aforos realizados con ADCP. Con los aforos se buscó determinar la distancia con respecto de margen izquierdo a la ubicación donde se dan las mayores velocidades. La mayor velocidad registrada fue de 0.8 m s<sup>-1</sup>. Las mayores velocidades se registraron en el centro de la sección, siendo el valor máximo de 1.4 m s<sup>-1</sup>. La profundidad media donde se registraron fue de aproximadamente 0.8 m y la

máxima profundidad fue de 1.6 m, cercana a la margen derecha de la sección (Quincho, 2015).

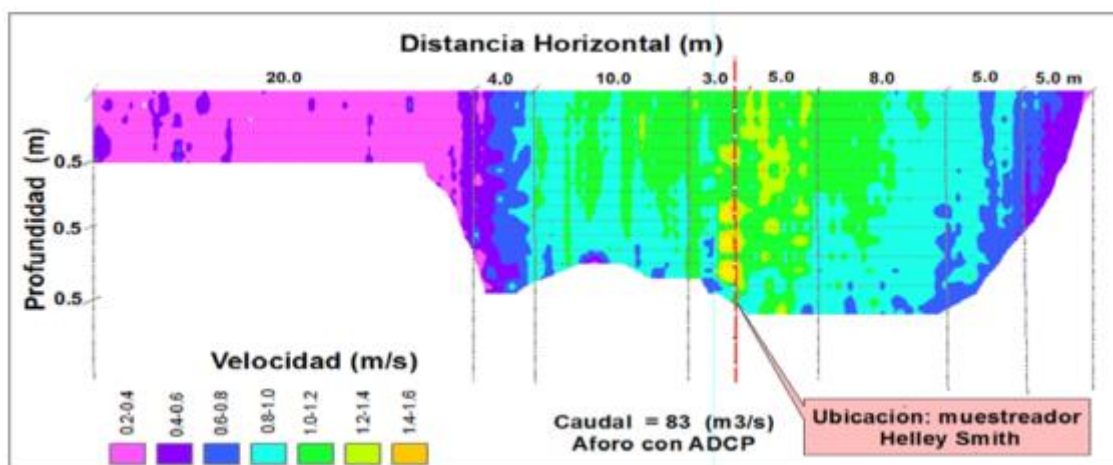


Figura 17: Distribución de velocidades promedio y ubicación de la vertical de muestro con Helley-Smith en la estación El Tigre (12/04/14) (Quincho, 2015)

### 3.3.2. PROCESAMIENTO EN LABORATORIO DE MUESTRAS

Se tomaron muestras de sedimento de fondo durante enero – abril del 2016. Se enviaron las muestras a la ciudad de Lima para ser procesadas en la UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina), para ello se contó con el apoyo del laboratorio del Proyecto Hybam.

Para el procesamiento de las muestras se utilizó el procedimiento expuesto por Vericat *et al.*, (2006).en

- Secado 1: Secado de muestras a temperatura ambiente
- Secado 2: Se trasladaron las muestras a un recipiente para su secado a estufa (120°C)
- Pesado: Se pesaron las muestras en kilogramos

### 3.3.3. ECUACIÓN PARA CUANTIFICAR EL GASTO SÓLIDO OBSERVADO

Se utilizó la ecuación (3.1) de Iroume,( 2003), la cual considera el peso de la muestra (P), el ancho de boquilla del Helley-Smith (b), tiempo de toma de muestra (t), el ancho de la sección de aforo (B) y numero de muestras (n).

La ecuación será mejorada con aforos realizados con ADCP, de forma que considere con mayor precisión la longitud efectiva de transporte de sedimento de fondo.

$$Q_{sf} = \frac{P(kg) \times B(m)}{n \times t(min) \times b(m)} \quad 3.1$$

**Tabla 2: Parámetros de cálculo del muestreador de fondo Helley-Smith (El Tigre)**

Símbolo	Descripción	Valores	Unidades
P	Peso	Peso seco de la muestra	kilogramos
B	Ancho transporte	Ancho de mayor transporte	metros
N	Numero de sub muestras	1 muestra por la sección	-
t	Tiempo	Tiempo de muestreo	minutos
b	Ancho boca Helley Smith	0.0762	metros

### 3.3.4. CÁLCULO DEL GASTO SÓLIDO UTILIZANDO MUESTRAS DE HELLEY-SMITH Y AFOROS CON ADCP

#### a. Uso de ADCP para complementar el cálculo con muestreador Helley-Smith

En la presente investigación se utilizó el ADCP Workhorse Río Grande 1200kHz. El mismo ADCP fue utilizado por (Ramooz & Rennie, 2010) en ensayos de laboratorio, para medir el transporte de sedimento de fondo. Estos ensayos demostraron que existe una correlación razonable entre valores del transporte de fondo determinado por ADCP y aforos directos, con un coeficiente de correlación ( $r^2$ ) entre 0.59 a 0.93 para lechos de arena.

Además, con los parámetros de operación: frecuencia y longitud de onda, se obtienen resultados más confiables con ADCP 1200 kHz y longitud de onda igual al 20% de la distancia del ADCP al lecho. Esta configuración produce la más alta correlación con las mediciones del transporte de sedimentos en los ensayos con lechos de arena (Ramooz & Rennie, 2010).

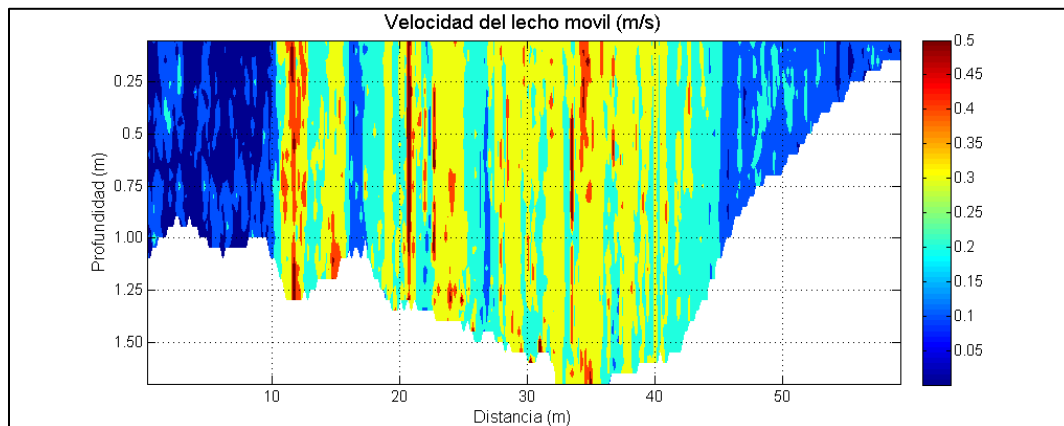
#### b. Cálculo del transporte de sedimento de fondo

La estimación se basa en utilizar aforos obtenidos por ADCP (Tabla 3) y toma de muestras con Helley-Smith del sedimento de fondo. Se utilizó el software QRev (Mueller *et al.*, 2016) para exportar a Matlab las velocidades aforadas. Para determinar la velocidad del lecho móvil se utilizó parte de la metodología realizada por Gaeuman & Jacobson, (2006), la cual se detallará a continuación.

**Tabla 3: Aforos realizados con ADCP Workhorse Río Grande, (Datos: IGP, Anexo 5).**

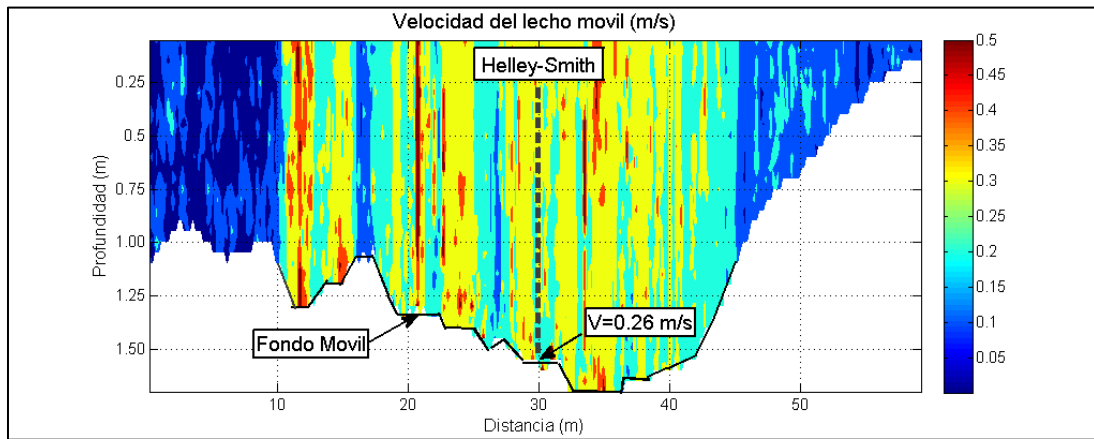
Fecha	V. Fondo (m/s)	V. Aforo (m/s)	Area mojada (m <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
18/12/2015	0.28	0.22	108.5	24.12
28/01/2016	0.26	0.53	110.2	58.11
02/02/2016	0.33	0.51	117.2	59.50
26/01/2016	0.39	0.58	123.7	71.80
01/02/2016	0.24	0.55	118.1	65.33
09/02/2016	0.39	0.64	137.5	87.65
05/02/2016	0.31	0.76	138.2	106.97
07/04/2016	0.41	1.39	219.7	305.40

La velocidad del lecho fue calculada para cada aforo con ADCP, sustrayendo la velocidad tomada por GPS de la velocidad con respecto al lecho (bottom track), para cada celda en el transecto. Los componentes de la velocidad en direcciones norte-sur y este-oeste fueron combinados mediante el teorema de Pitágoras para obtener la velocidad del lecho (Fig. 18).



**Figura 18: Aforos con ADCP Workhorse Río Grande el 28/01/2016 en Est. El Tigre (Q=58.11 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>), (Datos: IGP, Anexo 5).**

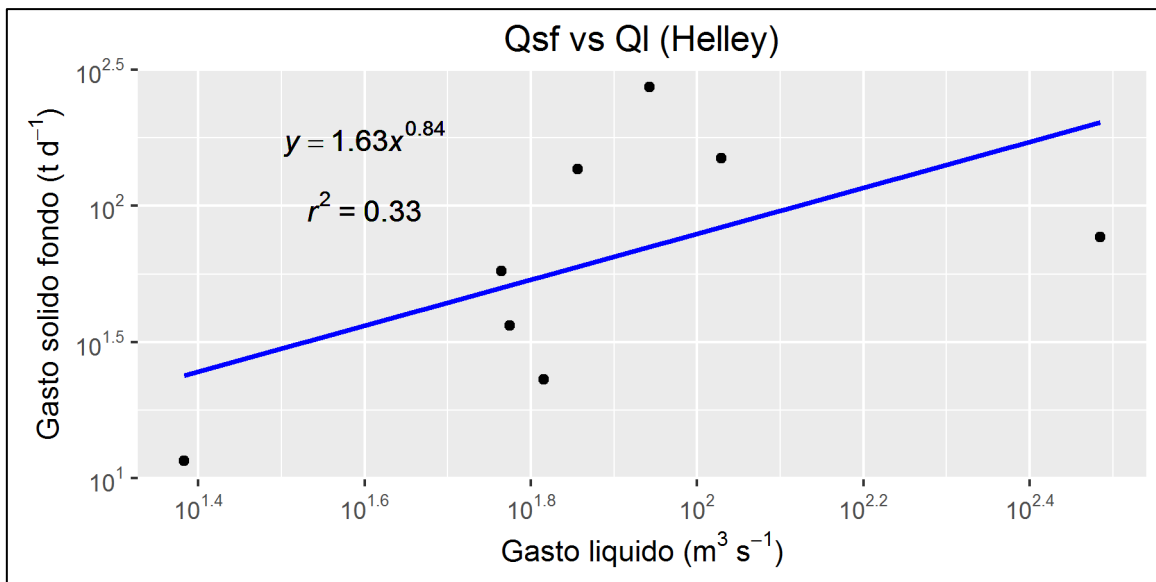
En la Fig. 19 se muestra la ubicación del muestreador Helley-Smith en la sección procesada. La ubicación fue la misma durante toda la campaña, de 30 metros desde la margen izquierda. Se determinó que el aforo del 28/01/2016 la velocidad del fondo móvil en la columna correspondiente al muestreo con Helley-Smith es de 0.26 m.s<sup>-1</sup>. Esto permite contabilizar la cantidad de celdas que tiene una velocidad mayor o igual, con lo cual se puede calcular el ancho de la sección donde se da mayor el transporte de sedimentos.



**Figura 19: Ubicación del Helley-Smith durante aforo del 28/01/2016 en Est. El Tigre ( $Q=58.11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).**

El ancho del lecho móvil se utilizó para el cálculo del gasto de fondo ( $Q_{sf}$ ). En la ecuación (3.1) de (Iroume, 2003), se toma el peso de la muestra ( $P$ ), el ancho de boquilla del Helley-Smith ( $b$ ), tiempo de toma de muestra ( $t$ ), el ancho de lecho móvil ( $B$ ), y número de muestras ( $n$ ).

En la Fig. 20 se muestra que existe una correlación moderada, de  $r = 0.33$ , entre el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) y el gasto líquido ( $Q_l$ ).



**Figura 20: Relación entre el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) y el gasto líquido ( $Q_l$ ), usando la metodología con Helley-Smith, estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).**



### 3.3.5. CÁLCULO DEL GASTO SÓLIDO UTILIZANDO AFOROS DE ADCP

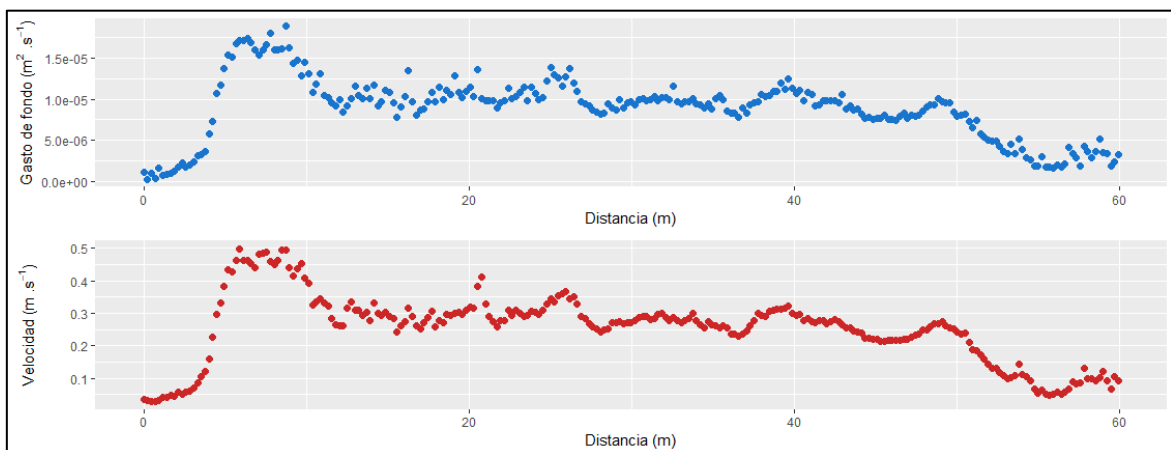
#### a.1. Cálculo del transporte de sedimento de fondo según Egashira *et al.*, (1997)

Con la ecuación (2.19) se obtiene el valor de concentración de sedimentos  $c_s$ , el tamaño de partícula se determinó mediante ensayos de granulometría realizados a muestras tomadas con Helley-Smith. Seguido se realizó el cálculo del ancho del lecho móvil  $h_s$  con las ecuaciones 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y el valor obtenido de  $c_s$ . De los aforos con ADCP se determinó la velocidad del sedimento de fondo  $v_s$ . Estos valores fueron reemplazados en la ecuación 3.2 para cada aforo realizado con ADCP ya que la velocidad del fondo varía en cada aforo.

