

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE  
SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN Y FONDO Y COMPARACIÓN CON  
FÓRMULAS EMPÍRICAS EN LOS RÍOS PUYANGO-TUMBES Y  
ZARUMILLA”**

Presentado por:

**JANET BRÍGIDA QUINCHO OLAZÁBAL**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÍCOLA**

Lima-Perú

2015

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE  
SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN Y FONDO Y COMPARACIÓN  
CON FÓRMULAS EMPÍRICAS EN LOS RÍOS PUYANGO-  
TUMBES Y ZARUMILLA”**

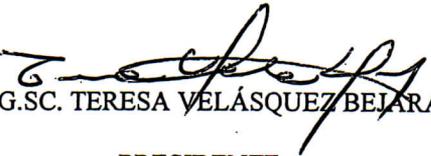
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

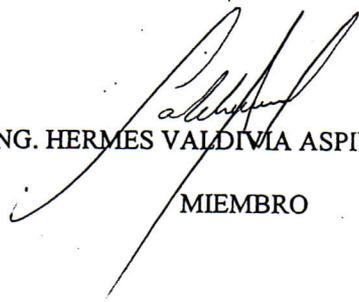
**BACH. JANET BRÍGIDA QUINCHO OLAZÁBAL**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

  
MG.SC. TERESA VELÁSQUEZ BEJARANO  
PRESIDENTE

  
MG.SC. RICARDO APACLLA NALVARTE  
PATROCINADOR

  
MG.SC. ROCÍO PASTOR JÁUREGUI  
MIEMBRO

  
ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA  
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2015



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

Los que suscriben, miembros del Jurado para la Sustentación de la Tesis titulada: “ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN Y FONDO Y COMPARACIÓN CON FÓRMULAS EMPÍRICAS EN LOS RÍOS PUYANGO – TUMBES Y ZARUMILLA”, presentado por su autor:

**JANET BRÍGIDA QUINCHO OLAZÁBAL**

Bachiller en Ciencias-Ingeniería Agrícola, luego de estudiar su contenido, se han reunido en la fecha, y han procedido a escuchar la exposición del autor, a formular las observaciones, preguntas pertinentes y luego de una evaluación del conjunto, la declaran:

(\*) APROBADA

con el calificativo de:

(\*\*) MUY BUENO

En consecuencia, el autor de la Tesis queda apto de recibir el TÍTULO DE INGENIERO AGRÍCOLA, de conformidad con lo estipulado en el artículo 45°, en concordancia con la Ley 30220.

La Molina, 01 de abril del 2015.

  
MG.SC. TERESA VELÁSQUEZ BEJARANO  
Presidente

  
MG.SC. ROCÍO PASTOR JÁUREGUI  
Miembro

  
ING. HERMES VALDIVIA ASPILCUETA  
Miembro

  
MG.SC. RICARDO APAÇLLA NALVARTE  
Patrocinador

(\*) Puede ser: APROBADA ó DESAPROBADA

(\*\*) Puede ser: REGULAR, BUENO, MUY BUENO ó SOBRESALIENTE

OBSERVACIONES:

\*\*\*\*\*

## **DEDICATORIA**

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP) el cual aporta significativamente en la toma de decisiones en beneficio de la sociedad peruana, con énfasis en la prevención y mitigación de desastres naturales y de origen antrópico.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Geofísico del Perú que mediante el “Proyecto Manglares de Tumbes” financiado por el IDRC de Canadá subvencionó los gastos para el desarrollo de la presente tesis.

Al apoyo brindado por el Proyecto HYBAM-IRD, UNALM, el Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (PEBPT), SENAMHI y ALA-Tumbes, en especial a los Ing. Jaime Otiniano, Desiderio Atoche, Jorge Carranza, Ramón Medina, Rosario Silva y Alfio Leiva, quienes me proporcionaron información para realizar este trabajo y a los colaboradores Manuel Mena, Florian, Emmer y Luis Oviedo por el apoyo durante los trabajos realizados en campo.

Al Ph.D. Sergio Morera mi asesor del IGP por su constante dedicación, orientación, críticas y consejos durante todas las etapas del desarrollo de la tesis; además por generar motivación en mi desarrollo profesional y sobre todo orientar mi interés en la hidrología e hidráulica fluvial.

Al Mg.Sc. Ricardo Apaclla mi patrocinador de la UNALM por las indicaciones y apoyo brindado durante el desarrollo y culminación de la tesis.

Al área de Clima por las enseñanzas que aprendí durante mi estadía en el IGP por parte del Dr. Ken, Dr. Jhan Carlo,... etc. y todos mis amigos de la pecera.

A todos mis amigos y amigas por los consejos y ánimos brindados durante esta etapa, en especial a Nilda, Marita, Fiorella, Mugi, Wily, Karen y a Uriel por sus muestras de cariño y motivación constante.

Finalmente agradezco a Dios por darme unos excelentes padres y hermanos. A mis padres Alberto y Brígida por su amor incondicional y dedicación ya que con su esfuerzo pude concluir mi carrera profesional y a su vez sus enseñanzas me brindaron todas las herramientas para ser una persona de bien en todos los aspectos de mi vida. A mis hermanos Lucho y Pol por sus muestras de afecto y estar presentes en cada paso que doy.

# INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1	CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	3
2.1.1	Transporte de sedimentos .....	3
2.1.2	Erosión.....	4
2.1.3	Principio de movimiento .....	4
2.1.4	Distribución granulométrica.....	6
2.1.5	Aforo líquido .....	7
2.1.6	Coefficiente de rugosidad de Manning (n) .....	10
2.2	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	13
2.2.1	Gasto sólido total.....	13
2.2.2	Gasto sólido en suspensión.....	16
2.2.3	Gasto sólido de fondo.....	19
2.2.4	Gasto sólido en función del gasto líquido .....	31
2.3	PROGRAMA HYDRACCESS.....	32
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	33
3.1	UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....	33
3.1.1	Ubicación.....	33
3.1.2	Recursos hidrológicos .....	34
3.1.3	Recursos hidrogeológicos.....	36
3.1.4	Geología .....	37
3.1.5	Situación ambiental .....	39

3.2	MATERIALES.....	40
3.2.1	Materiales de laboratorio y campo .....	40
3.2.2	Materiales de gabinete .....	40
3.3	METODOLOGÍA .....	40
3.3.1	Descripción general de las campañas de campo (misiones).....	42
3.3.2	Monitoreo de líquidos.....	44
3.3.3	Monitoreo de sedimento de fondo .....	52
3.3.4	Monitoreo de sedimento en suspensión.....	63
3.3.5	Estimación del gasto sólido de fondo a partir de fórmulas empíricas .....	66
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
4.1	OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO DE SEDIMENTOS DE FONDO.....	76
4.2	DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN Y DE FONDO .....	78
4.3	COMPARACIÓN GASTO SÓLIDO DE FONDO OBSERVADOS Y ESTIMADOS A PARTIR DE LAS FÓRMULAS EMPÍRICAS .....	82
V.	CONCLUSIONES.....	87
VI.	RECOMENDACIONES .....	89
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	91

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la clasificación del transporte de sedimentos en corrientes naturales.....	4
Figura 2: Corte Longitudinal esquemático de un cauce.....	5
Figura 3: Método sección promedio.....	7
Figura 4: Método media sección.....	9
Figura 5: Configuración típica de una medición con instrumento de efecto Doppler. ....	10
Figura 6: Muestreador horizontal instantáneo de sedimentos en suspensión.....	17
Figura 7: Muestreador vertical instantáneo de sedimentos en suspensión.....	17
Figura 8: Muestreador integral de punto de sedimento en suspensión. ....	18
Figura 9: Sonda de Turbiedad YSI-6V. ....	18
Figura 10: Trampa de arrastre de fondo (muesca). ....	21
Figura 11: Muestreador de fondo Helley- Smith. ....	22
Figura 12: Muestreador de fondo US BLM-modelo 8010.....	22
Figura 13: Parámetros de la Ecuación de Du Boys.....	25
Figura 14: Ubicación del área de estudio.....	33
Figura 15: Mapa Geológico de la zona de estudio.....	39
Figura 16: Optimización de la metodología para estimar el gasto sólido total.....	41
Figura 17: Mapa topográfico y ubicación de las estaciones hidro-sedimentológicas.....	43
Figura 18: Curva de calibración de aforos históricos- estación El Tigre (1995-2011).....	45
Figura 19: Histograma histórico de cotas – estación El Tigre. ....	46
Figura 20: Hidrograma de caudales histórico –estación El Tigre (1963-2014). ....	47
Figura 21: Hidrograma de caudales – estación El Tigre (enero-abril 2014).....	47
Figura 22: Histograma de caudales instantáneos – estación El Tigre.....	48
Figura 23: Ubicación de estaciones hidrométricas – cuenca Zarumilla.....	49
Figura 24: Hidrograma de caudales horarios en las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Zarumilla. ....	49
Figura 25: Regresión lineal simple de caudales - estación Palmales en función de estación Bolsico (2012-2014). ....	50

Figura 26: Regresión lineal simple de cotas en función de caudales - estación La Coja (2014).....	50
Figura 27: Regresión lineal simple de caudales en la estación Palmales en función de la estación La Coja (2014).....	51
Figura 28: Regresión lineal simple de caudales de la estación Bolsico en función de la estación La Coja (2014).....	51
Figura 29: Caudales instantáneos generados en la estación La Coja (2014). ....	52
Figura 30: Prototipos de muestreador de fondo Helley-Smith.....	53
Figura 31: Gradiente de velocidad de la estación El Tigre (Setiembre, 2007). ....	54
Figura 32: Vista panorámica de la estación El Tigre y La Coja. ....	55
Figura 33: Gradiente de velocidades (1) a partir de medición con ADCP estación El Tigre. ....	57
Figura 34: Gradiente de velocidades (2) a partir de medición con ADCP estación El Tigre. ....	57
Figura 35: Gradiente de velocidades promedio en la estación El Tigre (12/04/14).....	58
Figura 36: Perfil topográfico de la estación La Coja. ....	58
Figura 37: Box - plot de pesos de fondo para un rango de cotas –estación El Tigre.....	61
Figura 38: Modelo de gasto sólido de fondo en función del gasto líquido estación El Tigre (2013-2014). ....	61
Figura 39: Box - plot de pesos de muestras de fondo para un rango de cotas-estación La Coja.....	62
Figura 40: Modelo de gasto sólido de fondo en función del gasto líquido estación La Coja (2013-2014). ....	62
Figura 41: Box - plot concentración de sedimento en suspensión para un rango de cotas-estación El Tigre. ....	64
Figura 42: Modelo de gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido (2004-2014). ....	65
Figura 43. Box - plot de concentración de sedimento en suspensión para un rango de cotas-estación La Coja. ....	65
Figura 44: Modelo gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido estación La Coja (2013-2014).....	66
Figura 45: Análisis fotográfico de muestras superficiales en las estaciones El Tigre y La Coja.....	69
Figura 46: Granulometría de muestras superficiales en las estaciones El Tigre y La Coja.....	70
Figura 47: Granulometría sub superficial del lecho del río en las estaciones El Tigre y La Coja.....	71

Figura 48: Perfiles de aforo de caudales de la sección El Tigre. ....	73
Figura 49: Relación de gasto sólido en función del gasto líquido-río Puyango-Tumbes. .	78
Figura 50: Relación del gasto sólido en función del gasto líquido-río Zarumilla.....	79
Figura 51: Dinámica del transporte de sedimentos en la cuenca del río Puyango-Tumbes y Zarumilla.....	80
Figura 52: Comparación del gasto sólido de fondo anual en función del caudal líquido promedio anual mediante ecuaciones empíricas y datos observados-río Puyango-Tumbes. ....	82
Figura 53: Diagrama de Taylor -río Puyango-Tumbes.....	83
Figura 54: Comparación gasto sólido de fondo en función del caudal líquido mediante ecuaciones empíricas y datos observados.....	85
Figura 55: Diagrama de Taylor – río Zarumilla.....	86
Figura 56. Material superficial expuesto en la sección de la estación El Tigre (campana de campo N°1-diciembre 2013). ....	96
Figura 57. Granulometría del material de lecho expuesto de lecho en la estación El Tigre. ....	96
Figura 58. Granulometría del material de lecho expuesto en la estación La Coja.....	97
Figura 59. Estación hidrosedimentológica El Tigre.....	97
Figura 60. Pruebas de medición con el muestreador de fondo Helley Smith en la estación El Tigre. ....	98
Figura 61. Charla sobre el protocolo de muestreo de sedimentos de fondo en la estación La Coja.....	98
Figura 62. Pruebas de muestreo con el muestreador de fondo Helley- Smith en la estación La Coja.....	99
Figura 63. Calibración de un equipo ADCP. ....	99
Figura 64. Preparación del carro huaro para mediciones de sedimento en la estación El Tigre.....	100
Figura 65. Mediciones con el muestreador de fondo Helley-Smith en la estación El Tigre. ....	100
Figura 66. Material superficial de lecho expuesto después de la época húmeda en la estación El Tigre. ....	101
Figura 67. Material de lecho expuesto después de la época húmeda en la estación La Coja.....	101
Figura 68. Secado al ambiente de muestras de sedimento de fondo.....	102
Figura 69. Análisis en laboratorio de muestras de sedimento de fondo.....	102
Figura 70. Análisis de laboratorio de muestras de sedimento en suspensión. ....	103
Figura 71. Tamizado de muestras de sedimento de fondo. ....	103

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Coeficiente de Manning $n_0$ para cauces naturales .....	11
Cuadro 2: Correcciones para el cálculo del coeficiente de rugosidad $n$ .....	12
Cuadro 3: Resumen de variables de las fórmulas de gasto sólido.....	13
Cuadro 4: Resumen de parámetros morfológicos de las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla.....	36
Cuadro 5: Inventario de estaciones ubicadas en las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla.....	44
Cuadro 6: Parámetros de cálculo del muestreador de fondo Helley Smith (El Tigre) .....	60
Cuadro 7: Parámetros de cálculo del muestreador de fondo Helley Smith (La Coja).....	60
Cuadro 8: Descripción de las ecuaciones de sedimento de fondo.....	67
Cuadro 9: Resumen datos obtenidos mediante análisis fotográfico .....	69
Cuadro 10: Diámetros representativos de las partículas en la estación El Tigre.....	72
Cuadro 11: Diámetros representativos de las partículas en la estación La Coja .....	72
Cuadro 12: Parámetros de forma de la estación El Tigre .....	73
Cuadro 13: Parámetros de forma de la estación La Coja .....	73
Cuadro 14: Parámetros hidráulicos en la estación El Tigre.....	74
Cuadro 15: Parámetros hidráulicos en la estación La Coja .....	74
Cuadro 16: Coeficiente de Manning (Ecuación de Manning).....	75
Cuadro 17: Presupuesto equipos y materiales .....	104
Cuadro 18: Presupuesto de Laboratorio .....	105
Cuadro 19: Presupuesto de Operación.....	105

## ANEXOS

ANEXO 1: CAMPAÑAS DE CAMPO Y ANALISIS DE MUESTRAS .....	96
ANEXO 2: PRESUPUESTO .....	104

## RESUMEN

El Objetivo principal de esta tesis fue cuantificar el transporte de sedimentos de fondo y en suspensión mediante datos observados y compararlos con los estimados a partir de fórmulas empíricas en los ríos Puyango-Tumbes (PT) y Zarumilla (ZA). Para ello, mediante el Proyecto Manglares de Tumbes durante el 2013-2014 por primera vez en el Perú se estableció una metodología de monitoreo de sedimento de fondo mediante la combinación de un equipo (Helley-Smith) y el uso del ADCP (Perfilador de Corriente Acústico Doppler). Los sedimentos en suspensión ya venían siendo monitoreados por el observatorio HYBAM a partir del año 2004, para este estudio en particular se utilizó una nueva estrategia de muestreo de sedimento en suspensión. En la cuenca PT, se obtuvo un gasto sólido total igual a 1.6 millones de toneladas anuales ( $340 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ ), de los cuales el 98 por ciento se transporta en suspensión y un 2 por ciento en fondo. Para la cuenca ZA, se obtuvo un gasto sólido total igual a 0.1 millones de toneladas anuales ( $136 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ ), de los cuales el 75 por ciento se transportan en suspensión y un 25 por ciento en fondo. Los resultados muestran la alta variabilidad de la dinámica del transporte de sedimentos en cuencas geográficamente cercanas pero con características hidráulicas diferentes (granulometría de lecho móvil, velocidad del flujo, pendiente, extensión y factor de forma). Por otro lado, se comparó los resultados del transporte de sedimento de fondo con estimados a partir de ecuaciones empíricas, todas las fórmulas empíricas muestran un alto rango de sobreestimación con un mejor ajuste de la fórmula de Yalin. Sin embargo, esto se limita a un rango de caudales monitoreados durante el 2013-2014 comprendidos entre 50 a  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  y de 1 a  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  para el río PT y ZA respectivamente

Palabras claves: sedimento de fondo, sedimento en suspensión, gasto sólido total, estrategia de muestreo.