En la Tabla 4 se muestran los aforos que fueron utilizados para realizar el cálculo del transporte de fondo ( $Q_b$ ). En la Fig. 21, correspondiente al 18/12/2015, se muestran las variaciones del  $Q_b$  y la velocidad promedio ( $V_p$ ) en la sección hidrométrica. Se observa el siguiente comportamiento: donde  $V_p$  es mayor, también es mayor el  $Q_b$ , por lo que se podría afirmar que existe una alta correlación entre las variables.

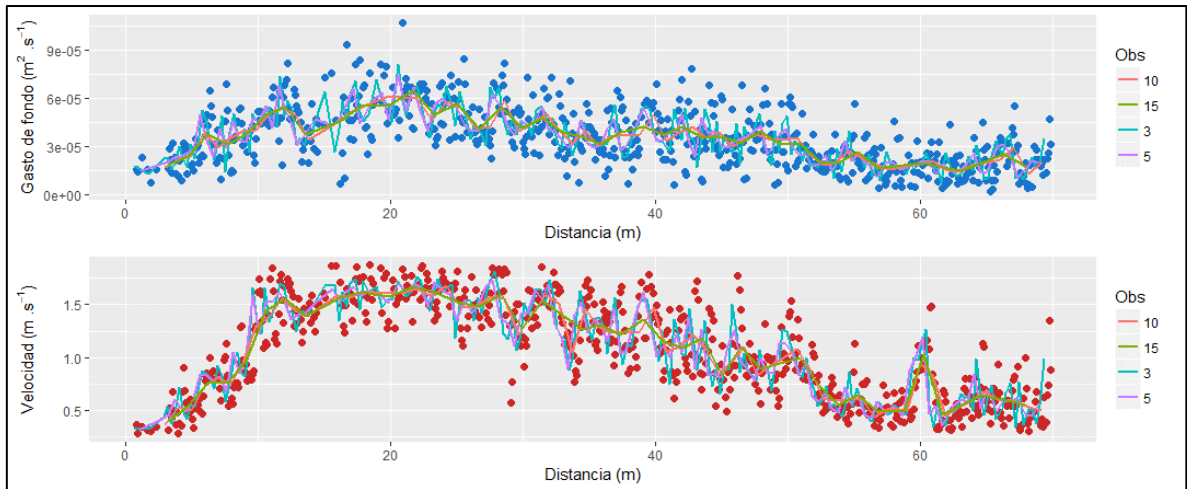
**Tabla 4: Aforos utilizados para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo con Egashira *et al.*, (1997), (Datos: IGP, Anexo 5).**

Fecha	V. Aforo (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
18/12/2015	0.22	24.12
22/01/2016	0.64	90.77
18/03/2016	0.95	157.66
30/03/2016	1.07	240.76
05/04/2016	1.65	403.20

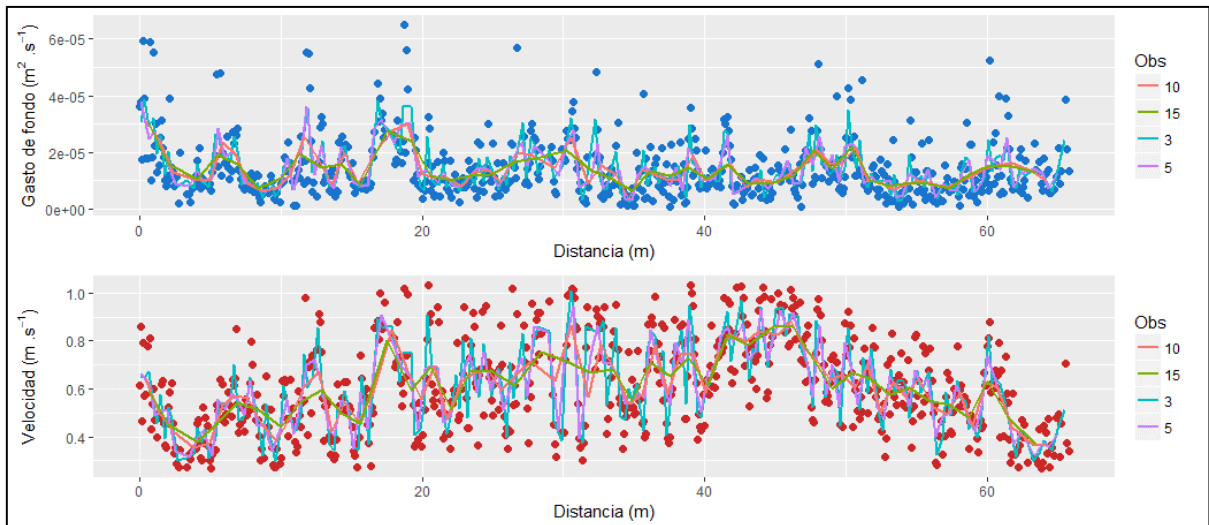


**Figura 21: Distribución en la sección hidrométrica del  $Q_b$  y  $V_p$ . (18/12/2015,  $Q=24.12 m^3/s$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).**

Para caudales mayores, la correlación entre  $Q_b$  y  $V_p$  disminuye. Esto se observa en la Fig. 22 y Fig. 23.



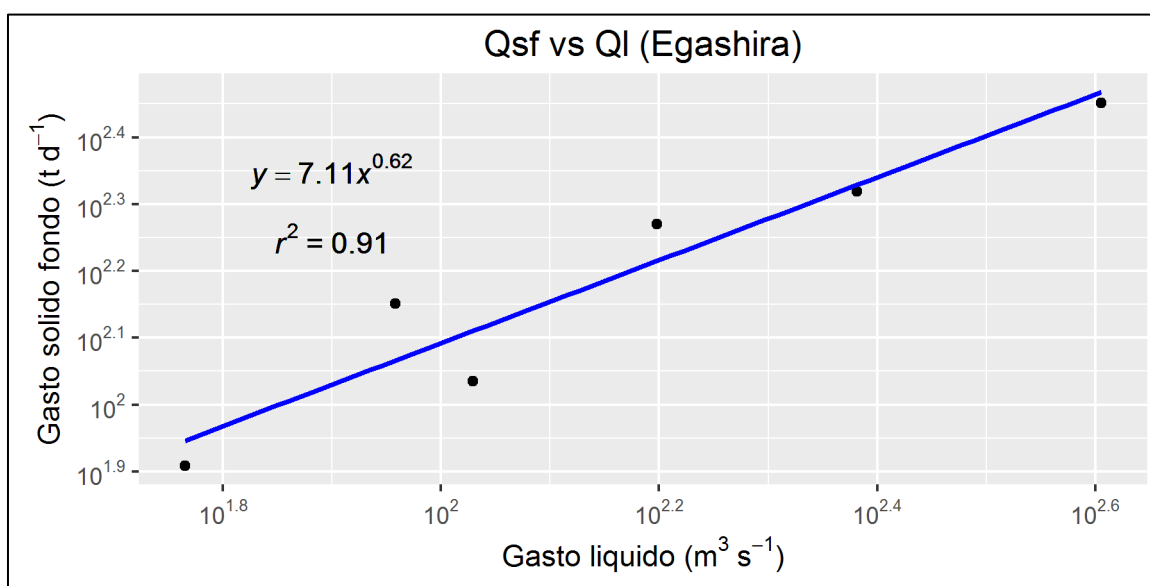
**Figura 22:** Distribución en la sección hidrométrica del  $Q_b$  vs  $V_p$ . Media móvil para 3, 5, 10 y 15 observaciones. (18/03/2016,  $Q=157.66 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).



**Figura 23:** Distribución en la sección hidrométrica del  $Q_b$  vs  $V_p$ . Media móvil para 3, 5, 10 y 15 observaciones. (05/04/2016,  $Q=403.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).

El gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) en cada aforo con ADCP fue determinado extrayendo el valor que corresponde a la ubicación donde se realizan los aforos con Helley-Smith. Obteniéndose así seis valores en total que fueron utilizados, junto a su caudal, para realizar la correlación potencial.

En la Fig. 24 se muestra que existe una alta correlación, de  $r = 0.91$ , entre el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) y el gasto líquido ( $Q_l$ ).



**Figura 24:** Relación entre el gasto sólido de fondo (Qsf) y el gasto líquido (Ql), usando la metodología Egashira *et al.*, (1997), estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).

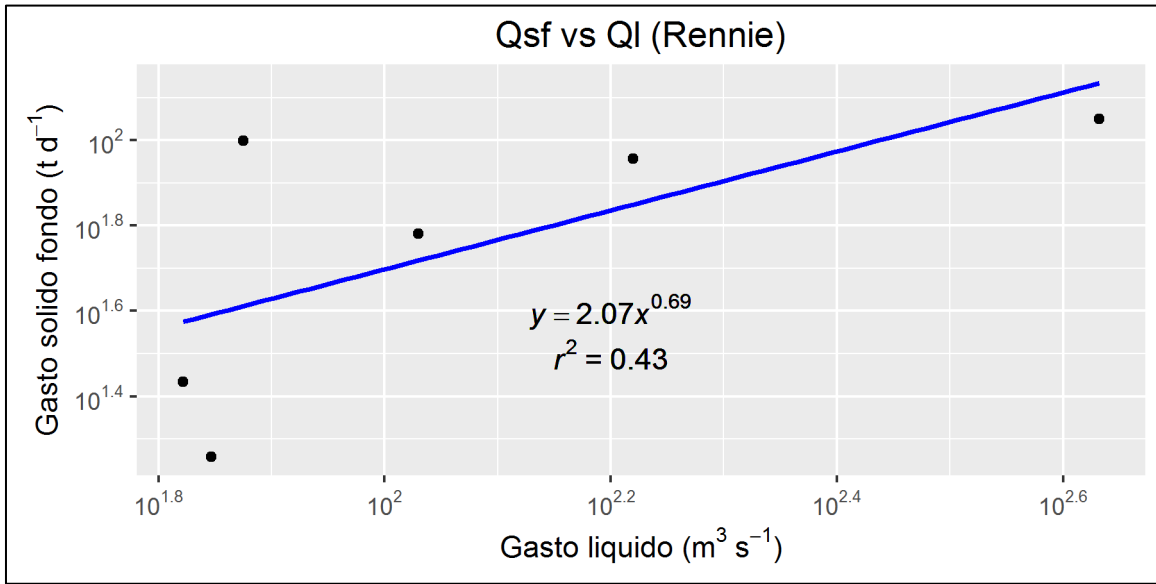
**a.2. Cálculo del transporte de fondo según Rennie et al., (2002)**

En la Tabla 5 se muestran los aforos que fueron utilizados para realizar el cálculo del transporte de fondo (Qsf).

**Tabla 5:** Aforos utilizados para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo con Rennie et al., (2002), (Datos: IGP, Anexo 5).

Fecha	Velocidad Fondo movil			Espesor Capa de fondo
	Vgps(m/s)	VBt(m/s)	VB(m/s)	da(m)
26/01/2016	0.437	0.381	0.056	0.0008
01/02/2016	0.265	0.263	0.002	0.0008
11/02/2016	0.267	0.259	0.008	0.00076
16/02/2016	0.26	0.258	0.002	0.0012
18/03/2016	0.371	0.363	0.008	0.001
05/04/2016	0.48	0.469	0.011	0.0009

En la Fig. 25 se muestra que existe una correlación, de  $r = 0.43$ , entre el gasto sólido de fondo (Qsf) y el gasto líquido (Ql).



**Figura 25:** Relación entre el gasto sólido de fondo (Qsf) y el gasto líquido (Ql), usando la metodología Rennie *et al.*, (2002), estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).

### 3.3.6. REPRODUCCIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FONDO

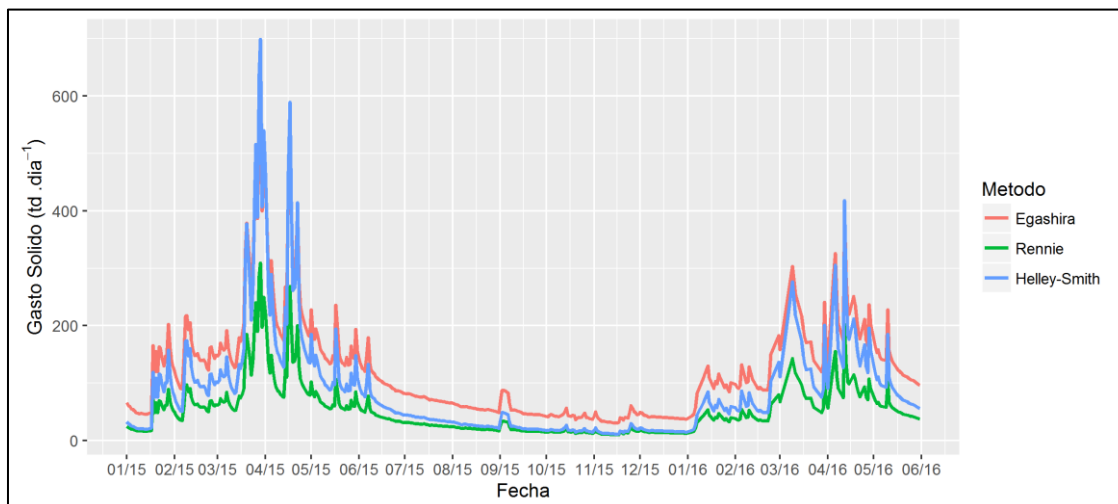
Para determinar el transporte de fondo durante la campaña de muestreo (Enero-Mayo) se utilizaron las ecuaciones correspondiente a la relación entre el transporte de fondo y el caudal obtenidas anteriormente por los métodos de: S. Egashira *et al.*, (2001) ecuación (4.1); Rennie *et al.*, (2002) ecuación (4.2); Muestreador Helley-Smith ecuación (4.3).

$$Qsf = 7.11Ql^{0.62} \quad R = 0.91 \quad 4.1$$

$$Qsf = 2.07Ql^{0.69} \quad R = 0.43 \quad 4.2$$

$$Qsf = 1.63Ql^{0.84} \quad R = 0.33 \quad 4.3$$

En la Fig. 26 se muestra la serie temporal del transporte de fondo, resultado de reemplazar el caudal aforado diario durante la campaña de muestreo en cada ecuación. Esta serie de datos obtenida correspondiente al período (enero-mayo/2016) será agregada a los datos obtenidos por Quincho, (2015) para el período (enero-mayo/2014).



**Figura 26: Transporte de fondo ( $\text{td}\cdot\text{día}^{-1}$ ) en estación El Tigre (Enero/2015-Junio/2016), (Datos: IGP, Anexo 5).**

En la Fig. 27 se graficaron las 3 series de datos obtenidas mediante las metodologías expuestas para el período 01-04/2014 y con la relación potencial obtenida por Quincho, (2015) también para el período 01-04/2014. En la Fig. 28 muestra el transporte total anual obtenido de las cuatro series. El resultado calculado con Rennie *et al.*, (2002) es el que mejor se ajusta al observado (error de 3.71%), ya que por S. Egashira *et al.*, (2001) se obtiene una sobre estimación (error de 138.54%) y con Helley Smith una baja estimación (error de -85.64%) del transporte anual. Por lo que se utilizó Rennie *et al.*, (2002) para determinar el transporte de sedimento de fondo durante la campaña enero-mayo 2016. Resultado se muestra en la Tabla 7.

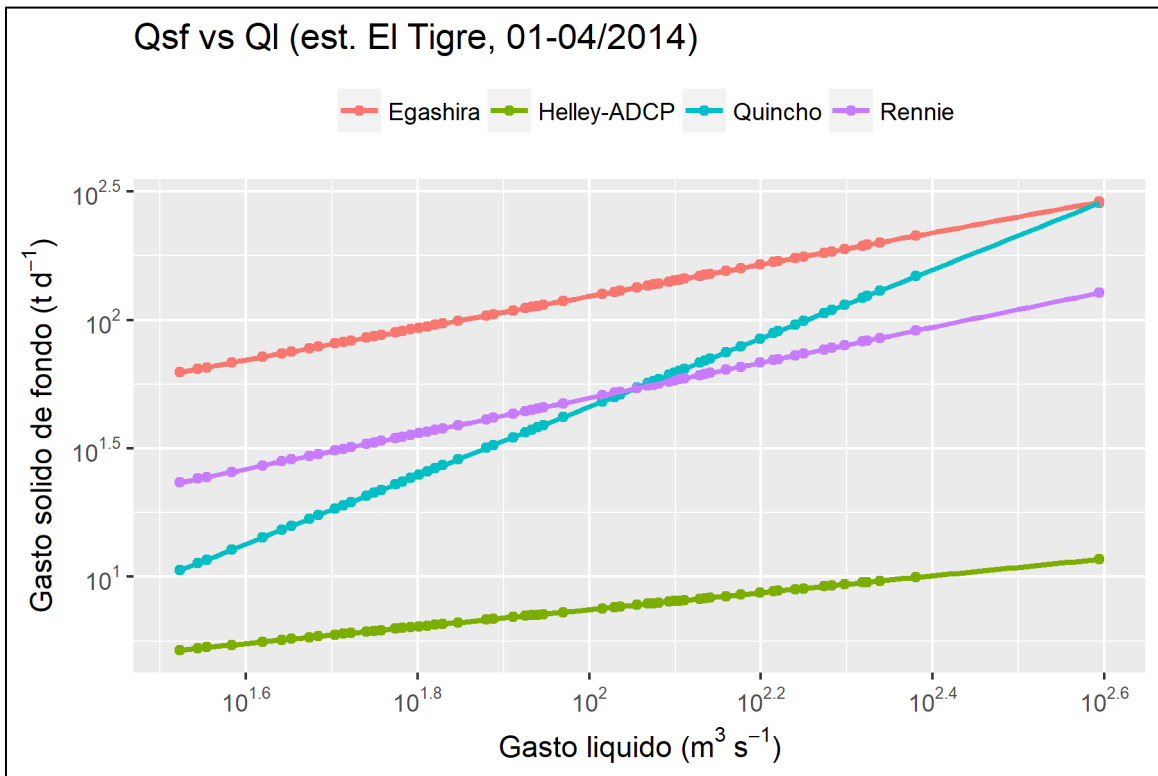


Figura 27: Serie de datos para el período (enero-abril 2014) obtenidas por los métodos explicados y por (Quincho, 2015), (Datos: IGP, Anexo 5).

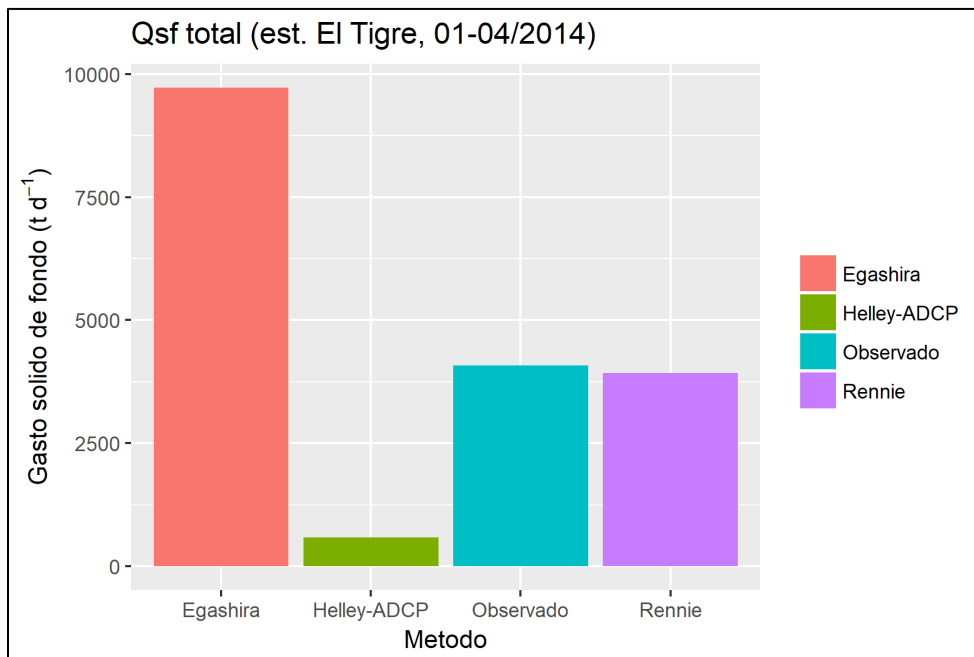


Figura 28: Gráfico de barras del transporte de sedimento de fondo anual para el período 01-04/2014, (Datos: IGP, Anexo 5).

**Tabla 6: Gasto sólido de fondo total en estación El Tigre (Enero-Abril/2014), (Datos: IGP, Anexo 5).**

Método	Qsf (Ton/día)	Error (%)
Egashira	9723.43	138.54
Rennie	3925.20	3.71
Helley	585.38	85.64
Quincho	4076.23	--

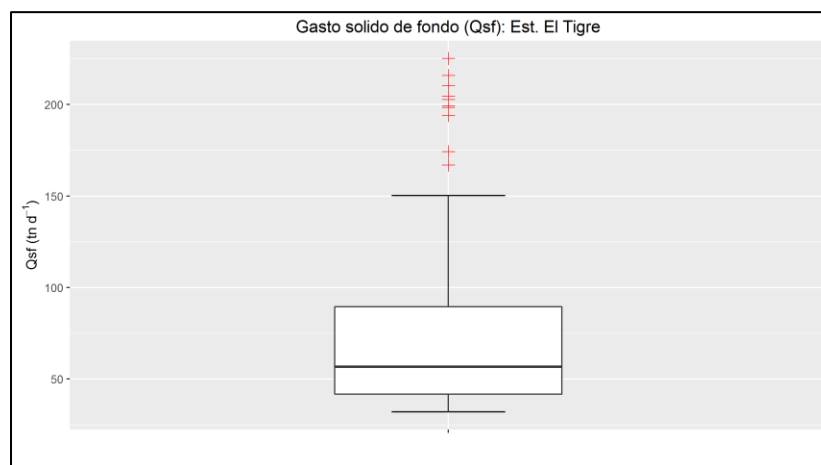
**Tabla 7: Gasto sólido de fondo total en estación El Tigre (Enero-Mayo/2016), (Datos: IGP, Anexo 5).**

Método	Qsf total (td.dia <sup>-1</sup> )
Egashira	23889.77
Rennie	10160.57
Helley – Smith	1180.72

### 3.3.7. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DEL TRANSPORTE DE FONDO

Se realizó el análisis de confiabilidad a los datos estimados con Rennie *et al.*, (2002) para el transporte de sedimentos de fondo (td/día) correspondientes a la campaña de (enero-mayo 2016) en la estación El Tigre.

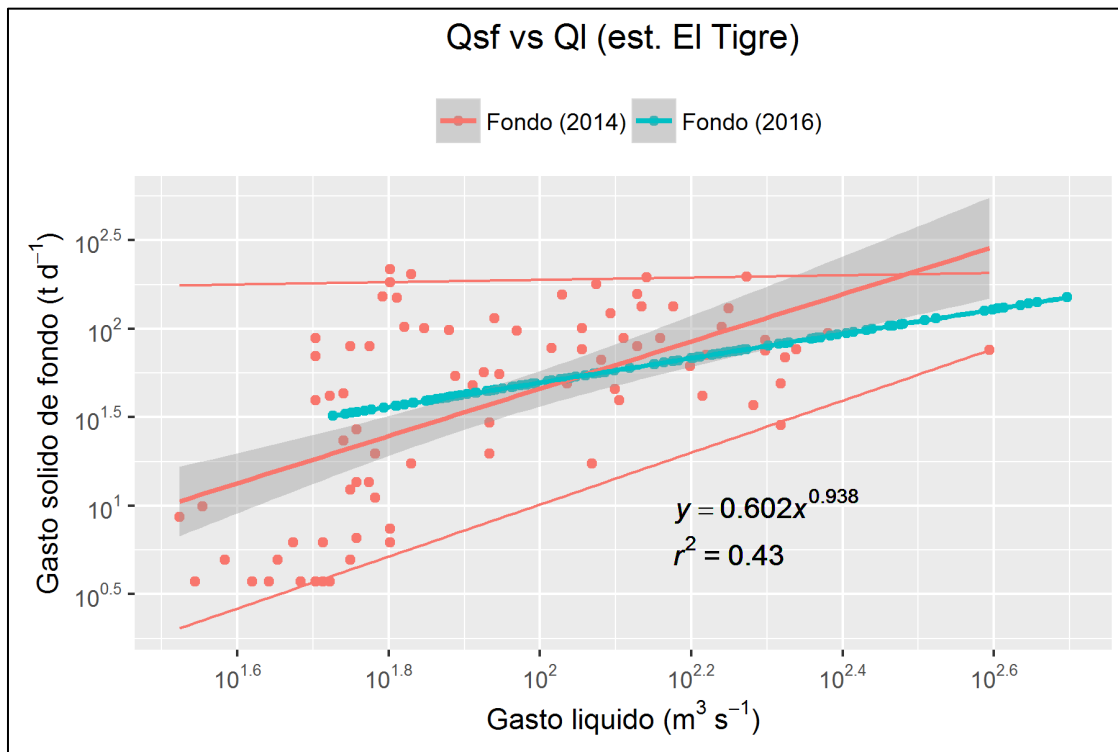
El gráfico Boxplot (Fig. 29) del transporte de sedimento de fondo. Se puede observar que la dispersión de los datos aumenta conforme aumenta el valor de los mismos. Los valores atípicos fueron retirados de la serie de datos.



**Figura 29: Boxplot de valores estimados para el transporte de sedimento de fondo (enero-mayo 2016) Est. El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).**

La serie de datos estimada durante 2016 fue agregada a la serie de datos obtenida por Quincho, (2015). Con ello se obtuvo una nueva curva de calibración del gasto sólido de fondo con el gasto líquido.

En la Fig. 30, se muestra la curva de calibración para la estación El Tigre. El área gris representa la probabilidad de ocurrencia al 95%.



**Figura 30: Curva de gasto sólido de fondo en función al gasto líquido (2014-2016), (Datos: IGP, Anexo 5).**

### 3.4. MONITOREO DEL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN

El Servicio de Observación SO HYBAM, “Control geodinámica, hidrológico y biogeoquímico de la erosión/alteración y de las transferencias de materia en las cuencas del Amazonas, del Orinoco y del Congo” junto con el Instituto Geofísico del Perú (IGP) monitorearon los sedimentos en suspensión durante los períodos de (2004-2013) en la estación El Tigre. Durante el período enero-mayo del 2014 fue Quincho, (2015) quien realizó el monitoreo. Para la presente investigación se tomaron muestras diarias de sedimentos en suspensión en la estación durante el período enero-mayo del 2016.

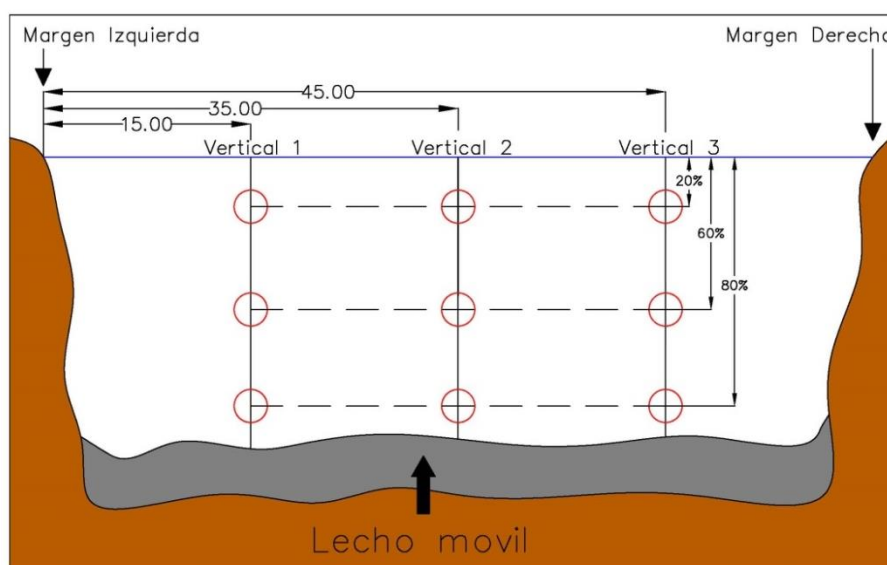


### 3.4.1. PROTOCOLO DE MUESTREO HYBAM

Indica que las muestras deben ser recolectadas, en botellas de 500 a 700 ml, de manera manual a una profundidad de 0.5 metros a la orilla del río. Una vez recolectadas deben ser etiquetadas (fecha, hora, cota o caudal) y almacenadas hasta su procesamiento.