## **ABSTRACT**

The main objective of this thesis was to quantify the transport of bedload and suspended sediment using observed data in order to compare them with those estimated values from empirical formulas in Puyango-Tumbes (PT) and Zarumilla (ZA) rivers. For this purpose, the Tumbes Mangrove Project in 2013-2014 enabled that for the first time in Peru a monitoring methodology for bedload was established by combining the use of an instrument called Helley-Smith and the ADCP (Current Profiler Acoustic Doppler). Suspended sediments have already been monitored by HYBAM observatory from 2004 and for this particular research a new suspended sediment sampling strategy was performed. In the PT basin, the average annual total sediment load transported was equal to 1.6 million tons per year ( $340 \text{ t.km}^{-2}.\text{year}^{-1}$ ), of which 98 percent is transported in suspension and 2 percent as bedload. For ZA basin, the average annual total sediment load transported was equal to 0.1 million tons per year ( $136 \text{ t.km}^{-2}.\text{year}^{-1}$ ), of which 75 percent is transported in suspension and 25 percent as bedload. The results show the high variability of the dynamics of sediment transport in basins geographically close but with different hydraulic characteristics (granulometry of moving-bed, flow velocity, slope, size and form factor). Furthermore, the results of bedload were compared with estimated values from empirical equations and all of them show a high rate of overestimation with better adjustment for Yalin equation. However, this is limited to a range of flow monitored during 2013-2014 from 50 to 600  $\text{m}^3/\text{s}$  and from 1 to 50  $\text{m}^3/\text{s}$  for the rivers PT and ZA respectively.

Keywords: bedload, suspended sediment, total sediment load, sampling strategy.

## I. INTRODUCCIÓN

Los ríos son básicamente agentes de erosión y transporte, transportan agua y sedimentos hacia los océanos (Knighton, 1998). El transporte de sedimentos se da mediante dos mecanismos: el material que se mantiene suspendido en un flujo “sedimento en suspensión” y el material que se desplaza en contacto o muy próximo al lecho “sedimento de fondo”. El transporte de sedimentos se da desde las cabeceras de las cuencas hacia zonas de deposición alterando la biología, vegetación, geomorfología, calidad de agua, actividades antrópicas hasta incluso la permanencia y periodo de vida de obras de infraestructura hidráulica.

Los ríos Puyango-Tumbes (PT) y Zarumilla (ZA) forman dos cuencas de montaña tropical que se originan en el Ecuador y terminan su recorrido en el Perú, ambas son la principal fuente de agua dulce y sedimentos para el Santuario Nacional Manglares de Tumbes. Las altas concentraciones de sedimentos en el norte del Perú son altamente estacionales y ocurren con gran frecuencia durante eventos extremos como el mega El Niño (1982-83 y 1997-98) cambiando la geomorfología y la bioquímica en la comunidad del manglar así como daños a las infraestructuras existentes. El conocimiento para monitorear y cuantificar el transporte de sedimentos en el Perú es aún desconocido, limitado por la escasa información y la gran inversión que se requiere. Actualmente en la ingeniería fluvial se vienen aplicando fórmulas empíricas para estimar el gasto sólido total. Sin embargo, dichas fórmulas como la de Yalin; Schoklitsch; Meyer-Peter & Muller; Van Rijn; Einstein-Brown; Du Boys y Stramb - Pernecker y Vollmer han sido desarrolladas con rangos limitados de aplicación.

En el año 2004 el observatorio HYBAM inició los registros continuos de material en suspensión en la estación El Tigre (río Puyango-Tumbes). Mediante el Proyecto Manglares de Tumbes desarrollado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) con financiamiento del Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo de Canadá (IDRC, por sus siglas en inglés) se inició el muestreo estratégico de sedimentos en suspensión y de fondo en las estaciones El Tigre y La Coja (río Zarumilla) durante el año 2013-2014. Observar el movimiento del sedimento de fondo es complicado, debido a su variabilidad espacio-

temporal en el cauce del río. Sin embargo, mediante la combinación de un equipo tradicional (Helley-Smith) y el uso del ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) se ha logrado obtener una serie de datos observados confiables. A partir de ello, se estableció una metodología de monitoreo de sedimentos de fondo, se entendió la dinámica entre el transporte de sedimentos de fondo y suspensión y se comparó el gasto sólido de fondo observado y el estimado mediante las fórmulas empíricas de: Yalin; Schoklitsch; Meyer-Peter & Muller; Van Rijn; Einstein-Brown; Du Boys y Stramb y Pernecker y Vollmer.

### **Objetivo General**

- Cuantificar el transporte de sedimentos de fondo y en suspensión mediante datos observados y compararlos con los estimados a partir de fórmulas empíricas.

### **Objetivo Específicos**

- Establecer una metodología para el monitoreo de sedimentos fluviales de fondo.
- Cuantificar y entender la dinámica entre el transporte de sedimento de fondo y suspensión para las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla.
- Comparar el gasto sólido de fondo observado y el estimado mediante las siguientes fórmulas empíricas: Meyer-Peter & Muller; Einstein-Brown; Schoklitsch; Du Boys; Yalin; Van Rijn.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES**

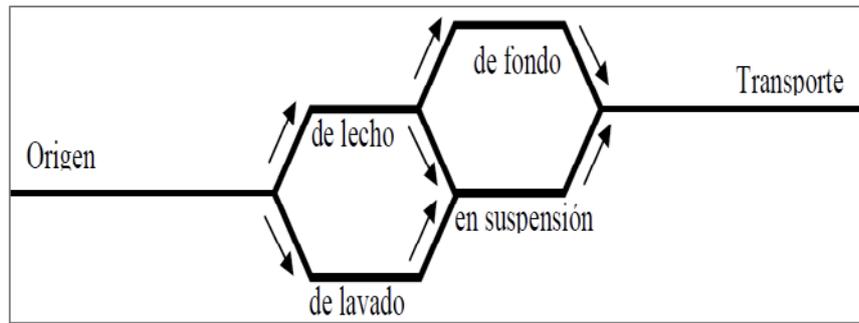
#### **2.1.1 Transporte de sedimentos**

Los sedimentos que transporta una corriente de agua son consecuencia natural de la degradación del suelo, puesto que el material procedente de la erosión llega a la corriente a través de los tributarios menores. En un punto cualquiera del río, el material que viene de aguas arriba puede seguir siendo arrastrado por la corriente y cuando no hay suficiente capacidad de transporte este se acumula dando lugar a los llamados depósitos de sedimentos (Maza, 1996).

Espinosa et al. (2004), señalan que el transporte de sedimentos establece que las variables que controlan el movimiento de sedimentos en un cauce natural son la capacidad de transporte del cauce y la disponibilidad de sedimento. La capacidad del transporte es la máxima carga que puede transportar un flujo y la disponibilidad es la existencia de material para ser movilizado por un flujo.

El transporte de sedimentos comprende a las partículas que ruedan y se deslizan sobre el fondo, a otras que ocasionalmente permanecen suspendidas pero que normalmente se encuentran en el fondo hasta que un núcleo de turbulencia de fuerte intensidad las recoge y las hace saltar, y a las partículas más finas que están en suspensión por acción de la turbulencia (Aguirre, 1983).

Martin (2003), nos dice que el transporte de sedimentos por un río puede clasificarse atendiendo a dos criterios: según el origen del material y según el modo de transporte. Según el origen del material el sedimento puede ser de lecho o de lavado. Según el modo de transporte, el sedimento puede ser transportado en suspensión (sostenido por la turbulencia del flujo) o por el fondo (rodando, deslizando o saltando). En la Fig.1 se muestra el esquema de dicha clasificación.



**Figura 1: Esquema de la clasificación del transporte de sedimentos en corrientes naturales.**

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

### 2.1.2 Erosión

La erosión es el complejo proceso de separación y transporte de las partículas del suelo pendiente abajo, por la acción de la lluvia y la escorrentía (Martin, 2002). Por otro lado, García (1976), define la erosión como el proceso físico que consiste en el desprendimiento y transporte de materiales del suelo por los agentes de erosión y del intemperismo. Los factores básicos que contribuyen a la magnitud de la erosión son la topografía, el clima (precipitación, escorrentía), tipo de suelo (estructura, textura, contenido de humedad, densidad).

La vegetación es un factor primordial de la conservación de los suelos. Toda planta defiende al suelo de la acción perjudicial de las lluvias, aunque en forma y proporciones diferentes. Los principales efectos de la vegetación están relacionados con la protección del suelo son: Intercepta las gotas de lluvia y reduce la escorrentía, retarda la erosión al disminuir la velocidad de la escorrentía, mejora la agregación y porosidad del suelo, aumenta la actividad biológica y capacidad de almacenaje del agua de suelo (FAO.1994).

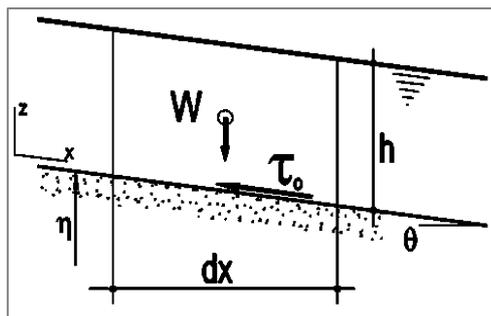
### 2.1.3 Principio de movimiento

Un problema estrechamente ligado a la erosión, es conocer las circunstancias en que se produce el desplazamiento de una partícula del fondo por efecto de la fuerza de arrastre del agua. La situación en la que se inicia el movimiento de las partículas de fondo se llama

umbral o inicio de movimiento (Martin, 2002). La acción del agua sobre el lecho puede caracterizarse por una tensión cortante sobre el fondo  $\tau_0$ . La resistencia de la partícula a ser movida se relaciona con su peso sumergido el cual es función del peso específico sumergido  $(\gamma_s - \gamma)$  y el diámetro (D) del cual se caracteriza el volumen de la partícula, formando con estas variables el parámetro adimensional  $\bar{\tau}$  (Ec.2.6) o tensión de corte adimensional (Jimenez, 2006).

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)D} \quad 2.6$$

Esta relación compara la fuerza que tiende a producir el movimiento (acción de arrastre proporcional a  $\tau_0 D^2$ ) con la fuerza que procura estabilizarlo o mantenerlo en reposo (acción del peso proporcional a  $(\gamma_s - \gamma) D^3$ ). Analizando el equilibrio de fuerzas en un tramo de cauce de longitud diferente en el sentido de la corriente, la componente del peso del volumen de control es contrarrestada por la fuerza de rozamiento en su contorno como se aprecia en la Fig.2 (Martín, 2002).



**Figura 2: Corte Longitudinal esquemático de un cauce.**

Para un cauce prismático, el peso del líquido “W” es igual al producto del peso específico por volumen de control  $W = \gamma \cdot A \cdot dx$  donde “A” es el área transversal del cauce. La componente en la dirección del flujo  $W_x = \gamma \cdot A \cdot dx \cdot \sin \theta$ . Si el ángulo “ $\theta$ ” es pequeño  $\sin \theta \cong \tan \theta \cong S$  siendo “S” la pendiente del tramo de cauce analizado.

Por otro lado, existe una fuerza de fricción aplicada en todo el contorno del cauce que se opone al escurrimiento  $\tau_0 \cdot P \cdot dx$ , donde “P” es el perímetro mojado del cauce. Analizando el equilibrio de ambas fuerzas  $\tau_0 \cdot P \cdot dx = \gamma \cdot A \cdot S \cdot dx$  resulta la Ec. 2.7.

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot S \quad 2.7$$

Donde:

$\gamma$	Peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
S	Pendiente media de la cuenca	-
R	Radio Hidráulico	m
$\tau_0$	Tensión cortante sobre el fondo	Kgf/m <sup>2</sup>

### 2.1.4 Distribución granulométrica

Los sedimentos naturales están compuestos de granos que tienen una amplia variedad de tamaños, formas y velocidades terminales, por lo que es conveniente recurrir a los métodos estadísticos para describir estas características. El comportamiento de los sedimentos en un río depende de la distribución granulométrica (Ryan y Porth, 1999). El procedimiento para obtener la distribución de tamaños, consiste en la división de una muestra en un número de clases de tamaños y se le denomina generalmente como análisis mecánico (Bowles, 1981). Los resultados de dichos análisis se presentan generalmente como curvas de distribución acumulativa de frecuencias de tamaños en las que se grafica el tamaño contra la fracción de porcentaje en peso de un sedimento que es mayor o menor a un determinado tamaño (Aguirre, 1983).