### 3.4.2. ESTRATEGIA DE MUESTREO DURANTE CRECIDAS

El método de muestreo consiste en dividir la sección del río en 3 verticales, en zonas hidráulicamente diferentes con el fin de obtener el mayor rango de concentraciones diferentes (Latosinski *et al.*, n.d.). Las verticales dividirán la sección en la estación El Tigre en tres partes, una vertical se ubica en la parte más profunda de la sección a 35 metros con respecto a la margen izquierda y las 2 verticales restantes a 15 y 45 metros con respecto a la margen izquierda. Estas verticales serán utilizadas como puntos de referencia durante toda la campaña de muestreo, en las verticales se extraerán muestras de sedimento en suspensión a 3 alturas diferentes en las siguientes proporciones: 20%, 60%, 80% con respecto a la altura del río como se muestra en la Fig. 31.



**Figura 31:** Esquema de ubicación de los puntos de control en la estación El Tigre.

Las verticales se mantuvieron durante toda la campaña de muestreo. Durante grandes crecidas la sección hidrométrica del río crece en aproximadamente 20 m a lo ancho, lo que genera nueva área de concentraciones. Para cubrir las zonas de nuevas concentraciones se adicionara una cuarta vertical con sus respectivos puntos de muestreo.

En cada punto de la vertical se tomaron muestras de sedimento en suspensión, mediante el uso de las granadas (cilindros metálicos) con botellas de plástico de 600 ml en su interior, así como en frascos de 50 ml para el análisis geoquímico.

### **3.4.3. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS**

En análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio del proyecto HYBAM, ubicado en la UNALM.

Para iniciar el proceso se debe calcular el volumen de cada muestra, mediante diferencia de masa. Luego se filtran las muestras a través de un filtro de papel de celulosa (22  $\mu\text{m}$  de porosidad), para reducir el tiempo de filtrado se utilizó una bomba de vacío. La botella debe ser limpiada completamente con agua destilada para filtrar todo el contenido. Finalmente, el filtro es secado en una estufa a una temperatura de 70 grados centígrados por 2 horas.

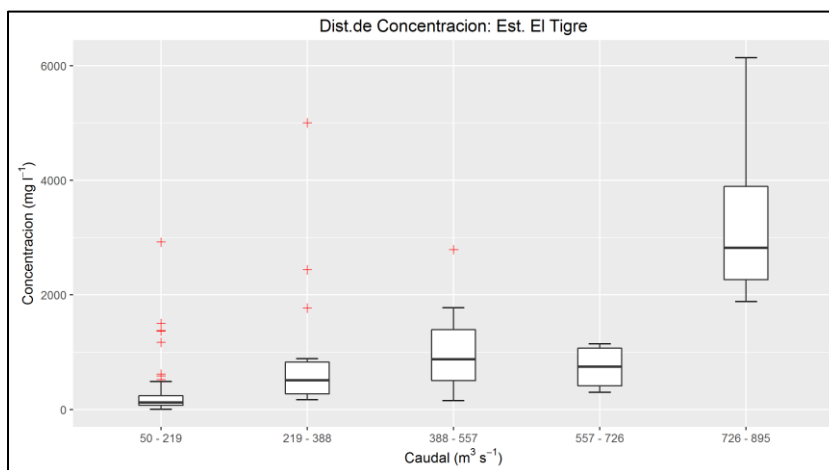
La concentración del sedimento en suspensión (MES) se determinó por la diferencia en masa del filtro limpio y seco (antes de filtrar) y el filtro con material (seco), el resultado se dividió entre el volumen de la muestra. Los resultados obtenidos de concentración están en ( $\text{mg l}^{-1}$ ).

Para determinar el gasto sólido en suspensión (QSS) se multiplica la concentración de sedimentos en suspensión (MES) y el caudal líquido instantáneo (Ql).

### **3.4.4. ANALISIS DE CONFIABILIDAD DEL MATERIAL EN SUSPENSIÓN**

Se realizó el análisis de confiabilidad a los datos observados con respecto a las concentraciones ( $\text{mg/l}$ ) correspondientes a la campaña de (enero-mayo 2016) en la estación El Tigre.

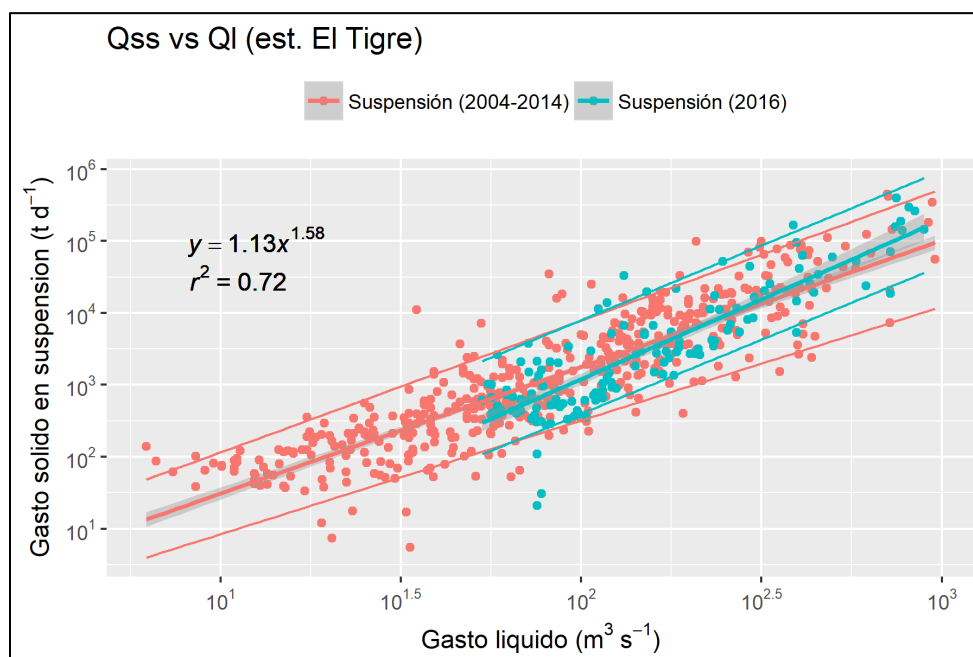
El gráfico Boxplot (Fig. 32) de las concentraciones de sedimentos en suspensión en función del caudal se observa una baja dispersión de los datos y algunos valores atípicos. Para caudales mayores a  $726 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  incrementa la dispersión así como la concentración. Los valores atípicos fueron corregidos, reemplazándolos por la media correspondiente al conjunto de observaciones.



**Figura 32:** Boxplot concentraci3n de sedimentos en suspensi3n para rango de caudales en estaci3n El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).

La serie de datos observados durante 2016 fue agregada a la serie de datos en base Hydracces, la cual tiene registros desde el a1o 2004. Con ello se obtuvo una nueva curva de calibraci3n del gasto s3lido en suspensi3n con el gasto l3quido.

En la Fig. 33, se muestra la curva de calibraci3n para la estaci3n El Tigre. Las l3neas de color rojo muestra el intervalo de confianza la 5 y 95 percentil y el 3rea gris representa la probabilidad de ocurrencia al 95%.



**Figura 33:** Curva de gasto s3lido en suspensi3n en funci3n al gasto l3quido (2004-2016), (Datos: IGP, Anexo 5).

### 3.4.5. DISTRIBUCIÓN DEL MATERIAL EN SUSPENSIÓN EN LA SECCIÓN HIDROMÉTRICA (MES)

Se realizó la estrategia de muestreo para crecidas el día 17/03/2016, obteniendo: 6 muestras en la sección hidrométrica y 1 muestra en la orilla del río. Además se realizó un aforo con ADCP registrando un caudal de  $183.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Para procesar la información del ADCP con los resultados de laboratorio se utilizó el software Hydromesad.

El software Hydromesad de propiedad del IRD es utilizado actualmente en grandes ríos de la amazonia por lo que es posible implementar su uso para ríos de montaña. En la Fig. 34 se muestra el interfaz para cargar y procesar los aforos realizados mediante ADCP y los realizados para el monitoreo de sedimentos en suspensión.

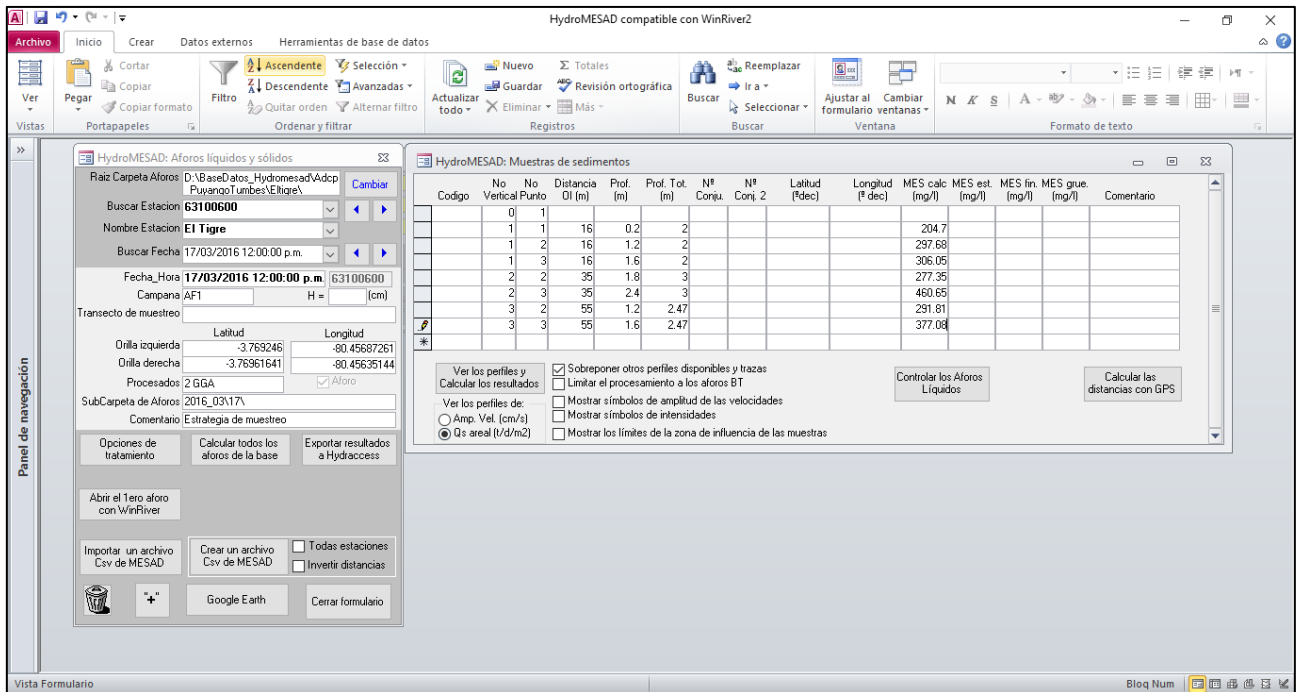


Figura 34: Datos cargados en el HYDROMESAD, (Datos: IGP, Anexo 5).

En la Fig. 35 se puede observar el resultado del procesamiento de la información cargada al software. La sección hidrométrica es obtenida mediante el aforo con ADCP, el software que ubica donde fueron tomadas y genera el gráfico.

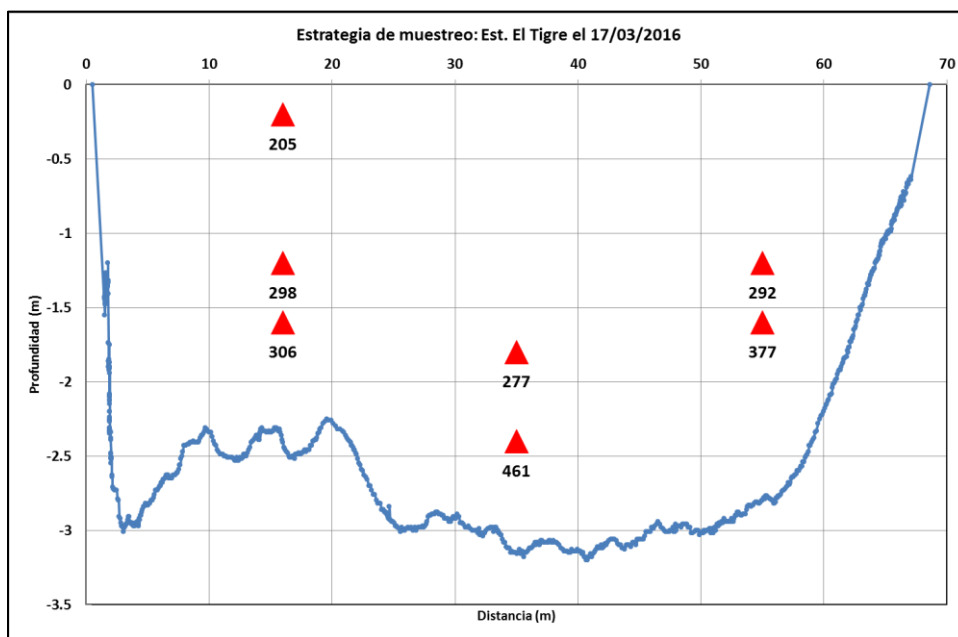


Figura 35: Muestreo puntual del MES en mg/L, estación El Tigre (17/03/2017). (Q=183.3 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>), (Datos: IGP, Anexo 5).

### 3.5. BATIMETRÍA CON AFOROS ADCP

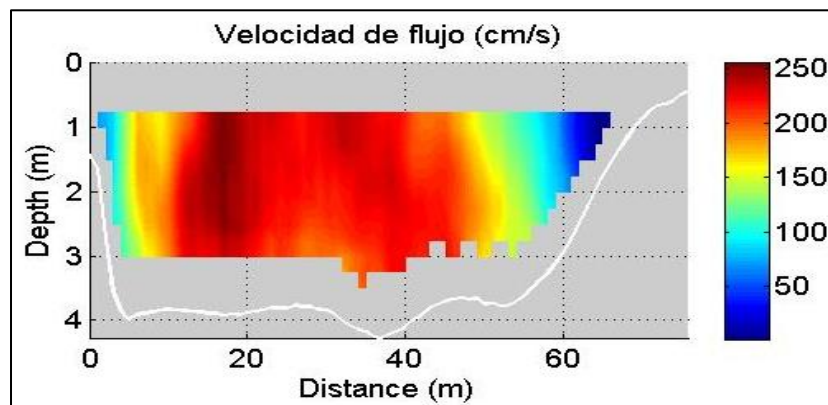
El uso de perfiladores acústicos Doppler (ADCP) permite obtener la batimetría de la sección del río así como también el perfil de velocidades del flujo, del cual es posible calcular la descarga total (Jugaru Tiron *et al.*, 2009). En la Tabla 8 se muestran los aforos realizados con ADCP durante la campaña, con sus respectivos caudales. Estos aforos fueron procesados con el software Velocity Mapping Toolbox (VMT).

Tabla 8: Aforos realizados durante la campaña del 12/2015 al 04/2016, (Datos: IGP, Anexo 5).

Aforo ADCP	Caudal (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
18-dic	24.10
22-ene	97.14
26-ene	75.00
28-ene	54.44
01-feb	70.45
05-feb	110.56
16-feb	66.30
17-mar	178.76
18-mar	171.90
04-abr	419.41
05-abr	424.00
06-abr	518.63
08-abr	242.17

El VMT es un paquete, creado en lenguaje Matlab y que permite procesar, analizar y mostrar la velocidad en una sección transversal mediante datos recolectados de múltiples transectos realizados por ADCP. Los archivos de entrada para el VMT son en formato ASCII, lo cuales son creados por el programa de recolección de datos del ADCP Winriver II. (Parsons *et al.*, 2013).

En la Fig. 36 se muestra el mapa de velocidades de la sección hidrométrica aforada el día 04/04/2016. De la información aforada también es posible extraer la batimetría de la sección. Dicho procedimiento se realizó para todos los aforos en la campaña.



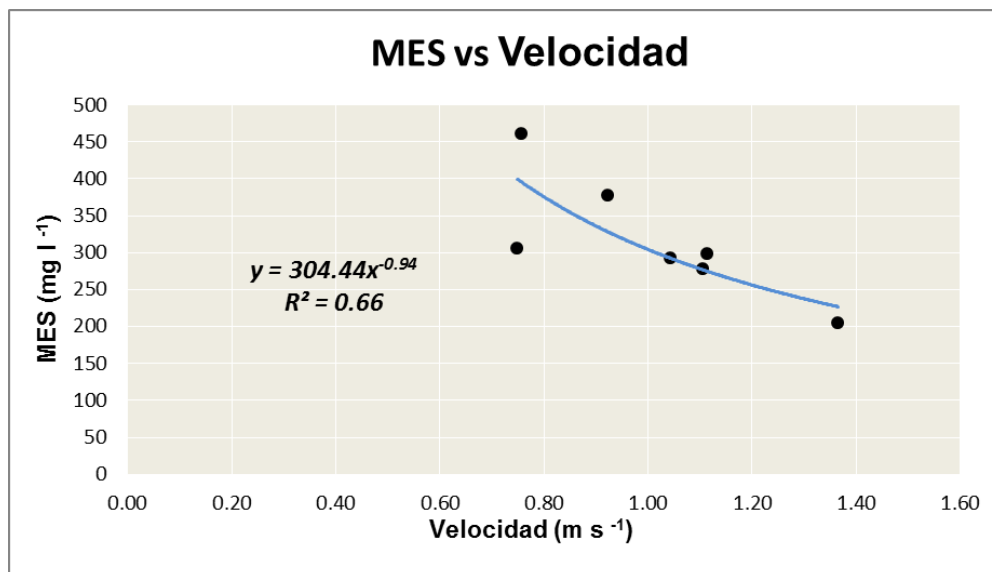
**Figura 36: Mapa de contorno de velocidad de flujo, estación El Tigre - Río Tumbes. 04/04/2016 ( $Q=419.41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).**

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.1. RELACIÓN DEL MATERIAL EN SUSPENSIÓN Y LA VELOCIDAD EN LA SECCIÓN HIDROMÉTRICA

Según Armijos *et al.*, (2016), la concentración de material en suspensión no se correlaciona con el caudal. Por lo que en la presente investigación se adaptó el método de estrategia de muestro a profundidades puntuales para determinar la distribución de concentraciones de material en suspensión en toda la sección hidrométrica.

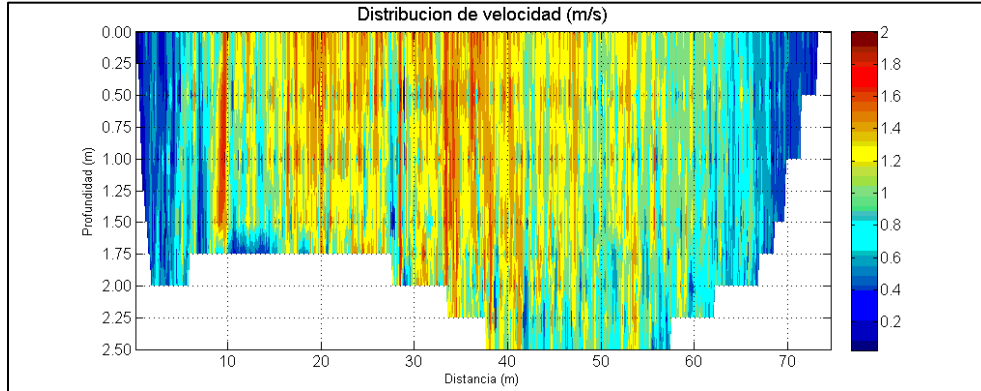
Se logró obtener una relación potencial entre el material en suspensión (MES) y la velocidad del agua (m/s). La velocidad fue determinada por la ubicación donde se tomó la muestra del MES dentro del perfil de velocidad obtenido del aforo con ADCP. En la Fig. 37 se muestra la relación obtenida con un  $R=0.66$ .



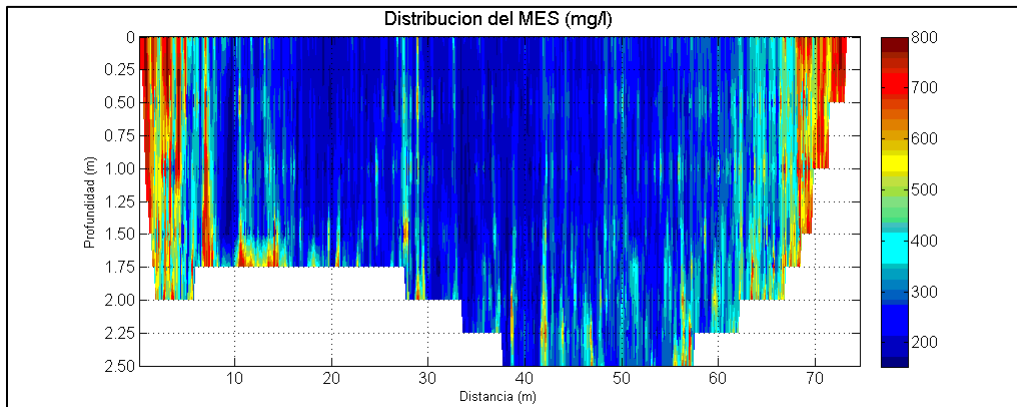
**Figura 37:** Relación potencial entre el MES vs Velocidad estación El Tigre (enero-mayo 2016), (Datos: IGP, Anexo 5).

Con el mapa de distribución de velocidad Fig. 38 y la ecuación determinada anteriormente, se obtuvo el mapa de distribución de concentración en toda la sección hidrométrica Fig. 39.

En el mapa de distribución de MES se puede observar que en lugares donde la velocidad es menor el MES es mayor, como en los extremos y en el lecho. Así como en las concentraciones mayores se dan en el centro de la sección donde se dan las mayores velocidades. Además el MES superficial es estimado en aproximado 200 mg/l en toda la sección, lo cual es consecuente con lo observado de 205 mg/l.



**Figura 38: Velocidades en la sección hidrométrica, estación El Tigre (17/03/2016). ( $Q=174.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).**



**Figura 39: Distribución del material en suspensión en la sección hidrométrica, estación El Tigre (17/03/2016). ( $Q=174.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), (Datos: IGP, Anexo 5).**

En los últimos años se viene realizando avances en el estudio de la distribución de concentraciones de sedimentos en ríos. La investigación realizada por Filizola & Guyot, (2004) utilizó un ADCP para relacionar la intensidad del señal (efecto Doppler) en la sección con el MES, estableció una relación y calculó el transporte de sedimentos en suspensión.



Actualmente, Armijos *et al.*, (2016), adiciona el uso de sensores ópticos (turbidímetros) junto con un conjunto de protocolos para medir y modelar la distribución del MES de datos. Este protocolo incrementa notablemente la precisión del perfil de la concentración MES a lo que se le multiplica el perfil de velocidades del ADCP obteniendo mejor estimación del transporte de sedimentos en suspensión y mayor eficiencia en el trabajo de campo, en términos de tiempo y logística.

## **1.2. DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (SUSPENSIÓN Y DE FONDO)**

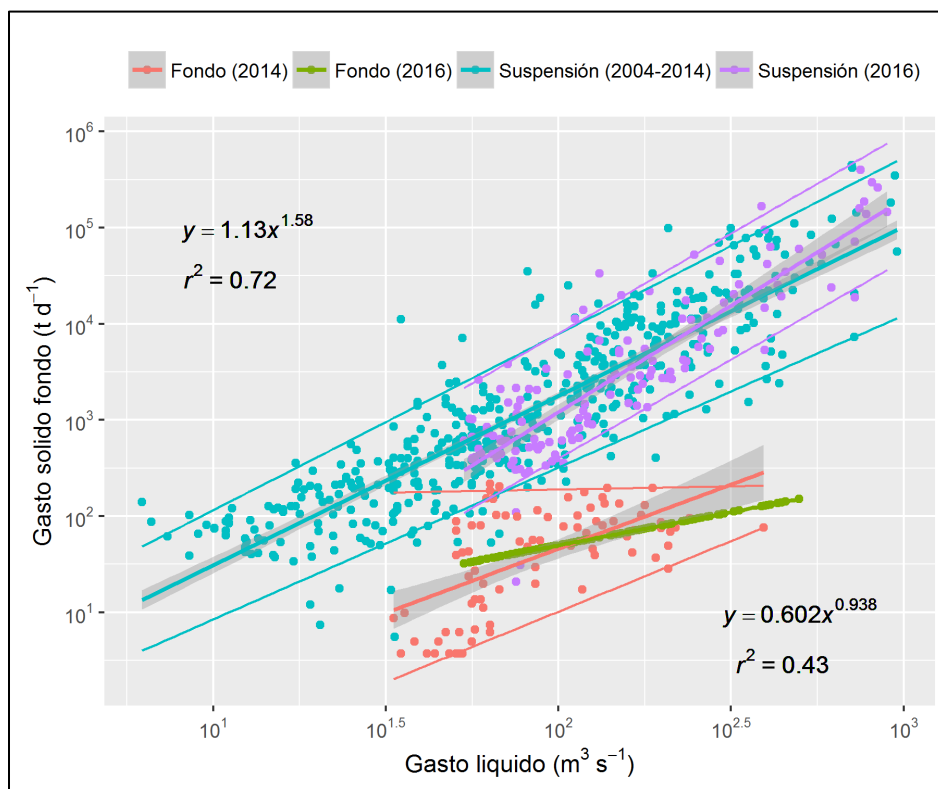
### **1.2.1. MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO ENTRE CAUDALES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS**

El modelo hidrosedimentológico fue generado a partir de la serie de datos obtenido de caudal sólido.

La Fig. 40 se puede observar la relación potencial del gasto sólido en suspensión ( $Q_{ss}$ ) y el gasto sólido ( $Q_{sf}$ ) de fondo con unidades  $t.d^{-1}$  en función al gasto líquido ( $Q_l$ )  $m^3.s^{-1}$ . En la serie de  $Q_{ss}$  se muestra los datos correspondientes al período 2004-2014 (celeste) y del 2016 (violeta). Con respecto a la serie  $Q_{sf}$  se muestran los datos obtenidos en el 2014 (rojo) y 2016 (verde). Cada serie con su intervalo de confianza al 5 y 95 percentil.

Se confirma lo expuesto por Quincho, (2015), la evidente relación potencial entre el caudal sólido en suspensión y de fondo con el caudal líquido. Según Julien, (2010), del modelo se puede determinar que representa una curva de gasto sólido dependiente del sedimento disponible.

El caso de curvas de gasto dependiente del material disponible se caracteriza por una baja concentración y alta variabilidad. En la cuenca Puyango-Tumbes la alta variabilidad se ve reflejada en la correlación obtenida de  $r=0.73$ . Esto se debe a que el transporte de sedimentos es limitado por el material disponible de sedimentos. En la cuenca el material en suspensión proviene del lavado de la superficie el cual varía en locación, en la intensidad de las lluvias y la etapa del ciclo hidrológico en la que se encuentra. Además los sedimentos disponibles no dependen únicamente del caudal y eso ocasiona una gran variabilidad a un determinado rango de sedimentos disponibles.



**Figura 40: Relación del gasto sólido (suspensión y fondo) en función del gasto líquido en la estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).**

Esto se pudo apreciar durante la campaña de muestreo (01 – 05/2016) la cantidad máxima de transporte de sedimentos en suspensión que se obtuvo el día 10/03/2016, la cual fue de  $3.97E+05 \text{ td}\cdot\text{día}^{-1}$  pero no correspondió al caudal máximo registrado el día 05/03/2016 de  $894.6 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Lo mismo ocurrió durante la campaña de muestreo del (01 – 05/2014) la cantidad máxima de transporte de sedimentos en suspensión que se obtuvo el día 11/05/2014, la cual fue de  $4.20E+05 \text{ td}\cdot\text{día}^{-1}$  pero no correspondió al caudal máximo registrado el día 03/05/2016 de  $941.9 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .

Para el transporte de sedimento de fondo, se logró determinar que de los métodos estudiados: S. Egashira *et al.*, (2001); Rennie *et al.*, (2002); Muestreador Helley-Smith, el que mejor lo estima es la aproximación de Rennie *et al.*, (2002). Se utilizó dicha aproximación para reproducir el transporte de fondo durante la campaña 01-05/2016. Los valores obtenidos se encuentran dentro del intervalo de confianza establecido por los primeros estudios del transporte fondo realizados por Quincho, (2015), a diferencia de la sobre estimación obtenida con la aproximación con S. Egashira *et al.*, (2001) y la baja estimación obtenida con el muestreador Helley-Smith integrado con ADCP.

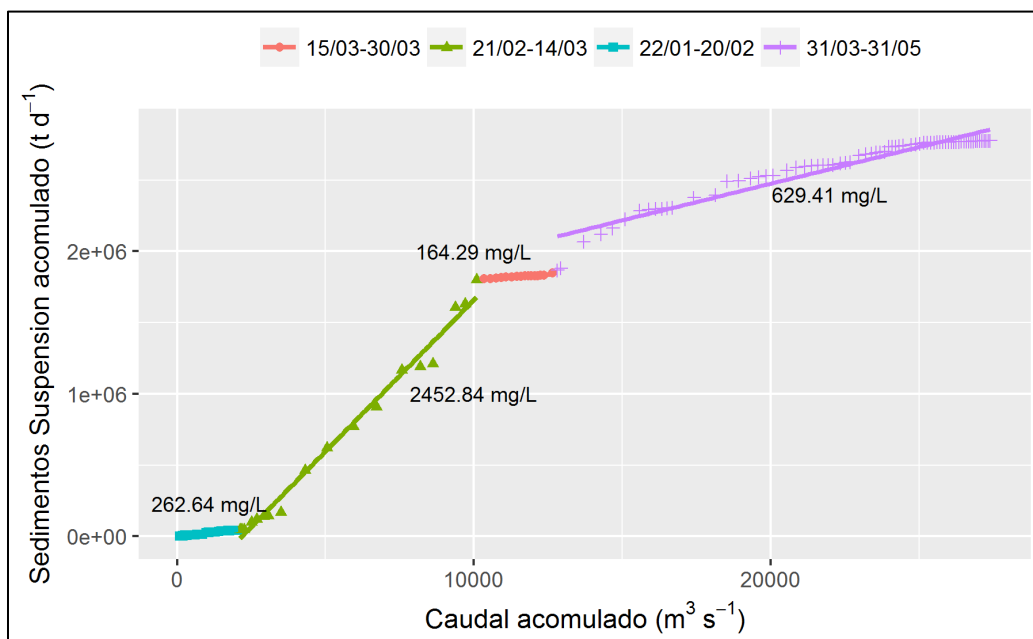
### **1.2.2. DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DURANTE LA CAMPAÑA DE MUESTREO**

Para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre, se obtuvo un  $Q_{st}$  promedio histórico igual a  $340 \text{ td.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ , de los cuales el 92 por ciento se transporta durante la época húmeda, el 7 por ciento en transición y solo 1 por ciento durante estiaje (Morera, 2014). Debido al alto porcentaje transportado en época húmeda, se analizará los períodos 01-05/2016 y 01-05/2014.