De acuerdo a (Simona y Senturk, 1977) se definen los siguientes diámetros característicos:

- D<sub>35</sub> : diámetro de la malla por donde pasan el 35 por ciento de los sedimentos de la muestra. Es el diámetro característico propuesto por Einstein para representar el diámetro de la muestra.
- D<sub>40</sub> : diámetro usado por Schoklitsch para representar la muestra
- D<sub>50</sub> : diámetro que en muchos casos representa el diámetro medio. Shields utilizo este diámetro para su estudio del inicio del movimiento.
- D<sub>65</sub> : diámetro utilizado por Einstein para representar la rugosidad de granos.
- D<sub>84</sub> : diámetro derivado de un análisis probabilístico. Se utiliza para definir la graduación del material
- D<sub>m</sub> : diámetro medio aritmético. Se puede obtener de:

$$D_m = \frac{\Delta_1 D_1 + \Delta_2 D_2 + \Delta_3 D_3 \dots + \Delta_n D_n}{100} = \sum \frac{A_i D_i}{100} \quad 2.8$$

Dónde:

$\Delta_i$  : Representa una porción del porcentaje del gráfico de distribución granulométrica

$D_i$  : Valor medio del diámetro que corresponde a  $\Delta_i$

### 2.1.5 Aforo líquido

El caudal fluvial, expresado en unidades volumen por unidad de tiempo, es la tasa de agua que discurre a través de una sección transversal. El caudal en un instante dado puede medirse utilizando varios métodos, y la selección de estos dependerá de las condiciones existentes (OMM, 2011). Los métodos más comunes para medir el flujo líquido en ríos son:

#### a. Métodos tradicionales observacionales

Las mediciones de velocidad se efectúan en uno o más puntos de cada vertical mediante el uso de molinete, carretes o correntómetros. La exactitud de la medición dependerá del número de verticales en que se obtengan observaciones de profundidad y de velocidad. Las verticales estarán situadas de modo que definan las variaciones de velocidades (OMM, 2011). El proceso numérico se puede hacer a través de dos métodos:

- **Sección promedio:** en este método los flujos parciales son calculados para cada subsección entre verticales, a partir del ancho, de la media de las profundidades y de la media de las velocidades entre las verticales en cuestión. La distribución de las áreas se realiza tal como se aprecia en la Fig.3 (Sotelo, 2009).

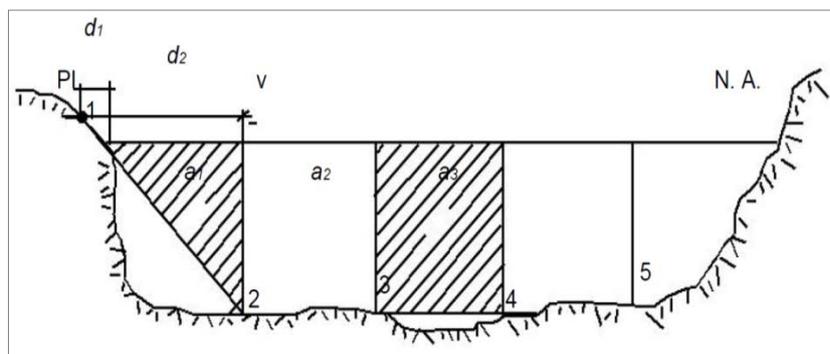


Figura 3: Método sección promedio.

Dónde:

$a_1$	área	$m^2$	Procedimiento para el cálculo de la descarga
$v_1$	velocidad	$m/s$	
$q_1$	Caudal unitario	$m^3/s$	

de líquidos por el Método de la sección media (media de las velocidades medias en verticales subsecuentes).

Cálculos de los flujos en los segmentos:

$$q_{a1} = v_{a1} * a_1$$

$$q_{a2} = v_{a2} * a_2$$

$$q_{an} = v_{an} * a_n$$

Para el cálculo del flujo total se utiliza la Ec. 2.1.

$$Q = \sum q_{ij} \tag{2.1}$$

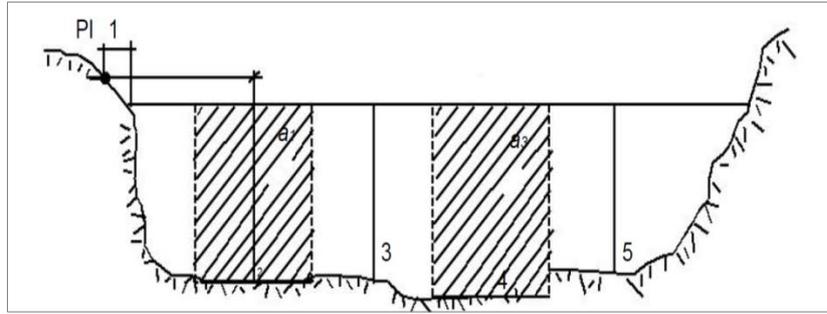
Para el cálculo del área total se realiza la suma de las áreas parciales, como se indica en la Ec. 2.2

$$A = \sum a_i \tag{2.2}$$

El cálculo de la velocidad media se determina según la Ec.2.3.

$$\bar{V} = \frac{q_{ij}}{a_i} \tag{2.3}$$

- **Media sección:** el método de media sección es el más utilizado por los técnicos de las entidades operadoras de redes hidrométricas, pues consiste en el cálculo de los flujos parciales, por medio de la multiplicación de la velocidad media en la vertical y por la suma de las semi distancias entre las verticales adyacentes. La distribución de las áreas se realiza tal como se aprecia en la Fig.4 (Sotelo, 2009).



**Figura 4: Método media sección.**

Dónde:

$a_1$	área	$m^2$
$v_1$	velocidad	$m/s$
$q_1$	caudal unitario	$m^3/s$
$d_1$	distancia	$m$
$p_1$	perímetro	$m$

Procedimiento para el cálculo de la descarga de líquidos por el método de la media sección (promedio de los segmentos subsiguientes).

El área de los segmentos se determinada de acuerdo a la Ec. 2.4.

$$a_1 = (d_2 - d_1) * \left[ \frac{(p_2 + p_1)}{2} \right] \quad 2.4$$

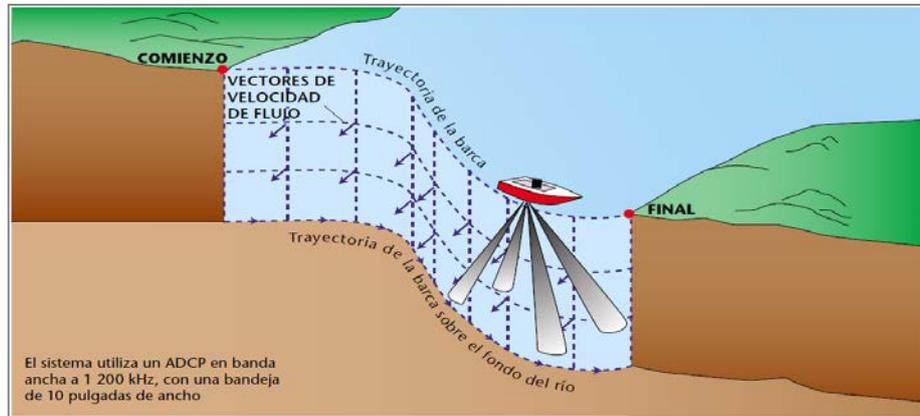
Finalmente el cálculo de los flujos unitarios se determina por Ec. 2.5.

$$q_{a1} = \bar{v}_1 * a_1 \quad 2.5$$

## **b. Métodos acústico (Efecto Doppler)**

Efecto Doppler, llamado así por Christian Andreas Doppler (1842), consisten en la variación de la longitud de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento. Un perfilador por corrientes por efecto Doppler más conocido es el ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). La evolución de la tecnología de afecto Doppler ha hecho de estos instrumentos una alternativa viable para medir el caudal en ríos y grandes corrientes de agua. El instrumento transmite un impulso acústico de energía a través del agua de manera semejante a los ruidos de los submarinos, aunque a frecuencias mucho más elevadas. Esta energía se refleja en las partículas presentes en suspensión en el agua, que se desplazan con ésta, y regresa 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 respecto 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 (USGS,2009).



**Figura 5: Configuración típica de una medición con instrumento de efecto Doppler.**

Este método permite calcular el caudal a medida que la embarcación atraviesa el río. El resultado de una medición no es suficiente para proporcionar un valor exacto. Para calcular el caudal del río es necesario realizar varias mediciones (OMM, 2011).

### 2.1.6 Coeficiente de rugosidad de Manning (n)

La rugosidad es función del material que está constituido. En la hidráulica fluvial en ocasiones se estima el caudal mediante procedimientos indirectos. Uno de los métodos más conocidos y de aplicación universal es la Ecuación de Manning el cual se fundamenta en parámetros de la sección hidráulica (área, perímetro, radio hidráulico, pendiente) y el coeficiente de rugosidad. Los parámetros hidráulicos son fáciles de determinar si se ha definido el tipo de sección y la diferencia de niveles. Sin embargo estimar el coeficiente de rugosidad (n) tiene mayor grado de dificultad (Osio et al., 2000). Uno de los métodos más conocidos para estimar el (n) es planteado por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (N.R.C.S), cuyo objetivo es estimar el (n) a partir de un valor tabulado al cual se le aplica una serie de modificaciones de acuerdo a las características del tramo que se analiza (Chow, 2000).

De acuerdo a (Coronado, 1992) para la selección de n se utiliza la siguiente expresión.

$$n = n_0 + n_1 + n_2 + n_3 \quad 2.9$$

Dónde:

- $n_0$  : valor correspondiente al material que compone el perímetro mojado en un canal recto, uniforme y limpio. De acuerdo al Cuadro 2.
- $n_1$  : corrección por la calidad de mantenimiento, existen tres opciones: buen mantenimiento que no se dará en una quebrada; regular, cuando el lecho opera con algunas erosiones o acumulaciones de sedimentos que ocupen hasta 10 por ciento de la sección transversal y una vegetación baja a media, y la tercera que considera un mal mantenimiento cuando la sección no se encuentra limpia y la vegetación alcanza el tirante de agua.
- $n_2$  : corrección referida a cambios de condición de flujo. Presenta dos casos: interferencia menor, que considera los cambios en las dimensiones de la sección transversal y de interferencias apreciables, cuando las diferencias en las dimensiones de los tirantes por las curvas provocan condiciones de flujos diferentes velocidades y tirante como las quebradas.
- $n_3$  : corrección referida al valor adicional por acumulación de sólido de fondo, toma el mayor valor.

En el Cuadro 1 (Coronado, 1997), se muestra los valores para la corrección de manning respecto al que compone la sección de aforo.

**Cuadro 1: Coeficiente de Manning  $n_0$  para cauces naturales**

Características	Mínimo	Normal	Máximo
1. Curso anchos en la superficie a nivel de crecida menor a 33m			
a. En planicie			
1. Recto, fondo plano sin pozas profundas y limpias	0.025	0.03	0.033
2. Igual que (1) pero con piedras y pastos	0.03	0.035	0.04
3. Sinuoso, con algunas pozas y bancos	0.033	0.04	0.045
4. Igual que (3) con piedras y pastos	0.035	0.045	0.05
5. Tramados con depósitos, pastos y pozas profundas	0.05	0.07	0.08
6. Igual que (5) más ramas y arbustos	0.075	0.1	0.125
b. En montaña, sin vegetación en el curso, pendiente suave usualmente pronunciada			
1. Lecho con grava, cantos, rocas	0.035	0.045	0.06

2. Igual que (1) más alguna vegetación y arbustos	0.04	0.05	0.07
2. En planicie con cauce de inundación			
a. Limpio	0.02	0.03	0.04
b. Paturas, sin arbustos	0.03	0.035	0.05
c. Con arbustos y árboles	0.03	0.04	0.05
d. Con arbustos y árboles	0.04	0.06	0.08
e. Igual que (d) pero algunos de ellos caídos	0.04	0.1	0.12
f. Igual que (d) pero el nivel de inundación alcanza las ramas	0.10	0.12	0.16
2. En planicie con anchos en la superficie al nivel de inundación mayor de 33.0 m			
a. Sección regular sin rocas y arbustos	0.025		0.06
b. Sección irregular y áspera	0.035		0.10
c. Mediciones en ríos de la Selva Peruana Amazonas (19 000m <sup>3</sup> /s)	0.037		0.051

En el Cuadro 2 (Coronado, 1997), se muestra los valores de corrección para estimar el n de manning.

**Cuadro 2: Correcciones para el cálculo del coeficiente de rugosidad n**

Corrección	Descripción	Valor
n <sub>0</sub>	Valor básico tomado en el Cuadro 2	
n <sub>1</sub>	Corrección por mantenimiento	
	Buen mantenimiento	0.000-0.005
	Regular mantenimiento	0.005-0.015
n <sub>2</sub>	Mal mantenimiento	0.015-0.050
	Corrección por cambio de condiciones de flujo	
	Interferencias menores	
n <sub>3</sub>	Interferencias apreciables	0.00-0.005
	Formas de fondo y transporte de sedimentos	0.005-0.015
	Rizos, pequeñas ondulaciones	0.000-0.005
	Dunas y ondulaciones con alternativas menores del 20 por ciento del tirante	0.006-0.015

## 2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

### 2.2.1 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  $t.año^{-1}$ ,  $t.d^{-1}$ ,  $kg.s^{-1}$ ,  $kg.m^{-1}...etc.$

Cuantificar el gasto sólido total mediante monitoreos resulta una tarea casi imposible debido al mecanismo de sus componentes. Sin embargo, en la actualidad existen fórmulas empíricas que estiman el gasto sólido total sin separar sus componentes (suspensión y fondo).

A continuación, en el Cuadro 3 se detalla la descripción de las variables de fórmulas que se describen en los siguientes subcapítulos 2.3.1; 2.3.2 y 2.3.3.

**Cuadro 3: Resumen de variables de las fórmulas de gasto sólido**

Símbolo	Descripción	unidad
Qst	Gasto sólido total	ton/año
Qsf	Gasto sólido de fondo	ton/año
Qss	Gasto sólido en suspensión	ton/año
$g_{BT}$	Gasto sólido total unitario	Kgf/m
D	Diámetro de la partícula ( $D_m$ , $D_{50}...$ etc.)	m
g	Aceleración debido a la gravedad	$m^2/s$
$\gamma$	Peso específico del agua	$Kgf/m^3$
$\gamma_s$	Peso específico del suelo	$Kgf/m^3$
S	Pendiente media de la cuenca	-
R	Radio Hidráulico	m
$W_m$	Velocidad de caída de las partículas correspondiente a $D_m$	m/s
q	Gasto unitario líquido	$m^3/s.m$
F1	Coefficiente de Rubey, se utiliza para saber la velocidad de caída.	-
$\tau_*$	Número adimensional de shields	-
$\tau_{*c}$	Numero adimensional de Shields para condición crítica. Se obtiene de la relación propuesta por Maza.	-
$\tau_0$	Esfuerzo cortante que el flujo ejerce en el fondo	$Kgf/m^2$
$\tau_c$	Esfuerzo cortante critico en el fondo, necesario para iniciar el movimiento de las partículas	$Kgf/m^2$

D*	Numero adimensional de la partícula	-
R	Radio hidráulico	m
q	profundidad del flujo	-
n	Coefficiente de manning	-
n <sub>s</sub>	Coefficiente de manning debido a la partícula	-
U*	Velocidad de corte	m <sup>2</sup> /s
A <sub>y</sub>	Relación esfuerzo cortante con pesos específicos	-
S <sub>y</sub>	Relación esfuerzo cortante y esfuerzo cortante crítico	-
$\frac{1}{\psi}$	Intensidad de corte	-
∅	Intensidad de transporte	-
v	Viscosidad cinemática del agua	m/s
T	Adimensional	-

A continuación, se describen algunas fórmulas empíricas para estimar el gasto sólido total y en el Cuadro se muestra la leyenda de los símbolos utilizados en las fórmulas.

- **Graf y Acaraglu (1968)**

Graf y Acaraglu plantean una ecuación para estimar el gasto sólido total unitario a partir del D<sub>m</sub> de la partícula. La Ec. 10 se aplica si  $0.06 \leq \tau_* \leq 6.5$  (Vanoni, 2006).

$$g_{BT} = 20\gamma_s \left( g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_m^3 \right)^{0.5} \tau_*^{3.3} \quad 2.10$$

Dónde

g <sub>BT</sub>	Gasto sólido total unitario	Kgf/m
D	Diámetro de la partícula (D <sub>m</sub> )	m
g	Aceleración debido a la gravedad	m <sup>2</sup> /s
γ	Peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
γ <sub>s</sub>	Peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
τ <sub>*</sub>	Número adimensional de shields	-

- **Karim y Kennedy (1981-1990)**

La fórmula de Karim y Kennedy para gasto sólido total se basa en el ajuste de datos de campo y laboratorio de relaciones matemáticas, sin considerar en forma explícita la mecánica del movimiento del sedimento o de la resistencia al flujo. La Ec. 2.11 se puede utilizar para flujos por encima de movimiento de sedimentos incipientes. Si es necesario tener en cuenta los cambios de configuración del lecho.

$$g_{BT} = 0.00151\gamma_s \sqrt{g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_{50}^3} \left( \frac{U}{\sqrt{g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_{50}^3}} \right)^{3.369} (\tau_*^{0.5} - \tau_{*c}^{0.5})^{0.84} \quad 2.11$$

Dónde:

$g_{BT}$	Gasto sólido total unitario	Kgf/m
$D$	Diámetro de la partícula (Dm)	m
$g$	Aceleración debido a la gravedad	m <sup>2</sup> /s
$\gamma$	Peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	Peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
$\tau_*$	Número adimensional de shields	-
$\tau_{*c}$	Numero adimensional de Shields para condición crítica. Se obtiene de la relación propuesta por Maza.	-

- **Shen y Hung (1971)**

Shen y Hung asumieron que el transporte de sedimentos es tan complejo que ningún Número de Reynolds, número de Froude, o una combinación de éstos se pueden encontrar para describir funciones de transporte de sedimentos basados en datos de 379 grandes ríos de Bangladesh.

En lugar de tratar de encontrar una variable dominante de la tasa de transporte de sedimentos recomendaron la Ec.2.12 basada en 578 conjuntos de datos de laboratorio, con un rango de tamaño de arena.

$$g_{BT} = q10(M)^{M-3} \quad 2.12$$

Dónde:

$$M = a_0 + a_{1x} + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad 2.13$$

El valor de x se estima a partir de:

$$X = U^{a4} S^{a5} W_m^{a6} \quad 2.14$$

Luego:

$$W_m = F1 \left( g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D \right)^{0.5} \quad 2.15$$

F1 se calcula de acuerdo a la Ec. 2.16.

$$F1 = \sqrt{\left( \frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd_m^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd_m^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \quad 2.16$$

Dónde:

D	Diámetro de la partícula (Dm)	m
g	Aceleración debido a la gravedad	m <sup>2</sup> /s
γ	Peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
γ <sub>s</sub>	Peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
S	Pendiente media de la cuenca	-
W <sub>m</sub>	Velocidad de caída de las partículas correspondiente a Dm	m/s
q	Gasto unitario líquido	m <sup>3</sup> /s.m
F1	Coefficiente de Rubey, se utiliza para saber la velocidad de caída	-
D <sub>*</sub>	Numero adimensional de la partícula	-
U <sub>*</sub>	Velocidad de corte	m <sup>2</sup> /s

## 2.2.2 Gasto sólido en suspensión

Los sedimentos en suspensión son aquellas partículas finas (arcilla, limo y arena) que llegan a la corriente por procesos de erosión pluvial de la cuenca, lavado del material o por el transportado de la misma vertiente (Maza, 1996). Los cambios en la línea de costa y la topografía submarina, el flujo de nutrientes y compuestos químicos hacia el océano, la penetración de la luz a través del agua, son algunos de los procesos relacionados con la concentración de sedimentos en suspensión (Restrepo y Pierini, 2012). La estimación del transporte de sedimentos en suspensión mediante monitoreo resulta una tarea más sencilla a diferencia del transporte de sedimentos de fondo. Por lo cual, en la actualidad existen

varias técnicas para monitorear la concentración de los sedimentos en suspensión, las cuales se detallan a continuación.

Los equipos para obtener muestras representativas de sedimentos que se mueven en suspensión en el interior de la corriente y que ayudan a calcular el transporte en suspensión, pueden agruparse dentro de tres grupos (PHI-LAC, 2010):

- **Instantáneos:** captan súbitamente la muestra agua-sedimento. Consiste en descender el recipiente abierto (Fig.6) en posición vertical u horizontal al sitio donde se va muestrear e inmediatamente se acciona un mecanismo que cierra el recipiente y por tanto se captura un volumen (Jakuschoff, 1932).

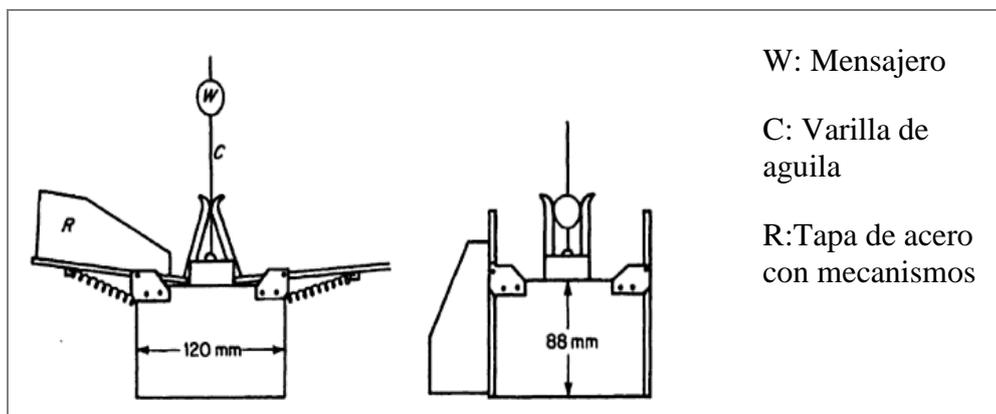


Figura 6: Muestreador horizontal instantáneo de sedimentos en suspensión.

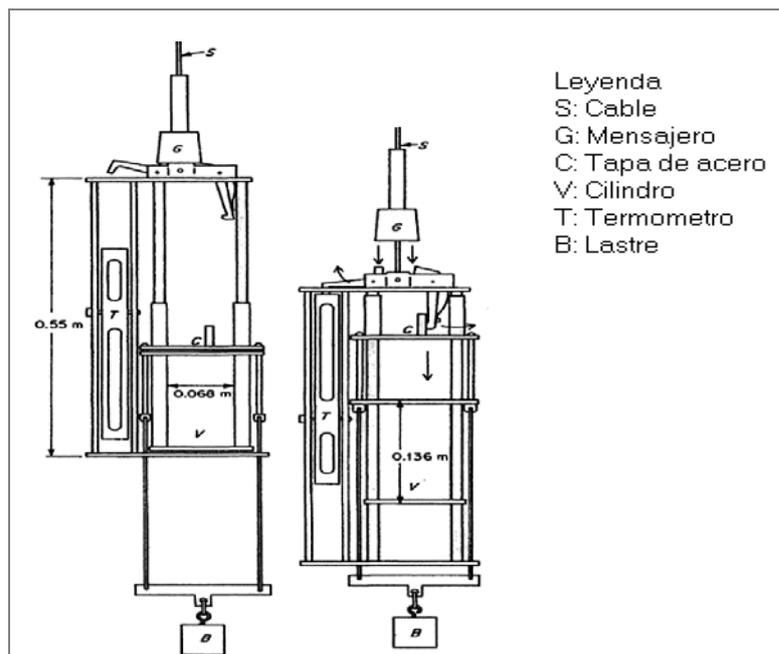
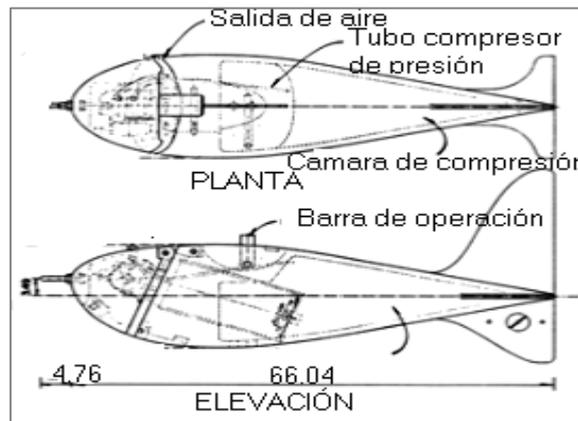


Figura 7: Muestreador vertical instantáneo de sedimentos en suspensión.

- **Integradores:** Existen dos tipos de muestreadores integradores, el primero capta la muestra en un punto permaneciendo cierto tiempo; esta forma se le conoce como integración puntual (Fig.8). El segundo se obtiene una muestra mientras el dispositivo recorre verticalmente una cierta distancia; a esta forma se le conoce como integrador de profundidad (Jakuschoff, 1932).



**Figura 8: Muestreador integral de punto de sedimento en suspensión.**

- **De registro continuo:** La presencia de las partículas sólidas en suspensión da lugar a que el agua sea menos translúcida; este efecto ha dado origen al diseño de muestreadores automáticos y de registro continuo como dispositivos electrónicos u ultrasónicos. Uno de los equipos más conocidos es el Turbidímetro que mide la turbiedad del flujo.



**Figura 9: Sonda de Turbiedad YSI-6V.**

Adicional a estos métodos tradicionales, en la actualidad existe una forma más sencilla de tomar una muestra de sedimento en suspensión, la cual consiste en sumergir un recipiente en la corriente, en un punto que el flujo este bien mezclado (FAO, 2014). El sedimento contenido en un volumen medido de agua se filtra, se seca y se pesa. Esto da una medida de la concentración del sedimento y cuando se combina con el caudal se obtiene el gasto sólido en suspensión. Dicha metodología de muestreo viene siendo aplicada por el Observatorio HYBAM del IRD (Instituto de Investigación para el Desarrollo Francés) y el método de cálculo a partir de la Ecuación 15 de Phillips et al., (1999).

### 2.2.3 Gasto sólido de fondo

El arrastre de fondo es aquella fracción del sedimento total que una corriente transporta, sobre o muy cerca del fondo del cauce, la cual se mueve por saltos, arrastre o rodando (Espinoza et al., 2004). Aunque existe un conocimiento incompleto del tipo de fuerzas y sus magnitudes que actúan sobre una partícula que reposa en el fondo de un cauce, o que se encuentra muy cerca de éste, en general se acepta que dicha partícula se encuentre bajo la acción de dos fuerzas opuestas. Una que tiende a mantener la partícula en reposo y la otra que trata de rodar o levantar esa misma partícula (Simons et al.1992). A continuación se describen estas fuerzas.

- La fuerza de gravedad ( $F_g$ ): que actúa sobre una partícula se expresa como el producto entre el volumen y el peso sumergido de la partícula. Esta fuerza actúa de manera vertical descendente (Ec. 2.18).

$$F_g = K_1 D^3 (\rho_s - \rho) g \quad 2.1$$

- El esfuerzo hidráulico cortante ( $F_d$ ): también conocido como esfuerzo hidráulico (Ec. 2.19), es la resultante de la fricción que ocurre sobre la superficie de la partícula y el esfuerzo causado por la diferencia de presiones aguas arriba y aguas debajo de la partícula. Esta fuerza actúa en sentido paralelo a la dirección de la corriente.

$$F_d = C_d \left[ \rho \frac{Vr^2}{2} \right] A \quad 2.19$$

- La fuerza ascendente ( $F_L$ ): surge de dos maneras. Una debida a diferencias en las velocidades del flujo que crea una gradiente vertical de presiones y la segunda, por efecto de la turbulencia. Esta fuerza actúa en un sentido vertical ascendente (Ec. 2.20)

$$F_L = C_L \left[ \rho \frac{v_r^2}{2} \right] A \quad 2.20$$

Dónde:

$K_1$	Factor de profundidad (si la partícula es esférica, $K_1 = \pi/6$ ).	Kgf/m
$D$	Diámetro de la partícula ( $D_m, D_{50}...$ etc.)	m
$\rho$	Densidad del fluido	
$C_d$	Coefficiente de esfuerzo	
$v_r$	Velocidad media de la partícula con relación al fluido	
$A$	Area transversal de una partícula	$m^2$
$C_L$	Coefficiente de ascenso	
$W_m$	Velocidad de caída de las partículas correspondiente a $D_m$ .	
$F$	Representa la fuerza en la magnitud de la variables.	

El desplazamiento de una partícula se inicia cuando el esfuerzo cortante excede un valor crítico. Esto es, cuando ocurre una tasa baja de transporte, la partícula se desplazará rodando sobre la superficie de la cama del cauce. Si el esfuerzo hidráulico aumenta, la partícula se desplazará saltando, debido a la rugosidad del fondo y a la fuerza de ascenso. De manera recurrente, la partícula experimentará nuevos saltos por efecto del impacto sobre el fondo del cauce y de la fuerza de ascenso (Garde, 1995).

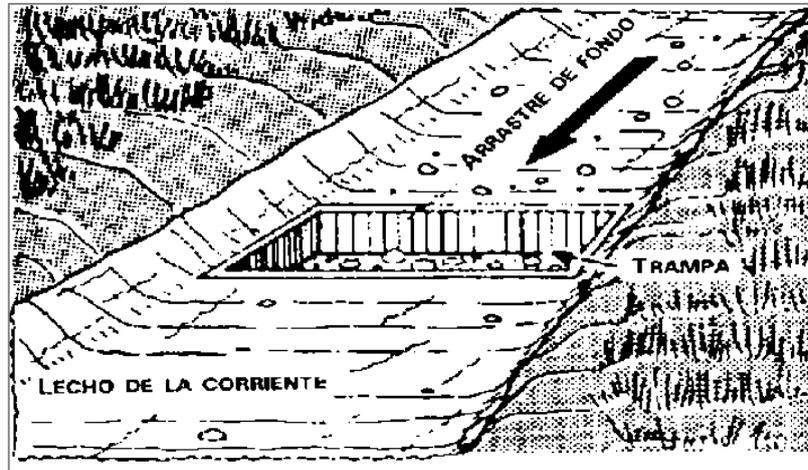
#### a. Técnicas de medición de sedimentos de fondo

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).