Durante la campaña de monitoreo (01-05/2016) en la cuenca Puyango-Tumbes se transportó en total  $505.04 \text{ td.km}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , conformado por 99 por ciento de material en suspensión y 1 por ciento de material de fondo. Tomando el mismo período, (01-05/2014), de la campaña realizada por Quincho, (2015) se obtuvo transporte total de  $422.40 \text{ td.km}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , conformado por 99 por ciento de material en suspensión y 1 por ciento de material de fondo.

Se determinó que en la cuenca Puyango-Tumbes, el transporte de sedimentos se conforma en gran mayoría por el material suspensión y muy poco por el transporte de fondo. Durante eventos extremos como el fenómeno El Niño se registró un incremento del 16 por ciento en el transporte de sedimentos totales del período 01-05/2016 con respecto al período 01-05/2014.

En la Fig. 41 se observa una gráfica del transporte de sedimentos en suspensión ( $Q_{ss}$ ) y el caudal acumulado durante el período correspondiente al (01-05/2016). En el eje X está el caudal acumulado en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  y en el eje Y el transporte de sedimentos en suspensión en  $\text{t.día}^{-1}$ . Durante dicho período se observa 4 tipos de comportamiento del  $Q_{ss}$ , representados por 4 líneas de tendencia. Del 22/01 al 20/02 el incremento del  $Q_{ss}$  y  $Q_l$  es bajo obteniendo una concentración de MES promedio de  $262.64 \text{ mg.l}^{-1}$ . El siguiente del 21/02-14/03 se da un incremento fuerte, dando una concentración promedio de  $2452.84 \text{ mg.l}^{-1}$ . Del 15/03-30/03 período de bajo caudal y baja concentración de  $164.29 \text{ mg.l}^{-1}$ . Finalizando el período húmedo del 31/03-31/05 con incremento menor de la concentración de  $629.41 \text{ mg.l}^{-1}$ , posiblemente debido al poco material disponible de lavado en la cuenca.



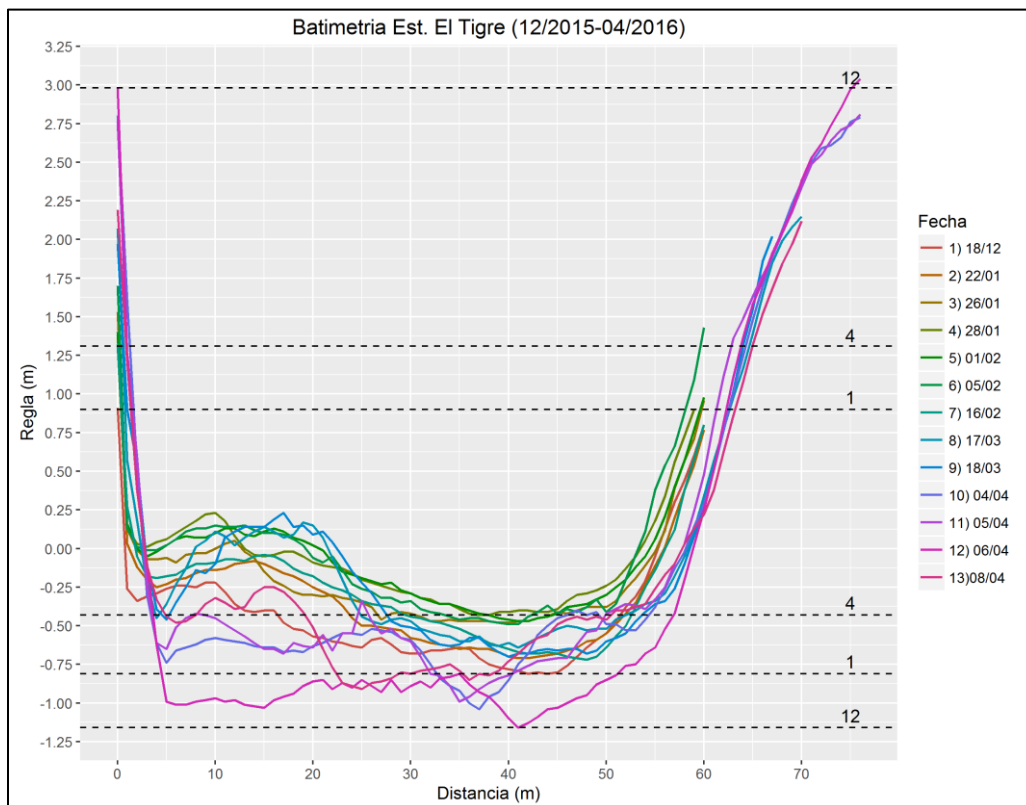
**Figura 41: Gráfica de caudal y transporte de sedimentos en suspensión acumulados en estación El Tigre para el período (01-05/2016), (Datos: IGP, Anexo 5).**

El transporte de sedimento de fondo para la campaña de muestro se estimó en  $2.80 \text{ td.km}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  y para el período del 01-05/2014 se estimó en  $0.96 \text{ td.km}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  equivalente a 0.005 millones de toneladas. Para la época húmeda del 2016 el transporte sólido de fondo aumentó 3 veces más que lo estimado para la época húmeda del 2014.

### 1.3. BATIMETRÍA DE LA SECCIÓN HIDROMÉTRICA DURANTE EL FENOMENO EL NIÑO

Para obtener la dinámica del perfil se colocó en una gráfica todas las secciones hidrométricas obtenidas por aforos con ADCP a un nivel de referencia común. Se tomó como nivel de referencia el nivel de agua registrado en la regla en el momento de realizado el aforo.

En la Fig. 42 se puede observar que en todas las secciones la parte más baja se encuentra por debajo del “cero” de la regla. Por ejemplo el primer aforo del día 18/12/2016 el punto más bajo de la sección se encuentra 0.76 m por debajo de la “cero” de la regla. A lo largo de la campaña ocurre deposición como la correspondiente al día 28/01/2016 la profundidad es de 0.43 m y erosión como la profundidad del día 06/04/2016 la cual llega al 1.16 m.

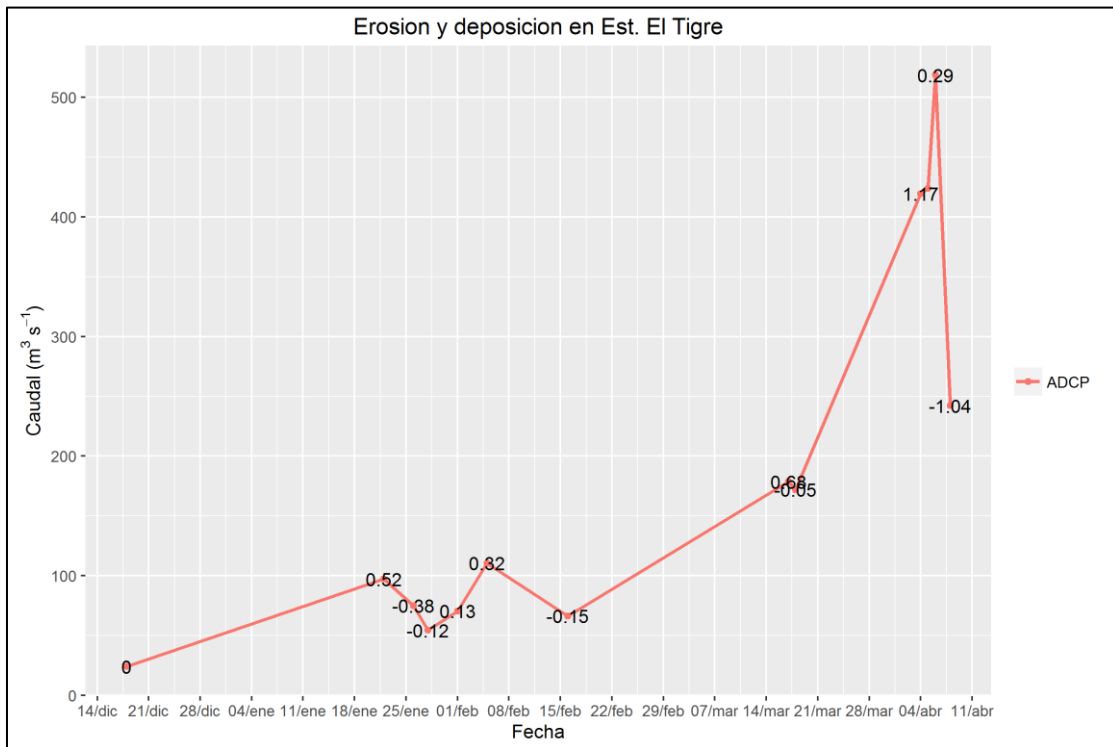


**Figura 42: Batimetría durante la campaña de aforos, estación El Tigre - Río Tumbes. (12/2015-04/2016), (Datos: IGP, Anexo 5).**

Se estableció una relación entre el directa entre la variación del caudal y la erosión o deposición. En la Fig. 43 se muestra los caudales aforados obtenidos con ADCP y su correspondiente diferencia de profundidad entre la profundidad de la sección.

Tomando como punto de inicio “0” el primer aforo, se produce una erosión de 0.52 metros correspondiente a un aumento del caudal. De la misma forma al momento de disminuir el caudal, se produce deposición de material de hasta 0.50 m. Esto se da a lo largo de toda la compañía modificando constantemente la sección transversal. Lo cual también podría explicar el incremento del transporte de sedimento de fondo con respecto a la campaña del 01-05/2016.

En la campaña de muestreo se dieron grandes crecidas que no pudieron ser aforadas. Durante estos eventos según Fiedler *et al.*, (2008) se dan 2 grandes problemas; mucha palizada y altas concentraciones de sedimentos en suspensión.



**Figura 43: Serie de caudales aforados por ADCP con su respectiva erosión y deposición en la estación El Tigre, (Datos: IGP, Anexo 5).**

## V. CONCLUSIONES

1. Se comprobó que la tecnología acústica Doppler mediante un ADCP, es eficiente para el monitoreo y la caracterización del transporte de sedimentos de suspensión como de fondo. Ello permite nuevas metodologías, desde la recolección pasando por la frecuencia y el procesamiento para la estimación del caudal sólido total durante crecidas. Estas metodologías se podrían aplicar en eventos extremos como los presentes durante un fenómeno El Niño.
2. La implementación de la estrategia de muestro del material en suspensión junto con software de hidrología y sedimentos en suspensión y datos de ADCP, permitió determinar la distribución de concentración de material en suspensión (MES) en la sección hidrométrica. Esta distribución permite determinar cómo varía el MES de forma espacial en la sección, consiguiendo mejoras en la representatividad del muestreo.
3. El transporte de sedimento total (Qst), durante la campaña de muestreo, para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre fue de 2.79 millones de toneladas, de los cuales el 99 por ciento se transporta en suspensión (2.78 millones de toneladas) y 1 por ciento de fondo (0.015 millones de toneladas). Se ha incrementado hasta 3 veces más el Qst con respecto al estimado durante el 2014, esto debido a la presencia del Fenómeno El Niño.
4. Con respecto al transporte de sedimentos en suspensión se comprobó que el mayor transporte al inicio de la época húmeda debido al alto material disponible. Por consecuencia el transporte va disminuyendo progresivamente hasta el fin de la época húmeda.

5. Con respecto al transporte de sedimentos de fondo se determinó que la metodología expuesta por Rennie *et al.*, (2002), es la que mejor se aproxima a los datos observados de gasto sólido de fondo. Esta metodología de estimación prueba de ser de gran utilidad para la estimación del gasto sólido durante crecidas o eventos extremos, ya que es una forma de estimación indirecta.
  
6. Se detectó y documentó la erosión durante la época húmeda mediante aforos realizados con ADCP en el río Tumbes. Con ello se logró determinar que el fondo del río presente una alta variabilidad durante la época húmeda, estos cambios pueden generar diferentes áreas mojadas para una misma lectura de regla. Esto afectaría la precisión de la curva de gasto líquido en la estación El Tigre. Esta información es muy importante y será de gran ayuda para determinar el cambio en la morfología de la sección durante crecidas.



## **VI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda seguir con el monitoreo de caudales sólidos, en suspensión y de fondo, así como caudales líquidos mediante el uso de perfiladores acústicos Doppler (ADCP). Para el monitoreo durante crecidas o eventos extremos construir una infraestructura (cable de acero y poleas) exclusiva para el uso del ADCP para no poner en riesgo al personal aforador. Todo ello permitirá tener un registro histórico más amplio para futuras investigaciones.

Para el monitoreo del material en suspensión, durante crecidas o eventos extremos, se recomienda integrar el uso de sensores ópticos como turbidímetros con el objetivo de incrementar la resolución espacial del análisis de la distribución de material en suspensión en la sección hidrométrica. Para el monitoreo de transporte de sedimentos de fondo durante crecidas o eventos extremos, se recomienda integrar el uso de sensores capaces de registrar como se mueve el lecho.

Se recomienda dar inicio a un proyecto de recolección de datos hidrosedimentológicos nacional, el cual integre instituciones como universidades, gobiernos regionales, Autoridad Nacional del Agua (ANA), Autoridades Locales del Agua (ALA), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Servicio Nacional de Áreas Protegidas por el estado (SERNANP), Instituto Geofísico del Perú (IGP) y otras instituciones públicas o privadas. Esta base de datos permitirá un mejor manejo y gestión de los sedimentos desde los Andes hacia el Océano Pacífico con mayor énfasis durante crecidas o eventos extremos debido a la casi nula información existente.