##### - Mediciones directas:

Es la forma más sencilla de calcular el arrastre de fondo, consiste en cavar un agujero en el lecho de la corriente 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 trampa de

sedimentos, pero es posible que no se sepa si se ha recogido todo el arrastre de fondo. En los lugares con grandes carga de arrastre, este procedimiento puede necesitar mucho tiempo. En la Fig. 10 se muestra la trampa de arrastre de fondo (PHILAC, 2010).

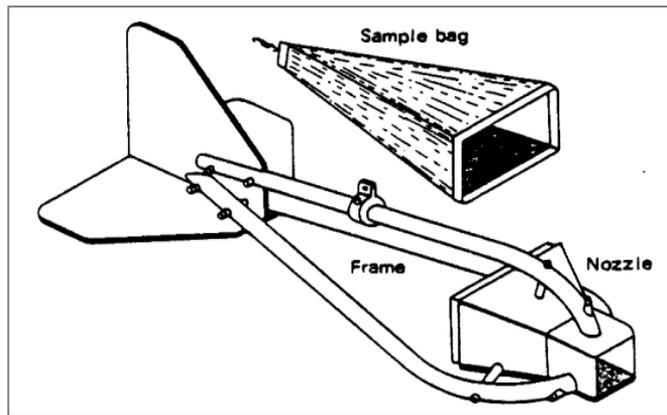


**Figura 10: Trampa de arrastre de fondo (muesca).**

- **Muestreadores tipo trampa:**

Muestreador tipo trampa Helley Smith (Fig.11), 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 presente estudio se ha seleccionado el muestreador (404-018 Helley Smith 8035 3"x3").

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 (Emmet, 1980).



**Figura 11: Muestreador de fondo Helley- Smith.**

Muestreador US BLM- modelo 8010 (Fig.12), este muestreador es apropiado para corrientes poco profundas y de velocidades bajas, ya que permite al operador meterse al río para su manejo directo mediante una varilla de suspensión, procedimiento conocido como Vadeo. Este equipo tiene un peso de 1.8 Kg y una tobera con entrada de 7.6x7.6 cm (Rijn,1986).



**Figura 12: Muestreador de fondo US BLM-modelo 8010.**

#### - Mediciones indirectas

Existen varios métodos de medición indirecta del transporte de sedimentos de fondo. Los más conocidos son los siguientes:

Estudio de migración de formas de fondo : Este método consiste en la medición periódica del perfil longitudinal de las formas de fondo bajo condiciones similares del flujo, de manera que al comparar diferentes perfiles secuenciales se puede determinar la velocidad de migración de las formas. Para tomar lecturas del perfil del fondo a lo

largo del curso predefinido tridimensional, si las condiciones de campo son complicadas se puede utilizar un equipo de eco sondeo.

Estudios con trazadores: Los estudios con trazadores son apropiados para ríos con fondos de material grueso. Se llevan a cabo mediante la aplicación de pintura, colorante, o material radioactivo en el material de fondo. De tal forma que se le pueda dar seguimiento a las distancias de viaje durante las crecientes, y de ahí determinar el transporte en general sin embargo, los trazadores radioactivos no son aprobados por razones ambientales.

Instrumentos acústicos: Los instrumentos acústicos consisten básicamente en una placa y un micrófono que son puestos en el fondo de la corriente para que las partículas choquen con la placa y se pueda registrar el sonido producido. Con ayuda de osciloscopios se analiza las señales producidas para determinar el transporte de sedimentos.

#### **b. Ecuaciones del transporte de sedimento de fondo**

Espinosa (2004), dice que existe un gran número de ecuaciones empíricas para predecir la descarga de sedimento de fondo de una corriente natural. Así mismo García y Sala (1998) dicen que desde que Du Boys (1879) presentara la primera ecuación para el cálculo del transporte de fondo hasta nuestros días han aparecido un amplio número de fórmulas, basadas en cuatro enfoques, según hayan utilizado las siguientes variables:

- La tensión de arrastre sobre el lecho del río (p.e.: du Boys, 1879)
- El caudal (p.e: Schoklitsch, 1934)
- Una función estocástica para el movimiento (p.e.: Einstein, 1950)
- La potencia hidráulica (p.e.: Bagnold, 1980)

La mayoría de las fórmulas se han desarrollado a partir de experimentos realizados en canales experimentales. A continuación se hace la descripción de algunas fórmulas empíricas y en el Cuadro 3 se describen las variables utilizadas en las fórmulas.

#### **- Formula de Do Boys -Straub (1879,1935)**

Según reporta Du Boys, en su libro “Principes d’Hydraulique”, Du Bua (1785) fue el primero en medir la velocidad critica de iniciación de movimiento de los sedimentos de fondo.

En el año 1879, Du Boys introduce el concepto de esfuerzo cortante  $\tau_0 = \gamma R S$ , y establece un modelo conceptual severamente simplificado para deducir una fórmula que estima la carga de sedimentos de fondo.

Conceptualiza que el lecho por acción del  $\tau_0$  (Ec. 2.21) se mueve en una serie de capas superpuestas de espesor  $d' \cong d_{50}$ .

Existen  $n$  capas cuya velocidad de avance varía linealmente con incrementos constantes  $V_s$ , desde una velocidad nula en la capa más profunda (capa 1), hasta una velocidad máxima  $(n-1) V_s$  en la capa superior ( $n$ ).

Se supone que  $\tau_0$  está balanceado por la fricción entre las partículas de sedimentos que se desplazan en el medio del lecho con un coeficiente de fricción  $C_f$ , es decir:

$$\tau_0 = \gamma R S = C_f (\gamma_s - \gamma) n d' \quad 2.21$$

$(\gamma_s - \gamma) n d'$ : Peso aparente de sedimento/área

Condición de movimiento incipiente ( $\tau_0 = \tau_c$ ): Cuando la capa superior apenas resiste el movimiento, no hay movimiento de capas o cuando  $n=1$ .

$$\tau_c = C_f (\gamma_s - \gamma) d' \quad 2.22$$

Obteniendo el número de capas (Ec. 2.23):

$$n = \tau_0 / \tau_c \quad 2.23$$

El transporte en volumen de sedimentos en cada capa:

$$g_B = V_s d' [1 + 2 + 3 \dots (n - 2) + (n - 1)] \quad 2.24$$

Sustituyendo la Ec.2.23 en la Ec.2.24, resulta que el transporte en volumen de sedimento de fondo por unidad de ancho es (Ec.2.25).

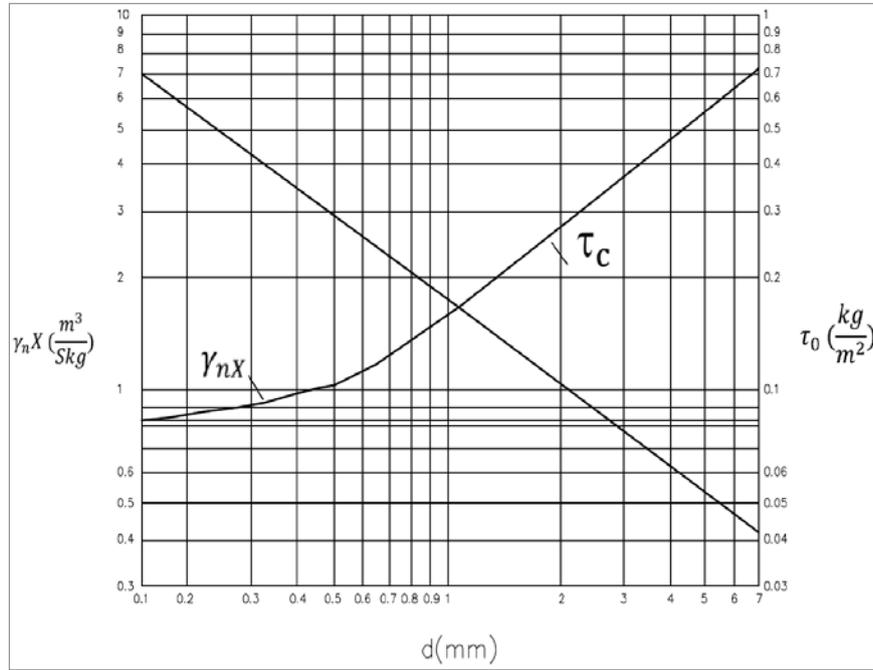
$$g_B = 0.5 V_s d' \left( \frac{\tau_0}{\tau_c} - 1 \right) \frac{\tau_0}{\tau_c} = x (\tau_0 - \tau_c) \tau_0 \quad 2.25$$

Donde  $x$  es coeficiente característico del sedimento.

La carga unitaria de sedimento de fondo es:

$$g_B = \gamma x (\tau_0 - \tau_c) \tau_0 \quad 2.26$$

Para determinar los valores de  $x$  y  $\tau_c$  se puede utilizar la gráfica de la Fig.13.



**Figura 13: Parámetros de la Ecuación de Du Boys.**

También se puede utilizar la (Ec.2.27) de Du Boys y Stranb simplificada para el  $D_{50}$  de la partícula.

$$g_B = \frac{0.01003(\tau_0 - \tau_c)\tau_0}{D^{3/4}} \quad 2.27$$

Donde el esfuerzo cortante se define por la Ec.2.28

$$\tau_0 = \gamma RS \quad 2.28$$

El número adimensional de la partícula se determina de acuerdo a las dos relaciones planteadas en la Ec.2.29.

$$D^* = D_{50} \left[ \frac{g(\gamma_s - \gamma)}{\nu^2} \right]^{1/3}, \text{ Si } 2.15 < D^* < 333; \tau_{*c} = 0.06 \quad 2.29$$

Luego calculamos el numero adimensional de shields para condición crítica, mediante la Ec.2.30.

$$\text{Si } D^* > 333; \tau_{*c} = \frac{0.2196}{D^*} + 0.077 \exp \left[ - \left( \frac{30.35}{D^*} \right)^{0.536} \right] \quad 2.30$$

El esfuerzo cortante crítico se determinada según la Ec.2.31 o Ec.2.32.

$$\text{Si } \tau_{*c} = 0.06 ; \tau_c = 0.06 (\gamma_s - \gamma) D \quad 2.31$$

$$\text{Si } D^* > 333 ; \tau_c = (\gamma_s - \gamma) D \tau_{*c} \quad 2.32$$

- **Fórmula de Yalin (1936)**

Yalin desarrolló una ecuación (Ec.2.33) a partir del análisis adimensional, asumiendo que el incremento en la tasa de transporte es debido al movimiento promedio de las partículas que están en movimiento. Las constantes empíricas del modelo se desarrollaron en canales de aforo, conteniendo diversos tamaños de partículas de sedimentos (0.78 a 28.6 mm). El modelo de Yalin se restringe a tamaños uniformes de partículas al igual que Bagnold (1980). Aun cuando Yalin no menciona el diámetro de partícula que debe ser usado en su modelo, en diversas investigaciones se ha utilizado el diámetro medio de partícula (Alonso et al., 1981).

$$g_B = (\gamma_s - \gamma) S_y D_m U * 0.635 \left[ 1 - \frac{1}{A_y S_y} \ln(1 + A_y S_y) \right] \quad 2.33$$

Dónde:

$g_B$	gasto sólido total unitario de fondo	Kgf/m
$D$	diámetro de la partícula (dm)	m
$\gamma$	peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
$U_*$	velocidad de corte	m <sup>2</sup> /s
$A_y$	relación esfuerzo cortante con pesos específicos	-
$S_y$	relación esfuerzo cortante y esfuerzo cortante crítico	-

Determinamos  $A_y$  mediante la Ec.2.34

$$A_y = 2.5 \left[ \frac{\gamma}{\gamma_s} \right]^{2/5} \tau_{*c} \quad 2.34$$

Luego, determinamos  $S_y$  según la Ec.2.35

$$S_y = \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \quad 2.35$$

Para determinar el número adimensional de Shields utilizamos la Ec.2.36

$$\tau_* = \frac{\gamma R S}{(\gamma_s - \gamma) D_m} \quad 2.36$$

#### - **Fórmula de Meyer – Peter y Muller (1948)**

Meyer-Peter y Muller desarrollaron una ecuación empírica a partir de estudios efectuados en aforadores con gastos que fluctuaron de 0.002 a 2m<sup>3</sup>/s, pendiente de 0.004 a 0.2 y con tirante de 0.01 a 1.2 m. Los experimentos se condujeron con materiales naturales y sintéticos cuyo diámetro oscilo entre 0.4 a 30 mm. Es conveniente utilizarla para cauce con arena con diámetro mayor de 0.0002 m, hasta grava gruesa con diámetro < de 0.03 m. Esta fórmula es recomendada para ríos de montaña, pendiente aproximada de 1.2 por ciento y rugosidades medias. La Ec.2.32 representa la última ecuación definida por Meyer –Peter y Muller tras años de experimentos. En dicha Ecuación trataron de encontrar una relación entre la carga de sedimentos de fondo y la diferencia del esfuerzo de corte en el lecho y el esfuerzo de corte crítico, permitiendo emplear el diámetro medio de la muestra como diámetro representativo.

$$g_B = 8\gamma_s \left( g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) D^3 \right)^{0.5} \left[ \frac{n_s^{1.5}}{n} \tau_* - 0.047 \right]^{1.5} \quad 2.37$$

El  $n_s$ , lo obtenemos apartir del  $D_{90}$  de la partícula (Ec.2.38).

$$n_s = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad 2.38$$

Donde:

$g_B$	gasto sólido de fondo unitario	Kgf/m
$D$	diámetro de la partícula (dm, $d_{50}$ ... etc.)	m
$g$	aceleración debido a la gravedad	m <sup>2</sup> /s
$\gamma$	peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
$\tau_*$	número adimensional de shields	-
$q$	profundidad del flujo	-

n	coeficiente de manning	-
n <sub>s</sub>	coeficiente de manning debido a la partícula	-

- **Fórmula de Schoklitsch (1962)**

Schoklitsch propuso una ecuación con base en estudios realizados en canales de aforo y datos de campo. Originalmente, esta ecuación se aplicó en corrientes naturales de lecho de grava. De acuerdo a Bathurst et al.1987 la ecuación de Schoklitch (Ec.2.39) predice la descarga de sedimentos de fondo en corrientes naturales con suministro ilimitado de sedimentos. La ecuación de Scholitsch no involucra de manera explícita el esfuerzo hidráulico y el tirante de la corriente, el no incluir cualquiera de estas variables podría presentar desventajas para la aplicación de la ecuación en cauces someros.

$$g_B = 2500S^{\frac{1}{3}} \left( qS^{\frac{7}{6}} - 19.05\tau_{*c}^{\frac{5}{3}} \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right)^{\frac{5}{3}} D_{40}^{\frac{3}{2}} \right) \quad 2.39$$

Donde:

g <sub>B</sub>	gasto sólido total unitario	Kgf/m
D	diámetro de la partícula ( d <sub>40</sub> )	m
γ	peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
γ <sub>s</sub>	peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
S	pendiente media de la cuenca	-
q	gasto unitario líquido	m <sup>3</sup> /s.m
τ <sub>*c</sub>	numero adimensional de shields para condición crítica. se obtiene de la relación propuesta por maza.	-
q	profundidad del flujo	-

- **Fórmula de Einstein-Brown (1980)**

Bown revisa el modelo de Einstein (1950), contruyendo una nueva curva con los datos de Einstein basado en la función f(x)=x<sup>-3</sup>. Brow escribió la intensidad de transporte Ø en función de la intensidad de corte (Ec.2.40).

$$\phi = 40 \left( \frac{1}{\psi} \right)^3 \quad 2.40$$

Donde la intensidad de corte se expresa de acuerdo a la Ec.2.41

$$\left( \frac{1}{\psi} \right) = \frac{\gamma RS}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \quad 2.41$$

Siendo:

$$\phi = \frac{g_B}{F \sqrt{g \left( \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \right)}} \quad 2.42$$

En el cual se define F1 por la relación :

$$F1 = \sqrt{\left( \frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd_m^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right)} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd_m^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \quad 2.43$$

Es necesario comentar que esta Ec.2.44 es más realista para valores altos de  $\psi$ , que la formula de Du Boys y las otras fórmulas basadas en el exceso del esfuerzo de corte.

$$g_B = 2.151 F1 \gamma_s \sqrt{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} D_{50}^3 e^{-0.391 * \frac{1}{\tau^*}} \quad 2.44$$

Donde:

D	diámetro de la partícula $D_{50}$ )	m
g	aceleración debido a la gravedad	m <sup>2</sup> /s
$\gamma$	Peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	Peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
S	Pendiente media de la cuenca	-
R	Radio Hidráulico	m
F1	Coficiente de Rubey, se utiliza para saber la velocidad de caída.	-

$\tau_*$	Número adimensional de shields	-
$\frac{1}{\psi}$	Intensidad de corte	-
$\emptyset$	Intensidad de transporte	-

- **Fórmula de Van Rijn (1984)**

La ecuación de Van Rijn Ec.2.45 o Ec.2.46 fue derivada a través de análisis teóricos y verificados con datos de laboratorio y de campo utilizando sedimentos uniformes con diámetros de partículas comprendidos entre 0.2mm y 2mm.

$g_B$  cuando  $T < 3$

$$g_B = 0.053 \gamma_s \left[ g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_{50}^3 \right]^{0.4} T^{2.1} v^{0.2} \quad 2.45$$

$g_B$  cuando  $T \geq 3$

$$g_B = 0.1 \gamma_s \left[ g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_{50}^3 \right]^{0.5} T^{1.5} D_*^{-0.3} \quad 2.46$$

El parámetro adimensional T se determina relacionando el esfuerzo cortante (Ec.2.28) y el esfuerzo cortante crítico (Ec.2.31 o Ec.2.32), de acuerdo a la Ec.2.47

$$T = \frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_c} \quad 2.47$$

Dónde:

$g_B$	gasto sólido total unitario	Kgf/m
D	diámetro de la partícula ( $d_{50}$ )	m
G	aceleración debido a la gravedad	$m^2/s$
$\gamma$	peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
S	pendiente media de la cuenca	-
$\tau_0$	esfuerzo cortante que el flujo ejerce en el fondo	Kgf/m <sup>2</sup>
$\tau_c$	esfuerzo cortante crítico en el fondo, necesario para iniciar el movimiento de las partículas	Kgf/m <sup>2</sup>

$D_*$	numero adimensional de la partícula	-
$\nu$	viscosidad cinemática del agua	m/s
$T$	adimensional	-

- **Pernecker y Vollmer (1984)**

La Ec.2.48 sirve para evaluar el transporte en la capa de fondo siempre que  $\tau_* \leq 0.5$ . Si  $\tau_* \leq 0.04$ , no existe transporte de sedimentos. Utiliza  $D = D_m$ .

$$g_B = 25\gamma_s \left( g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_m^3 \right)^{0.5} \tau_*^{1.5} (\tau_* - 0.04) \quad 2.48$$

Dónde:

$g_B$	Gasto sólido de fondo unitario	Kgf/m
$D$	Diámetro de la partícula ( $D_m$ )	m
$g$	Aceleración debido a la gravedad	m <sup>2</sup> /s
$\gamma$	Peso específico del agua	Kgf/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$	Peso específico del suelo	Kgf/m <sup>3</sup>
$\tau_*$	Número adimensional de shields	-

### 2.2.4 Gasto sólido en función del gasto líquido

Según (Lewis y Saunders, 1989) la relación entre el transporte y la descarga puede ser representada en general como una función de potencia.

$$Q_{\text{sólido}} : \alpha * Q_{\text{líquido}}^{\beta}$$

$Q_{\text{sólido}}$  : transporte de sedimento

$Q_{\text{líquido}}$  : descarga de agua

$\alpha$  : 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 derivaciones.

Exponente  $> 1$ , indica que las concentraciones crecen cuando las descargas se incrementan (efecto de 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 descarga aumenta (efecto conservación).

### **2.3 PROGRAMA HYDRACCESS**

El programa HYDRACCESS fue desarrollado por el Ing. Philippe Vauchel del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) a fin de ayudar al hidrólogo a hacer el tratamiento de los registros sedimentológicos. El programa se basa sobre los paquetes Access y Excel. Éste programa, además, de manejar un banco de datos, ofrece muchos tratamientos básicos como el Vector regional, Cormul que permiten hacer los análisis, la crítica y el tratamiento de la información. Para la hidrometría, el programa permite:

- 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).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

##### 3.1.1 Ubicación

El área de estudio se localiza al norte del Perú y abarca dos cuencas binacionales colindantes entre sí, Puyango-Tumbes y Zarumilla. En la Fig.14 se muestra la ubicación del área de estudio.



Figura 14: Ubicación del área de estudio.

La cuenca del río Puyango-Tumbes se encuentra ubicada en el departamento de Tumbes en 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 ecuatoriana y un 35 por ciento es peruana. En su parte alta el río Puyango-Tumbes 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 (INGEMMET, 2006).

La cuenca del río Zarumilla se encuentra en el área de frontera sur-occidental de la provincia del Oro (Ecuador) y la parte norte del departamento de Tumbes (Perú). Su extensión es 880 Km<sup>2</sup> de los cuales el 40 por ciento del área corresponden al Perú y el 60 por ciento al Ecuador (Coello, 2006). El río Zarumilla constituye el límite entre Perú y Ecuador hasta la localidad de la Palma donde empieza el Canal Internacional, que es limítrofe hasta la desembocadura con el océano Pacífico (ANA, 2012).

### **3.1.2 Recursos hidrológicos**

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

El río Zarumilla se caracteriza por tener un ciclo hidrológico estacional. Durante los meses de mayo a noviembre el río no presenta caudales, debido a las pocas precipitaciones (ANA, 2010). La precipitación media anual areal desde el litoral hasta la divisoria de aguas de la cuenca Zarumilla y Tumbes es de 711.1 mm, las mínimas fluctúan de 0 a 100 mm y con máximas que llegan a 2400 mm (SENAMHI, 2007)

A nivel anual la estación La Palma (río Zarumilla) registra un caudal medio anual de 4.80 m<sup>3</sup>/s y por otro lado la estación El Tigre (río Tumbes) un caudal medio anual de 111.47 m<sup>3</sup>/s representativo del periodo 1969-1999 (SENAMHI, 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 el período de avenidas entre enero y abril es de 245.1 m<sup>3</sup>/s (INGEMMET, 2006).

La temperatura media anual en las cuencas Tumbes y Zarumilla es de 26°C, la mínima alrededor de 18°C y la temperatura máxima alcanza valores de 26°C (SENAMHI, 2007). 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, Rica Playa) es de 24.16°C (INGEMMET, 2006).

La húmeda relativa media anual en las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla varía 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 hrs/año; la evapotranspiración de referencia varía 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 varía 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. (SENAMHI, 2007).

Por otro lado las características físicas de una cuenca forman un conjunto de parámetros que influyen en el comportamiento hidrológico de la cuenca. Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de utilidad práctica en la ingeniería de la hidrología, pues con base a ellos se puede lograr una transferencia de información de un sitio a otro, donde exista poca o ninguna información de registros hidrológicos. A continuación, se describen los parámetros morfológicos de acuerdo Chow (2000) y en el Cuadro 4 se resume los valores de dichos parámetros para la cuenca Puyango-Tumbes y Zarumilla.

- 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 la relación entre el área de la cuenca colectora (A) y su longitud de cauce principal (L).
- e. **Coefficiente 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:** el 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 (2000), 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.

En el Cuadro 4 (PEBPT, 2002) se resume los valores de dichos parámetros para la cuenca Puyango-Tumbes y Zarumilla.

**Cuadro 4: Resumen de parámetros morfológicos de las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla**

Morfometría	Unidad	Puyango - Tumbes		Zarumilla	
Área	km <sup>2</sup>	5 530		880	
Perímetro	km	620		173.6	
Longitud Cauce Principal	km	247.5		96.8	
Ancho Promedio	km	22.5		8.9	
Coefficiente de Compacidad	-	2.3		1.7	
Factor de Forma	-	0.1		0.1	
Elevación Media	msnm	924.7		200	
Pendiente del Cauce Principal	por ciento	Parte Baja	Parte Media-Alta	Parte Baja	Parte Media-Alta
		0.2	7.6	0.4	21.2
Orden de las Corrientes	-	4		3	
Densidad de Drenaje	-	0.29		0.26	

### 3.1.3 Recursos hidrogeológicos

En la región de Tumbes se han identificado tres formaciones hidrogeológicas principales:

- Depósitos de lecho de río (Q1): acuífero libre de origen cuaternario situado en los alrededores del río Zarumilla
- Depósitos marinos (Q2): acuífero situado por debajo de Q1 se originó en el cuaternario debido a la regresión de agua de mar, las profundidades de esta formación no es más de 40 m en el centro de la cuenca inferior y cerca de 150 m en las partes más cercanas al océano; el tipo de agua es dulce a salobre y se convierte en agua salina en las proximidades de la línea costera (Coello, 2006).
- Acuífero confinado (Ng): acuífero ubicado por debajo de la Q2 se originó durante el tiempo geológico denominado Neógeno, debido a la evolución de este acuífero es considerado acuífero confinado con una Trasmisividad que varía entre 100 hasta 500 m<sup>2</sup>/día, una producción hasta 50 l.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>. Este acuífero tiene una calidad de agua muy buena y se puede considerar como fuente segura de agua para demandas futuras.

### **3.1.4 Geología**

El área de estudio que abarca a las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla en la zona peruana tiene rangos geocronológicos comprendidos desde el Paleozoico antiguo y tal vez desde el Precámbrico, Mesozoico, y Cenozoico (INGEMMET,2006).

#### **a. Basamento Precámbrico-Paleozoico inferior**

La secuencia estratigráfica se encuentra en las montañas conocidas como “Los Amotapes”, comprendiendo una secuencia antigua no diferenciada, luego constituyendo un Paleozoico inferior tardío.

La unidad litoestratigráficas encontrada es el complejo metamórfico, el cual constituye un complejo de rocas metamórficas dentro de las cuales se tiene gneises graníticos de grano medio, con bandas de cuarzo deformadas y meteorizadas. Sus afloramientos se pueden observar en el río Zarumilla entre Matapalo y Palmar; su gneisificación se debe probablemente a su cercanía al granito de Higuerón, destacando los efectos de inyección lit-par-lit.

#### **b. Mesozoico**

Aquí se encuentran las Formaciones de P azul (Ks-p), Tablones (Ks-ta) y Encuentros (Ks-c). La formación Tablones se trata de conglomerados grises con cantos rodados subredondeados a subangulosos constituidos de cuarcitas, filitas, esquistos granitos, arenisca y caliza dentro de una matriz arcóstica. Hacia la parte superior se intercalan

niveles de areniscas que pasan secuencia lutácea de la Formación Pazul. Su contacto inferior con la Fm. Encuentros, está marcado por una discordancia erosional.

### **c. Cenozoica**

El Cenozoico en la región Noroeste presenta en el Terciario una secuencia marina completa, el área de estudio comprende a la Fm. Salinas, el Grupo Talara, la Fm. Mancora, Fm. Heath, Fm Zorritos, Formación Cardalitos, Fm. Tumbes. También se encuentran Depósitos Aluviales y marinos.

- Formación Salinas (Tp-s): se extiende a lo largo de las estribaciones Noroccidentales de los Amotape y se prolonga hasta la región Mancora. En la parte superior se puede observar lutitas pizarrosas y en algunos casos lutitas moteadas y abigarradas.
- Grupo Talara (Ts-t): es la unidad productiva de petróleo en el Noroeste peruano, las rocas reservorio están constituidas por horizontes areniscosos y conglomeradicos; las facies lutáceas constituyen la roca sello.
- Formación Zorritos (Tm-z): es una formación del Mioceno inferior donde existe una secuencia alternada de lutitas verdosas y areniscas finas cuarzosas y en la base por areniscas de color gris claro de grano medio.
- Formación Cardalitos (Tm-c): está constituida por lutitas marrón grisáceo intercaladas con lutitas azufrosas.
- Formación tumbes (Tm-t): conformada por una secuencia de conglomerados bastante compactos, areniscas de grano grueso e intercalaciones de lutitas.
- Terrazas marinas (Q-Tm): formado por sedimentos arcillo-arenoso gris verdoso, bandeados, calcáreos y en muchos casos guijarrosos.
- Depósitos aluviales (Q-al): depósitos ubicados a lo largo del lecho del río.

Depósitos aluvio-coluviales (Q-al/col): se ubican en el fondo de numerosas quebradas del área de estudio.

En la Fig.15 se muestra el mapa geológico con las principales unidades litoestratigráficas en la región de Tumbes.



descarga de metales, metaloides y cianuro a los ríos adyacentes y que generalmente no están presentes en formas solubles de agua sino que están asociados con los sedimentos de partículas en suspensión del lecho del río (Tarras et al., 2000). Además, la actividad minera y la erosión contribuye a la contaminación por metales pesados (mercurio, plomo y manganeso) en toda la cuenca del río Puyango (Betancourt et al., 2005).

## **3.2 MATERIALES**

### **3.2.1 Materiales de laboratorio y campo**

- Balanza analítica
- Muestreador de fondo Helley Smith (Helley Smith 8035 3"x3")
- Malla de polyester de 2 mm de diámetro de abertura
- Cables de acero
- Perfilador de corriente acústico Doppler RiverRay -600 kHz (ADCP en sus siglas en inglés)
- Frascos y bolsas Ziplox para muestras
- Filtros de 45 micras de porosidad-celulosa
- Estufa
- Bomba de vacío
- Agua destilada
- Cámara fotográfica

### **3.2.2 Materiales de gabinete**

- Información de aforos de caudal líquido y sólido, proporcionados por el IGP, IRD, Proyecto especial Binacional Puyango Tumbes, ANA y SENAMHI.
- Mapa de la carta nacional Escala 1:100000 (IGN, 1986)
- Libreta de apuntes
- Equipo Hardware
- Una laptop – ASUS Windows 7 – core i7

## **3.3 METODOLOGÍA**

El presente estudio se dividió en tres etapas para estimar el gasto sólido total: A continuación se muestra en la Fig.16 un esquema de la metodología empleada, luego se describen las actividades desarrolladas.