El proyecto “Monitoreo, caracterización e identificación de las principales fuentes de erosión y sedimentos durante crecidas o eventos extremos El Niño en las cuencas binacionales Puyango-Tumbes y Zarumilla” viene realizando el monitoreo de la geoquímica de los sedimentos con el uso de trazadores geoquímicos. Esto determinará el material disponible a ser erosionado y también si existe la presencia de material contaminante, como metales pesados.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña A., J., Vera A., H., Yerren S., J. & Ordoñez G., J. (2007) Atlas hidrológico de las cuencas Zarumilla y Tumbes ubicadas en el departamento de Tumbes. *Dir. Gen. Hidrol. y Recur. Hídricos del SENAMHI* 11.
- Apaclla, R. (2014) *Hidráulica Fluvial*. (J. Vilcapoma & R. Perales, Eds.), Primera Ed. Lima, Peru: Fondo Editorial - UNALM.2014.
- Armijos, E., Crave, A., Espinoza, R., Fraizy, P., Santos, A. L. M. R. Dos, Sampaio, F., Oliveira, E. De, et al. (2016) Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the Solimões/Amazon River. *Hydrol. Process.* (June 2015), 1–14. doi:10.1002/hyp.11059
- Bedient, J., Huber, W. & Vieux, B. (2012) *Hydrology and Floodplain Analysis*. (Person, Ed.), 5 Edition. Houston: Pearson.
- Bourrel, L., Rau, P., Dewitte, B., Labat, D., Lavado, W., Coutaud, A., Vera, A., et al. (2015) Low-frequency modulation and trend of the relationship between ENSO and precipitation along the northern to centre Peruvian Pacific coast. *Hydrol. Process.* **29**(6), 1252–1266. doi:10.1002/hyp.10247
- Bowles, J. E. (1982) *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. (E. Retamal, H. Cosme & L. Rivera, Eds.), Primera. Bogota, Colombia: Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, SA.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994) *Hidrología Aplicada*. (M. Suárez R, Ed.), Primera. Bogota, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, SA.
- Cudennec, C., Eicker, a., Pilon, P., Stoffel, M., Viglione, a. & Xu, Z. (2015) Preface: Extreme Hydrological Events. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* **369**(August), 1–2. doi:10.5194/piahs-369-1-2015
- Curran, J. C., Waters, K. a. & Cannatelli, K. M. (2015) Real time measurements of sediment transport and bed morphology during channel altering flow and sediment transport events. *Geomorphology* **244**, 169–179. Elsevier B.V.

doi:10.1016/j.geomorph.2015.03.009

- Egashira, S., Honda, N. & Itoh, T. (2001) Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow. *Phys. Chem. Earth, Part C Solar, Terr. Planet. Sci.* **26**(9), 645–650. doi:10.1016/S1464-1917(01)00062-9
- Egashira, S., Miyamoto, K. & Ito, T. (1997) Bed-load Rate in View of Two Phase Flow Dynamics. *Annu. J. Hydraul. Eng. JSCE* **41**(in Japanese), 789–794.
- Emmett, W. (1980) *A field Calibration of the Sediment-Trapping Characteristics of the Helley-Smith Bedload Sampler. Geol. Surv. Prof. Pap. 1139.*
- Espinoza, J. C. (2004) *Determinación del gasto sólido total y calibración del gasto sólido de fondo mediante los métodos de H. A. Einstein Y Meyer-Peter & Muller, para el Río Sama, región Tacna.* Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Fiedler, K., Strobl, T., Zunic, F. & Matthes, H. (2008) Velocity gauging with ADCP in rivers with bedload and sediment transport. *6th Int. Symp. Ultrason. Doppler Methods Fluid Mech. Fluid Eng.* (August), 53–56.
- Filizola, N. & Guyot, J. L. (2004) The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. *Hydrol. Sci. J.* **49**(1), 143–154. doi:10.1623/hysj.49.1.143.53990
- Gaeuman, D. & Jacobson, R. B. (2006) Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river. *J. Geophys. Res.* **111**(May), F02005. doi:10.1029/2005JF00041
- Hashiba, M., Kai, T., Yorozuya, A. & Motonaga, Y. (2000) Field observation of the river flood flow and suspended sediment distribution using ADCP Ishikari \_ River Hokkaido Gauging point 125–128.
- Holmes, R. R. & Holmes, Robert R, J. (2010) Measurement of bedload transport in sand-bed rivers: A look at two indirect sampling methods. *US Geol. Surv. Sci. Investig. Rep.* (1914), 236–252. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Measurement+of+Bedload+Transport+in+Sand-Bed+Rivers+:+A+Look+at+Two+Indirect+Sampling+Methods#0>
- Iroume, A. (2003) Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque (Valdivia)* **24**, 125–135. doi:10.4067/S0717-92002003000100010

- Jugaru Tiron, L., Coz, J. Le, Provansal, M., Panin, N., Raccasi, G., Dramais, G. & Dussouillez, P. (2009) Flow and sediment processes in a cutoff meander of the Danube Delta during episodic flooding. *Geomorphology* **106**(3–4), 186–197. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.geomorph.2008.10.016
- Julien, P. Y. (2010) *Erosion and Sedimentation*. (Cambridge University Press, Ed.), 2nd ed. New York, EEUU: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511806049
- Koseki, H., Yorozuya, A., Kudo, S., Iwami, Y. & Kitsuda, T. (2016) Development of a system to measure bed forms and vertical velocity profiles in a river channel 1557–1565.
- Lagos, P. & Buizer, J. (1992) El Niño and Perú: A Nation’s Response to Interannual Climate Variability. In: *Natural and Technological Disasters: Causes, Effects and Preventive Measures*, 224–236.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., Garcia, C. M. & Guerrero, M. (n.d.) Estimación del Transporte de Sedimentos de Fondo en un Gran Río con Perfilador Acústico Doppler.
- Lavado Casimiro, W. S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C. & Guyot, J. L. (2012) Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrol. Sci. J.* **57**(4), 625–642. doi:10.1080/02626667.2012.672985
- Lewis, W. & Saunders, J. (1989) Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochem.* **7** 203–240.
- Marengo, J. a. & Espinoza, J. C. (2015) Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* n/a-n/a. doi:10.1002/joc.4420
- Martin Vide, J. P. (1997) *Ingeniería fluvial*. (J. P. Martín, Ed.), Segunda. Cataluña, España: Edicions UPC.
- Morera, S. B. (2014) Erosión y transporte de sedimentos durante eventos El Niño a lo largo de los Andes occidentales. Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño” **1.4**.
- Mueller, B. D. S., Jewell, S. & Survey, U. S. G. (2016) *QRev — Software for Computation and Quality Assurance of Acoustic Doppler Current Profiler Moving-Boat Streamflow Measurements — User ’ s Manual*.

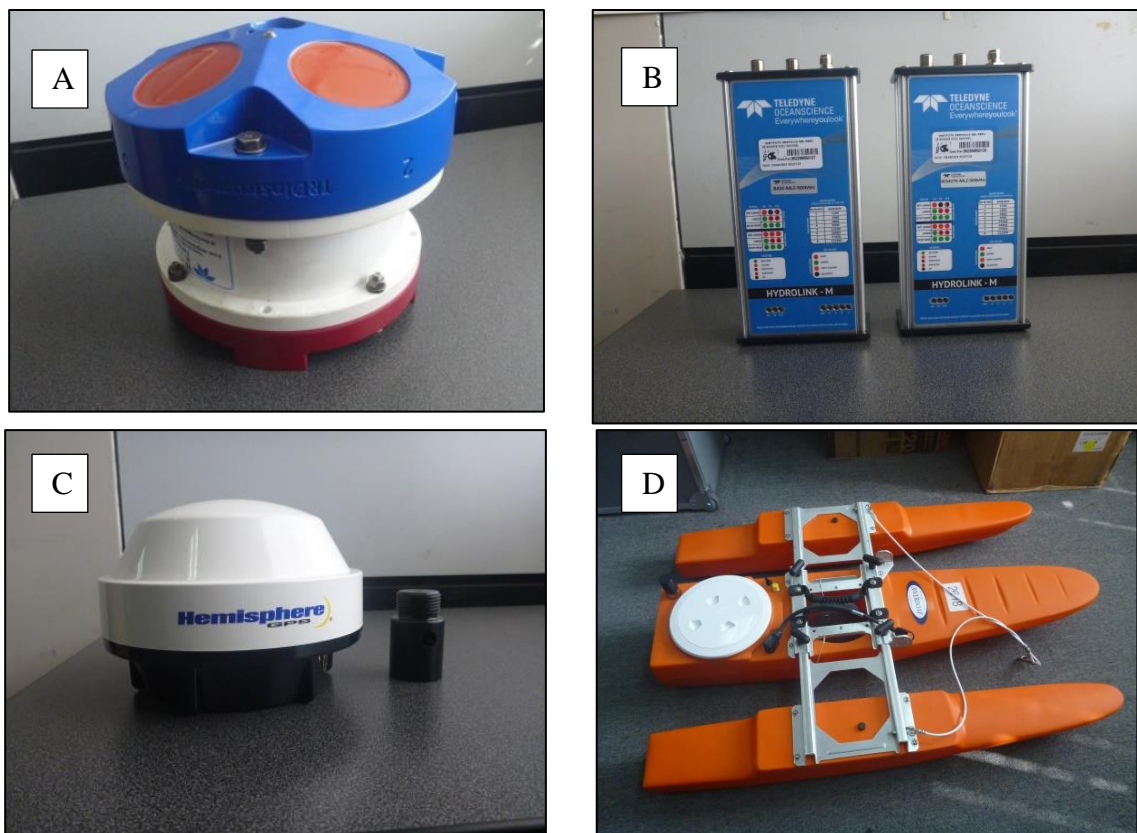
- Núñez J, S. & Zegarra L, J. (2006) *Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Puyango-Tumbes*. (J. Macharé O., V. Carlotto C. & L. Fídel S, Eds.), N°32. Lima, Peru: INGEMMET, Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- Okada, S. (2017) Comprehensive measurement techniques of water flow, bedload and suspended sediment in large river using Acoustic Doppler Current Profiler 1274–1280.
- OMM. (2011) *Guía de prácticas hidrológicas Volumen I*. doi:OMM-N° 168
- Pan, F., Wang, C. & Xi, X. (2016) Constructing river stage-discharge rating curves using remotely sensed river cross-sectional inundation areas and river bathymetry. *J. Hydrol.* **540**, 670–687. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.06.024
- Parsons, D. R., Jackson, P. R., Czuba, J. a., Engel, F. L., Rhoads, B. L., Oberg, K. a., Best, J. L., et al. (2013) Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth Surf. Process. Landforms* **38**(11), 1244–1260. doi:10.1002/esp.3367
- PEBPT. (2012) Resultados del tercer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial en las cuencas de los ríos Zarumilla y Puyango-Tumbes.
- Quincho, J. (2015) *Estudio experimental del transporte de sedimentos en suspensión y fondo y comparacion con formulas empiricas en los rios Puyango-Tumbes y Zarumilla*. Univerisdad Nacional Agraria La Molina.
- Ramooz, R. & Rennie, C. D. (2010) Laboratory Measurement of Bedload with an ADCP. *U.S. Geol. Surv. Sci. Investig. Rep. 2010-5091* 367–386.
- Rennie, C. D. (2004) Site specificity of bed load measurement using an acoustic Doppler current profiler. *J. Geophys. Res.* **109**(F3), F03003. doi:10.1029/2003JF000106
- Rennie, C. D., Millar, R. G. & Church, M. (2002) Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler. *J. Hydraul. Eng.* **128**(5), 473–483. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(473)
- Takahashi, K., Mosquera, K. & Reupo, J. (2012) El Índice Costero El Niño(ICEN):historia y actualización. *Boletín Técnico (IGP)* **1** (2), 8–9.
- Tapley, T. D. & Waylen, P. R. (1990) Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru. *Hydrol. Sci. Journal/Journal des Sci. Hydrol.* doi:10.1080/02626669009492444

- Teledyne RD Instruments. (2014) WIN RIVER II Software User's Guide. Retrieved from <http://www.rdinstruments.com/support/support.aspx>.
- Teledyne RD Instruments. (2014) WINRIVER II. San Diego. EEUU: Teledyne RD Instruments. Retrieved from <http://support.rdinstruments.com/>
- Turowski, J. M., Rickenmann, D. & Dadson, S. J. (2010) The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: A review of empirical data. *Sedimentology* **57**(4), 1126–1146. doi:10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x
- Unesco. (2010) *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas*. (J. D. Brea & F. Balocchi, Eds.), Documento. Montevideo. Uruguay: Programa Hidrológico Internacional (PHI).
- VanRijn, L. (1993) *Principles of Sediment Transport in Rivers Estuaries and Coastal Seas*, 111 ed. Amsterdam, Netherlands: Aqua Publication.
- Vauchel, P. (2009) Hydromeasd: Logiciel de gestión y tratamiento de datos hidrológicos y de sedimentos. Informe Técnico Proyecto Hybam Lima-Perú.
- Vericat, D., Church, M. & Batalla, R. J. (2006) Bed load bias: Comparison of measurements obtained using two ( 76 and 152 mm ) Helley-Smith samplers in a gravel bed river **42**, 1–13. doi:10.1029/2005WR004025
- Yang, C. T., Randle, T. J. & Daraio, J. et al. (2006) *Erosion and Sedimentation Manual*. doi:10.1300/J155v07n03\_01

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1

#### CONFIGURACIÓN Y PRUEBA DEL ADCP WORKHORSE RÍO GRANDE



**Figura 44:** Componentes principales del ADCP Workhorse Río Grande

- A) Perfilador acústico Doppler, Workhorse Río Grande 600-1200 kHz: El Workhorse Río Grande está diseñado para realizar aforos en tiempo real de perfiles de corrientes de forma temporal o permanente.
- B) Hydrolink Radio Modems: Son radios con un espectro amplio de frecuencias de 900 MHz o 2.4 GHz, con un máximo de 4 puertos seriales. El par de radios Hydrolink M se comportan como un puente de comunicación inalámbrico de doble sentido

(recepción y emisión), conectando equipos en un bote distante a una PC o a un dispositivo serial en la orilla, permitiendo que información serial sea compartida inalámbricamente.

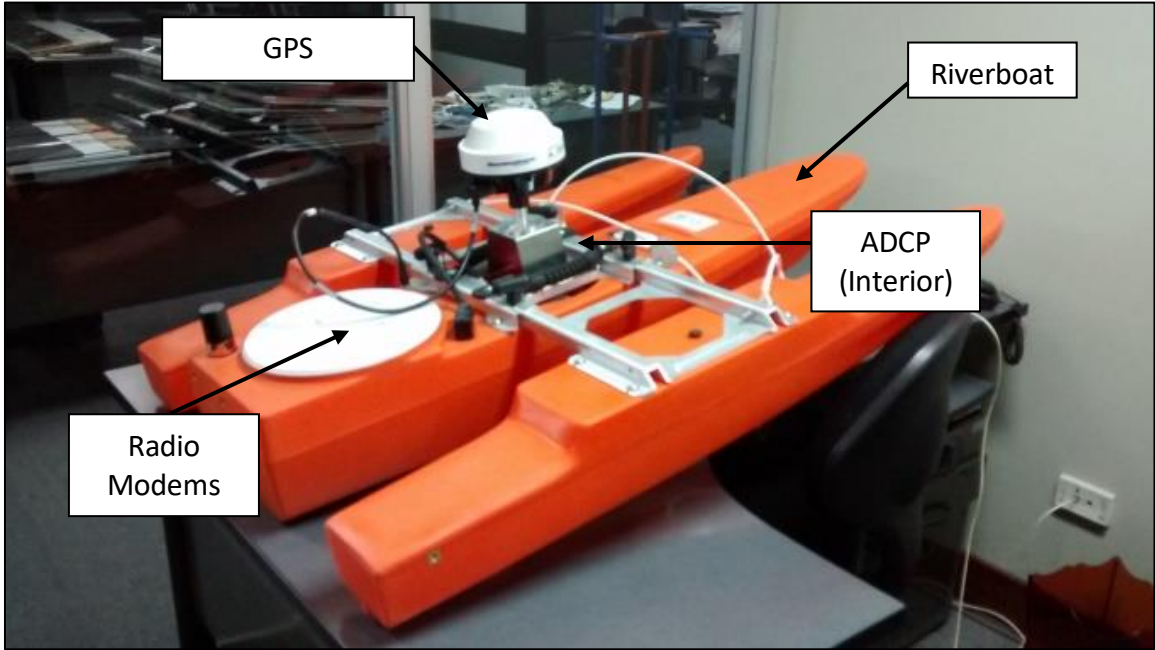
C) Receptor Hemisphere GNSS diferencial: Equipo GNSS con precisión de centímetros. Este equipo permite diferenciar el desplazamiento del flujo líquido y el sedimento de fondo.

D) Flotadores Riverboat: Dispositivo base donde se ensamblan los dispositivos antes mencionados. El ADCP y el GPS se colocan en ranuras especiales, mientras que las radios se introducen en un compartimiento hermético. Debido al material con que es fabricado y al diseño es ideal para el despliegue en la corriente.



**Figura 45: Prueba de conectividad del ADCP con laptop mediante radio modems**





ADCP Workhorse Río Grande montado en flotador

## ANEXO 2

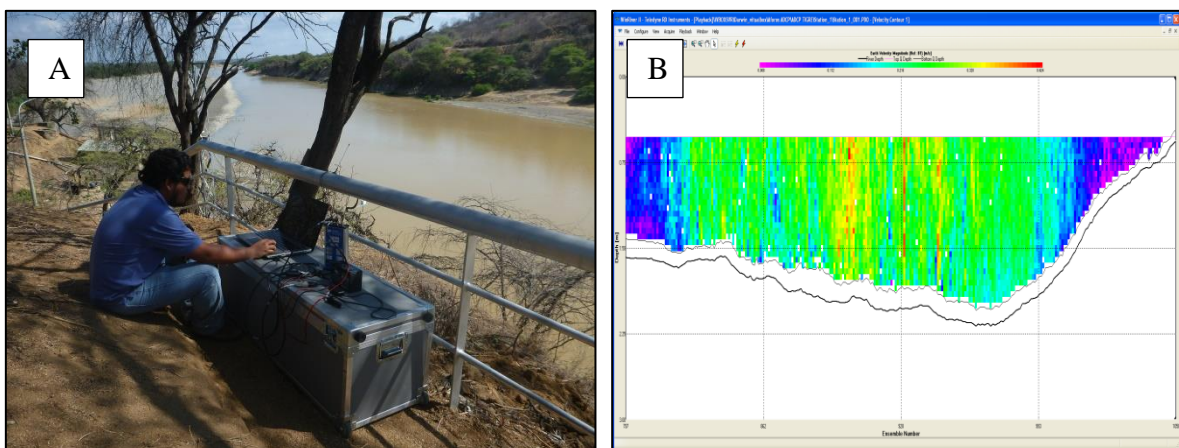
### PRIMERA CAMPAÑA DE AFOROS CON ADCP

La presente investigación no pudo haber sido realizada sin el valioso apoyo del Proyecto Especial Puyango Tumbes (PEBPT) tanto en personal como en instalaciones. El personal a cargo del trabajo de campo fue el Bach. Darwin Huamán y los técnicos aforadores en la estación El Tigre, los señores Manuel Mena y Antonio Florián.



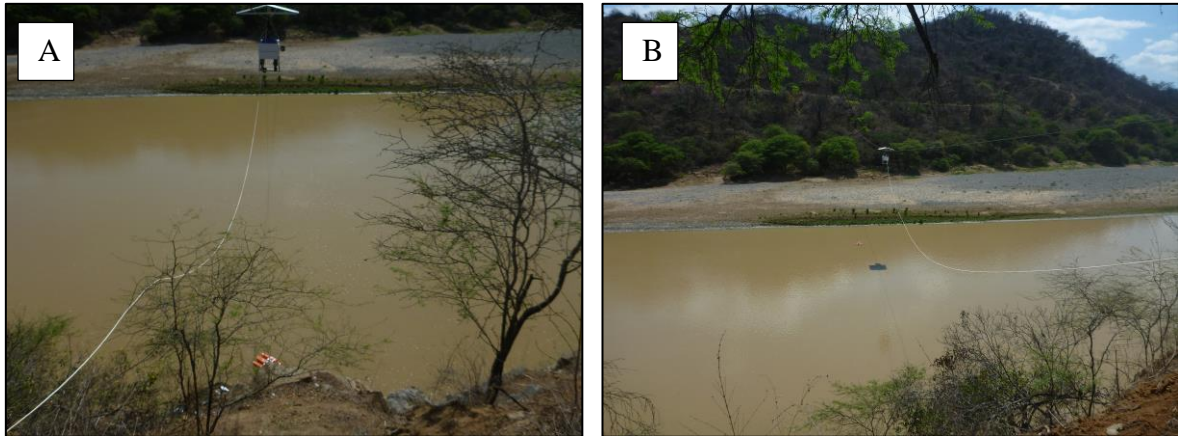
**Figura 46:** Inicio de la primera campaña de aforos con ADCP, en estación El Tigre

A) Transporte de equipos a la estación El Tigre, Río Tumbes. 17/12/2015; B) Ensamblado de equipos para la prueba de campo, izquierda Bach. Darwin Huamán y derecha Bach. Andrés Goyburo.



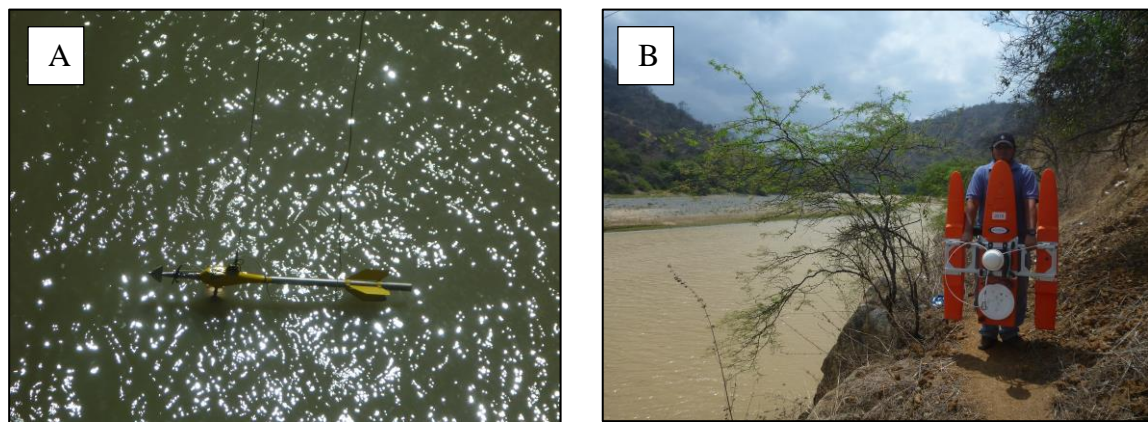
**Figura 47:** Aforo realizado el día 18/12/2015 en la estación El Tigre

- A) Realizando los aforos correspondientes en la estación El tigre, Río Tumbes 18/12/2015;  
B) Mapa de contorno de velocidades de la sección transversal (Caudal:  $24.063 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 48: Aforo realizado por ADCP**

- A) Inicio del aforo, a partir de la margen izquierda; B) Fin de la sección en la margen derecha



**Figura 49: Equipos utilizados para realizar aforos en estación El Tigre**

- A) Equipo actualmente utilizado para aforar en estación El Tigre, correntómetro tipo molinete; B) Perfilador acústico Doppler, ADCP Workhorse Rio Grande

### ANEXO 3

#### PROCESAMIENTO DE MUESTRAS EN LABORATORIO



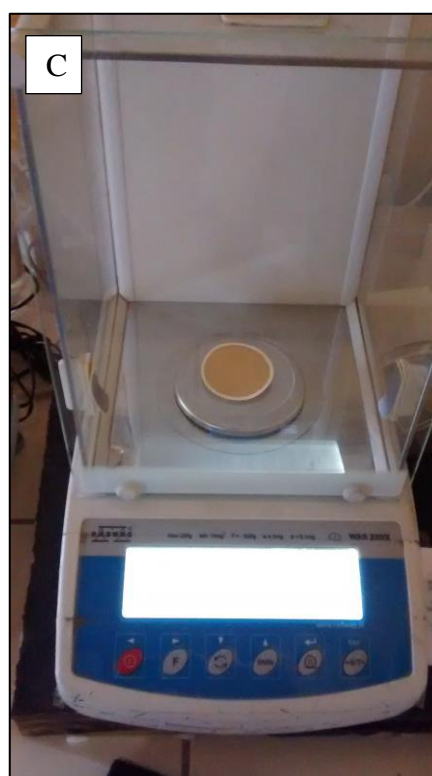
**Figura 50: Procesamiento de las muestras de sedimentos en suspensión**

A) Filtrado de muestras para sedimentos en suspensión

B) Secado de los filtros de celulosa

C) Pesado de los filtros secos de celulosa.

El procesamiento de las muestras de sedimentos en suspensión se realizó en el laboratorio del proyecto ORE - HYBAM en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) a cargo de la técnica laboratorista Andrea Malimba.



El software HYDROMESAD de uso exclusivo del proyecto HYBAM fue proporcionado por la Dra. Elisa Armijos, quien también brindó la capacitación en el uso del software.



## ANEXO 4

### PRESUPUESTO

Tabla 9: Presupuesto de la investigación

	<b>CONCEPTO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>Costo S/. (Nuevos soles)</b>
1	Muestreador sedimento de fondo	Helley-Smith	9,000.00
2	Perfilador acústico (ADCP)	Workhorse Río Grande 1200 kHz	131,498.40
3	Material de laboratorio	Filtro de celulosa y agua destilada	340.50
4	Materiales de Gabinete	Marcadores, cinta aislante, libretas	30.00
5	Material de Campo	Bolsas ziplox y frascos de muestreo	1,315.00
6	Pasajes	Nacionales	700.00
7	Viáticos	Alimentación, hospedaje y movilidad	400.00
8	Impresión del proyecto y fuentes de investigación	500 hojas	100.00
9	Recursos Humanos	Sueldo tesista	14,400.00
10	Alquiler auditorio	---	100.00
	<b>TOTAL</b>		<b>158,357.90</b>

**ANEXO 5**  
**BASE DE DATOS**

**Aforo con ADCP**

En la Tabla 10 se muestra la parte central de la sección aforada correspondiente al 07/04/2016. El largo de la sección (78.0 m) está dividida en 707 verticales correspondiendo una longitud de 0.11 metros, de mismo modo la profundidad (2.0 m) está dividida en 10 filas correspondiendo les un ancho de 0.2 metros, haciendo un total de 7070 celdas. Estas celdas contienen información de velocidad ( $m \cdot s^{-1}$ ) y área ( $m^2$ ) con lo que el software puede determinar un caudal final de  $321.96 m^3 s^{-1}$ .

**Tabla 10: Velocidades en la celdas del aforo con ADCP del 07/04/2016**

Vert (m) Prof(m)	38.06	38.17	38.28	38.39	38.50	38.61	38.72	38.83	38.94	39.06
0.2	2.03	1.95	2.13	1.92	2.12	1.90	2.15	2.04	2.10	2.08
0.4	2.20	2.16	2.02	2.35	1.94	2.05	2.25	2.18	1.66	2.21
0.6	2.42	2.21	2.32	2.23	1.95	2.13	2.41	2.10	2.20	2.20
0.8	2.51	2.15	2.25	2.24	2.27	2.04	2.26	1.99	2.21	2.24
1	2.19	2.29	2.40	2.31	2.50	2.40	2.69	2.24	2.14	2.11
1.2	2.12	1.90	2.43	2.25	2.30	2.30	2.52	2.33	2.27	2.00
1.4	2.12	2.13	2.20	2.34	2.02	2.73	2.33	2.13	1.95	2.21
1.6	2.23	2.30	2.23	2.54	2.04	2.40	1.95	2.12	2.06	2.18
1.8	1.89	2.05	2.17	2.38	2.17	2.04	2.37	1.92	2.25	1.97
2	2.03	2.08	2.16	2.24	2.18	2.14	2.20	2.09	2.15	2.10

Continuación Tabla 10

Vert (m) \ Prof(m)	Vert (m)									
	39.17	39.28	39.39	39.50	39.61	39.72	39.83	39.94	40.05	40.16
0.2	2.12	2.10	1.68	2.36	2.28	1.65	2.13	1.97	1.89	1.72
0.4	2.11	2.11	1.96	2.33	2.37	1.92	2.17	2.20	2.07	1.87
0.6	2.24	2.22	2.19	1.99	2.19	2.40	2.23	2.05	2.10	1.84
0.8	2.43	2.04	2.12	2.05	2.30	2.48	2.07	2.02	2.02	2.18
1	2.15	2.23	2.32	2.46	2.13	2.37	2.37	1.99	2.28	2.26
1.2	2.49	2.30	2.34	2.31	2.28	2.33	2.44	2.06	2.26	2.44
1.4	2.35	2.30	2.39	2.01	2.30	2.44	2.28	1.67	2.30	2.33
1.6	2.21	2.04	2.31	2.09	2.31	2.26	2.17	1.57	2.15	2.18
1.8	2.17	2.40	2.30	1.90	2.16	2.00	2.10	1.49	1.78	1.99
2	2.18	2.26	2.20	2.06	2.07	2.01	1.95	1.75	1.81	1.90

Vert (m) \ Prof(m)	Vert (m)						
	40.27	40.38	40.49	40.60	40.71	40.82	40.93
0.2	2.22	2.30	2.00	2.05	1.66	2.20	2.23
0.4	2.00	2.33	2.19	2.02	1.88	2.11	2.22
0.6	1.99	2.28	2.30	2.08	1.79	1.91	2.41
0.8	2.39	2.37	2.22	2.03	2.27	2.13	2.62
1	2.30	2.52	2.12	2.11	2.11	2.25	2.34
1.2	2.35	2.46	2.19	1.93	1.96	2.42	2.04
1.4	2.21	1.96	2.15	2.17	2.38	2.19	2.42
1.6	2.28	2.09	1.65	1.88	2.32	1.82	2.20
1.8	1.98	1.72	1.91	1.87	2.05	2.01	2.13
2	1.91	1.84	1.89	1.92	2.01	2.05	2.12