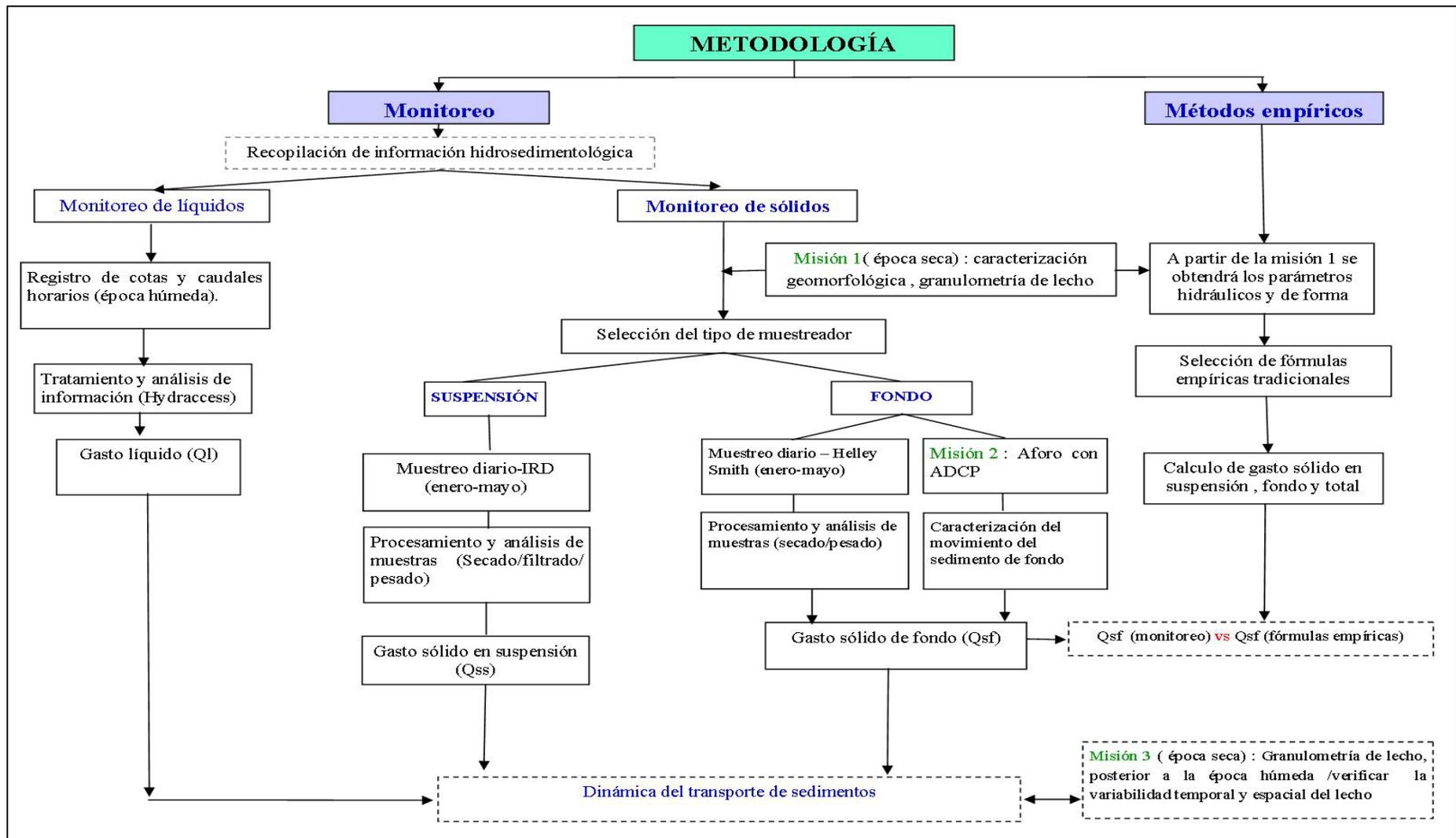


Figura 16: Optimización de la metodología para estimar el gasto sólido total

### **3.3.1 Descripción general de las campañas de campo (misiones)**

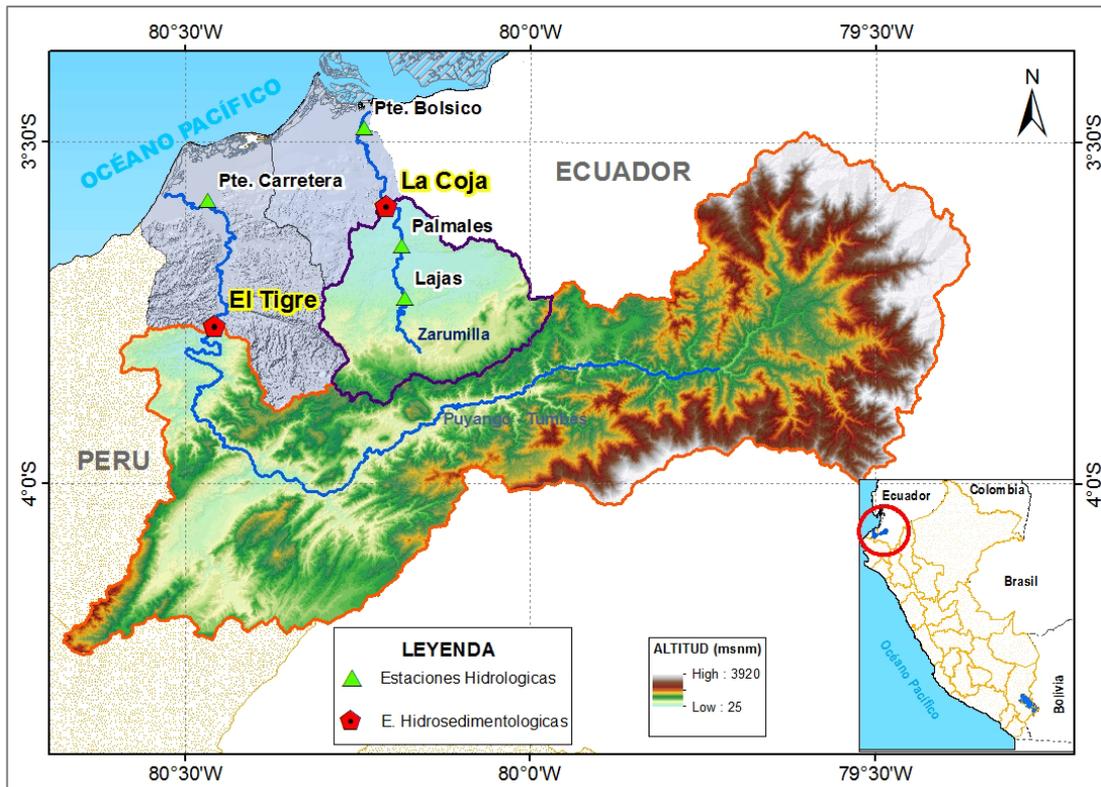
#### **a. Primera campaña de campo (27 al 30 de noviembre 2013)**

- Recopilación de información de caudales líquidos y sólidos instantáneos 2012-2013 en las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla.
- Reconocimiento de campo y ubicación de estaciones de monitoreo de sólidos y líquidos.
- Capacitación de los observadores para la toma del flujo sólido en suspensión y de fondo.
- Obtención de características geomorfológicas en las estaciones de aforo.
- Obtención de la granulometría del lecho en las estaciones de monitoreo mediante muestreo sub superficial (calicata) y superficial (método fotográfico).

Durante la primera misión de campo se visitó y evaluó las condiciones de las estaciones hidrométricas para realizar el monitoreo de sólidos.

En la zona peruana de la cuenca del río Puyango-Tumbes la estación hidrométrica llamada “El Tigre” ubicada en el centro poblado Higuerón cuenta con un rango de registros de cotas y caudales monitoreados a partir del año 1963 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (PEBPT). Dicha estación también cuenta con un puente tipo oroya de donde se realizan los aforos de líquidos.

Para el caso del río Zarumilla se visitó la estación hidrométrica Palmales. Dicha estación cuenta con registro de caudales líquidos y cotas a partir del año 2012 monitoreados por el PEBPT. Durante la primera visita a la estación se detectó la pocas condiciones mínimas para realizar la manipulación del equipo muestreador de fondo Helley-Smith. Debido a esto, en coordinación con el PEBPT se ubicó una nueva estación de monitoreo a 9.5 Km aguas debajo de la estación Palmales, la cual fue nombrada como “La Coja” (ubicada en el centro poblado del mismo nombre). Con el apoyo del PEBPT, se instaló una regla limnimétrica para la medición del nivel de agua en la estación. En la Fig.17 se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas e hidrosedimentológicas.



**Figura 17: Mapa topográfico y ubicación de las estaciones hidro-sedimentológicas.**

**b. Segunda campaña de campo (11-20 de abril 2014)**

- Recopilación de información de caudales líquidos y sólidos 2013-2014, en las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla.
- Monitoreo de la concentración de turbidez utilizando una sonda Ysi 6600 V2-4.
- Medición de velocidad y dirección de flujo, utilizando un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) en la sección de aforo de sólidos y líquidos.
- Recojo de muestras diarias de sedimento en suspensión y de fondo, tomadas de enero- abril 2014, en las estaciones El Tigre y La Coja.

**c. Tercera campaña de campo (4-6 de agosto 2014)**

- Obtención de la granulometría del lecho en las estaciones de monitoreo mediante muestreo sub superficial (calicata) y superficial (método fotográfico) después de la época húmeda.
- Recopilación de información de caudales líquidos (2014), en las estaciones El Tigre, Palmales y Bolsico.

#### **d. Herramienta de tratamiento de datos: Programa HYDRACCESS**

La información hidrométrica recopilada durante las misiones de campo fue almacenada en formato digital en una base de datos Hydraccess.

### **3.3.2 Monitoreo de líquidos**

#### **a. Recolección e inventario de la información hidrométrica existente**

- El registro de caudales, cotas instantáneas y diarias de las estaciones El Tigre (1963-2012) y Palmales (2012-2013) fue proporcionada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), en una base Hydraccess.
- Durante la primera campaña (noviembre 2013) y segunda campaña (abril 2014) se visitó el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT) y el ALA-Tumbes, donde se recolectó información complementaria de caudales en las estaciones: El Tigre, Palmales, Bolsico, Lajas, Puente Carretera.
- Adicionalmente, durante la segunda campaña de campo se recolectó información de cotas y caudales diarios de las estaciones antes mencionadas hasta abril 2014. Esta información fue adicionada a la base de Hydraccess, con lo cual se actualizó la curva de calibración de gasto líquido en función de cotas para las estaciones El Tigre y Palmales.

**Cuadro 5: Inventario de estaciones ubicadas en las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla**

<b>Estación</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Cuenca</b>	<b>Río</b>	<b>Período</b>	<b>Observaciones</b>
El Tigre	40	Puyango Tumbes	Tumbes	1963-2014	Responsable PEBPT y SENAMHI
Puente Carretera	5	Puyango Tumbes	Tumbes	1940-2013	ALA, vacíos(1990-2006)
Lajas	100	Zarumilla	Zarumilla	2010-2014	PEBPT
Palmales	42	Zarumilla	Zarumilla	2010-2014	PEBPT
Puente Bolsico	10	Zarumilla	Zarumilla	1960-2014	ALA, vacíos(1990-2006)

#### **b. Análisis, crítica y tratamiento de la información hidrométrica básica**

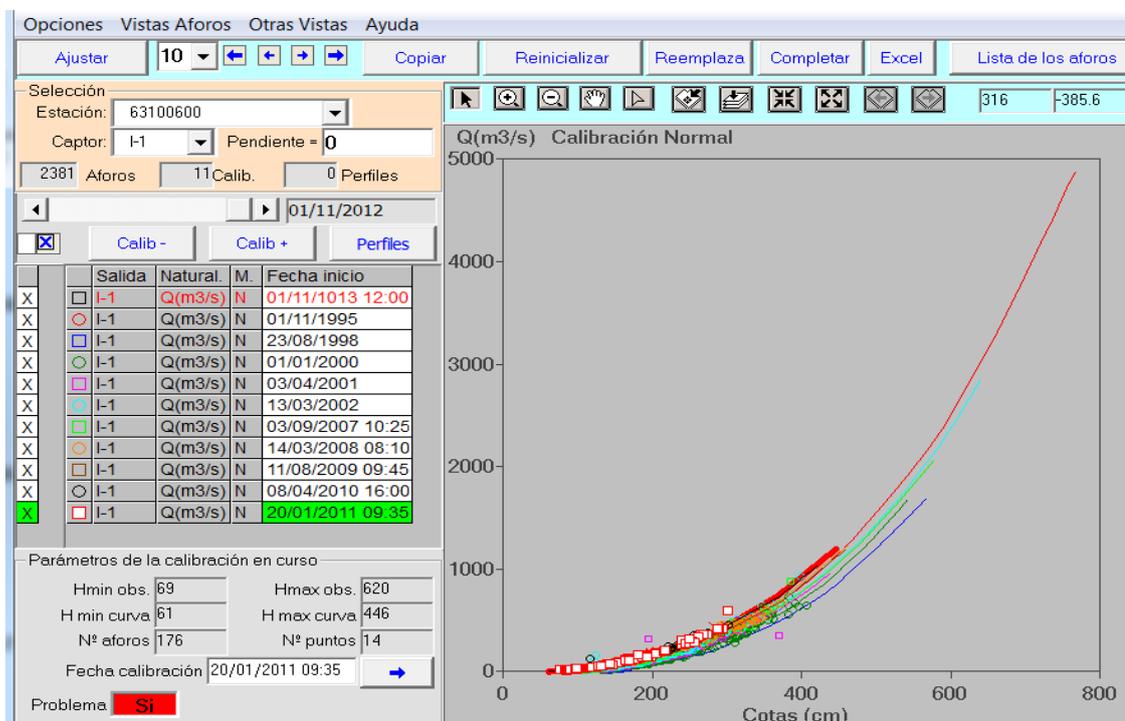
Todo el análisis, la crítica y el tratamiento fueron hechos sobre los datos instantáneos (cotas y aforos), es decir sobre los datos brutos observados en las estaciones.

El primer tratamiento de la información consistió en identificar y corregir los errores más evidentes proviniendo de:

- Errores de tecleo al introducir los datos, adición u omisión de cifras.
- Errores de unidades, conversión de unidades no realizadas de metros a centímetros.
- Repetición de valores, para dos periodos que se siguen.

### c. Análisis de aforos , obtención gasto líquido y cálculo de caudales instantáneos para la estación El Tigre

La realización de las curvas de calibración (caudal en función de cotas) es uno de los pasos más importantes y difíciles del análisis. Importante, por lo que las series de caudales producidos dependen totalmente de la calidad de estas curvas, y difícil porque muy frecuentemente no se tienen suficiente datos de aforos de caudales. La estación de El Tigre ya contaba con una curva de calibración hasta el año 2011. En la Fig.18 se muestra la curva de calibración de la estación El Tigre, con registros de aforos realizados desde el año 1995. Se utilizó la curva de calibración 2012.



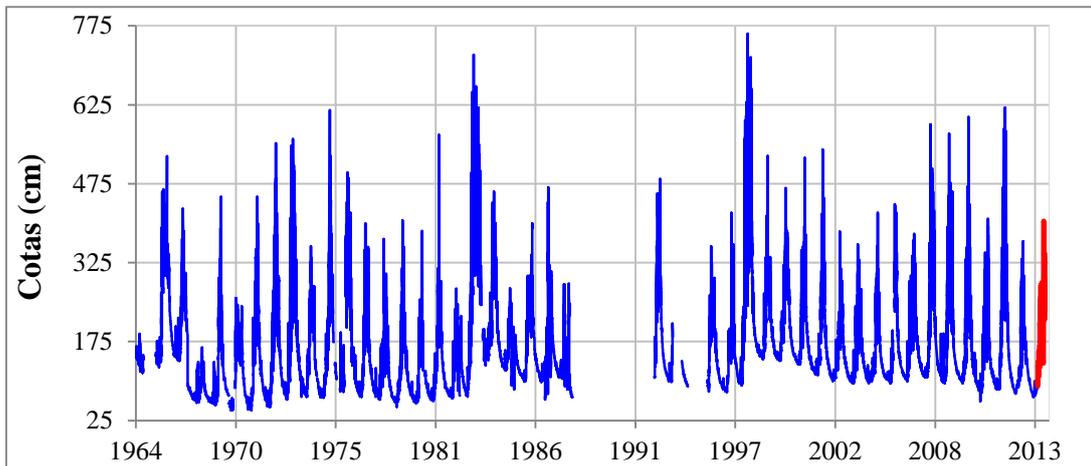
**Figura 18: Curva de calibración de aforos históricos- estación El Tigre (1995-2011).**

Como se puede apreciar en la Fig.18 las curvas de calibración no se cruzan y convergen casi paralelamente en su parte alta. Si se da una descalibración por una

modificación del lecho del cauce, afectará generalmente más los caudales bajos que los caudales altos, para los caudales la modificación de la sección tendrá poco impacto sobre la parte alta de la curva. Y si una des calibración se debe a un cambio de nivel de la escala, la nueva curva debe deducirse de la precedente por una simple translación.

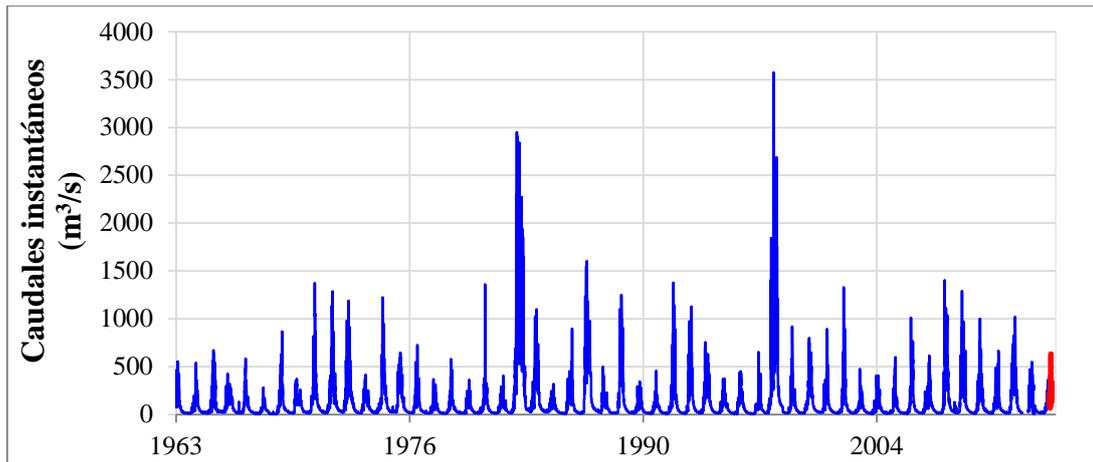
#### - Caudales instantáneos

Para la estación El Tigre a partir de las curvas de calibración, se calcularon los caudales instantáneos con la función traducir cotas a caudales del software Hydraccess. La serie de color rojo fueron registrados durante de enero a abril 2014, el nivel máximo registrado en el periodo de monitoreo 2014 fue de 4.04 metros, y se presentó atípicamente en el mes de mayo. En la Fig.19 se muestra el Hidrograma de cotas instantáneas históricas registradas.



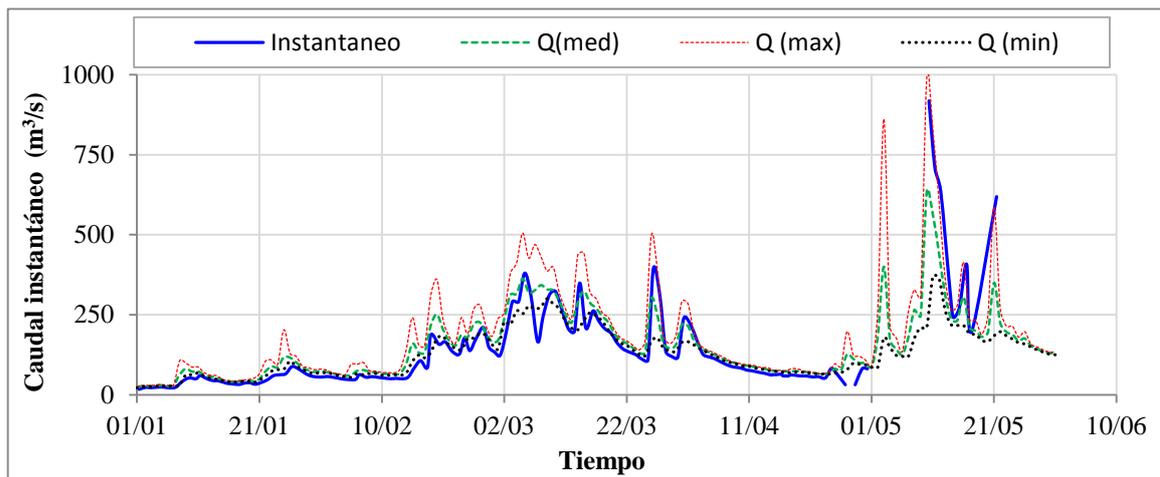
**Figura 19: Histograma histórico de cotas – estación El Tigre.**

En la Fig.20 se muestra el histograma histórico de caudales instantáneos obtenidos para la estación El Tigre. La línea roja representa los caudales instantáneos calculados de enero a mayo 2014, el máximo caudal registrado para el periodo de monitoreo fue de  $562.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , producido extraordinariamente en el mes de mayo.



**Figura 20: Hidrograma de caudales histórico –estación El Tigre (1963-2014).**

Los caudales instantáneos obtenidos a partir de cotas registradas por el observador al momento de tomar la muestra de sedimento de fondo y en suspensión, fueron comparados con los caudales diarios máximos, mínimos y medios. Los caudales diarios se obtuvieron a partir de seis registros de caudal diario realizados cada cuatro horas proporcionados por el PEBPT. Este análisis se realizó para verificar la confiabilidad de las cotas registradas por el observador encargado de realizar la toma de muestra de sedimentos. En la Fig.21 se muestra el hidrograma de caudales monitoreados durante el periodo húmedo 2014. Se observó una buena correlación de caudales instantáneos con los diarios, sin embargo se notó un dato instantáneo erróneo (27/04).



**Figura 21: Hidrograma de caudales – estación El Tigre (enero-abril 2014).**

El caudal instantáneo por debajo del caudal mínimo registrado durante el 27/04 fue remplazándolo por el caudal medio diario registrado. En la Fig.22 se muestra el hidrograma final de caudales instantáneos para el ciclo hidrológico monitoreado.



**Figura 22: Histograma de caudales instantáneos – estación El Tigre.**

#### **d. Análisis de correlaciones múltiples para la estación La Coja**

Como ya se indicó en puntos anteriores la estación La Coja, fue establecida para el monitoreo de sólidos y líquidos en el río Zarumilla, dicha cuenca se encuentra aguas arriba de la estación Puente Bolsico y aguas debajo de la estación Palmales (Fig.23). Siendo una estación nueva, no contaba con registros de aforos ni cotas. El PEBPT instaló el 1 de enero 2014 una regla limnométrica para la medición de cotas.

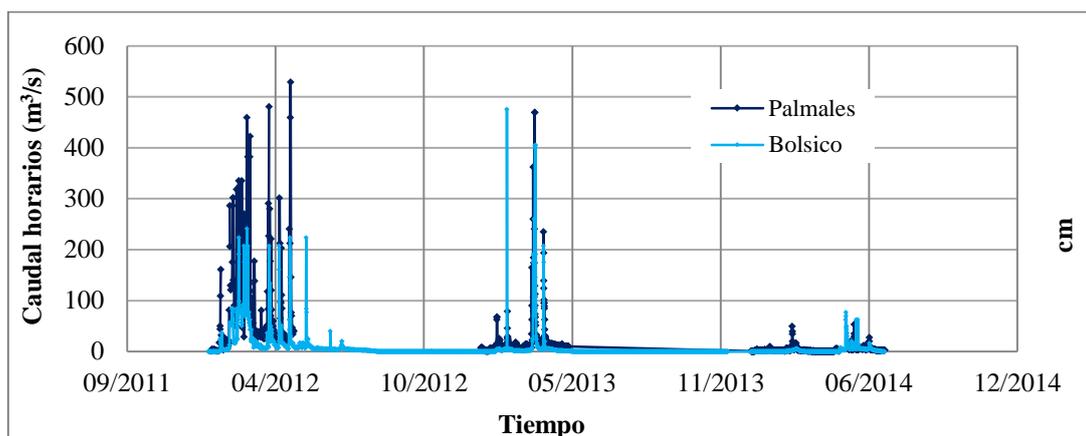
Se tenía programado una segunda campaña de campo para el mes de marzo con la finalidad de realizar aforos con correntómetro y también aforos con el equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), tal como se realizó en la estación El Tigre. Sin embargo, por cuestiones administrativas no se pudo tener el equipo ADCP a tiempo por lo cual la segunda campaña se realizó en mes de abril. Este retraso ocasionó la imposibilidad de realizar los aforos ya que el río se encontraba casi seco, con un nivel de agua que no superaba los 0.2 m y cuyo flujo solo se veía concentrado hacia la margen derecha del curso del río.

Debido a las razones antes expuestas, se estimó los caudales de la estación La Coja a partir de sus estaciones vecinas (extrapolación). Se construyó un modelo de regresión múltiple entre las estaciones cercanas (Palmales y Bolsico) a fin de establecer correlaciones entre cotas y caudales. Para ello se contó con registro de caudales horarios proporcionados por el ALA-Tumbes (Bolsico) y PEBPT (Palmales).



**Figura 23: Ubicación de estaciones hidrométricas – cuenca Zarumilla.**

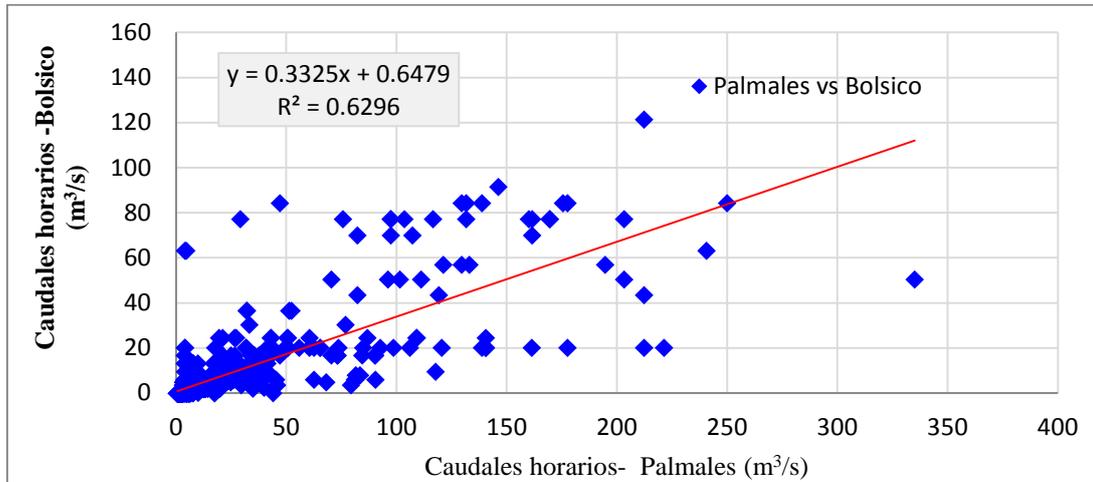
En la Fig.24 se muestra el hidrograma de caudales horarios de las estaciones Palmales y Bolsico. Se aprecia una clara relación a nivel temporal entre los caudales líquidos.



**Figura 24: Hidrograma de caudales horarios en las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Zarumilla.**

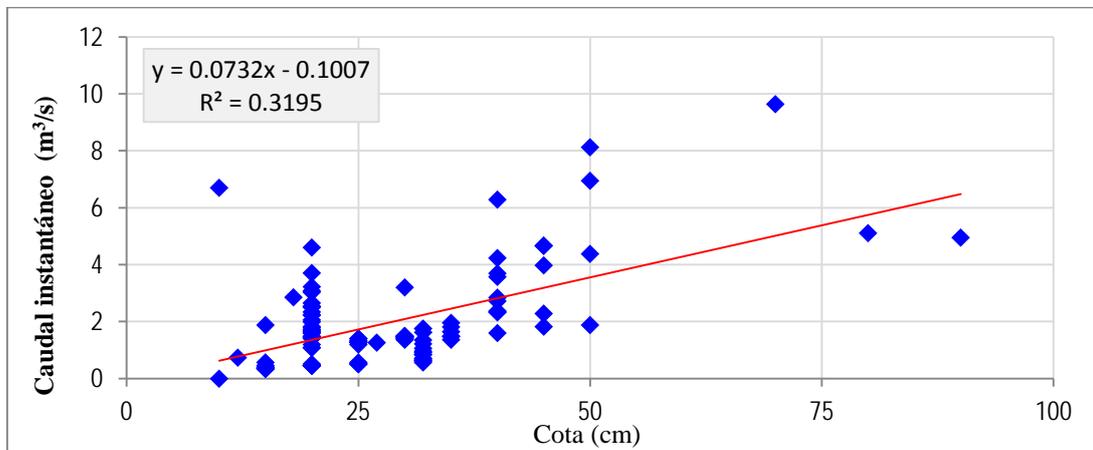
En la Fig.25 se aprecia la correlación potencial entre los caudales horarios de las estaciones Bolsico y Palmales. Ambas estaciones muestran una tendencia lineal con un  $R^2 = 0.62$ .

Durante un ciclo hidrológico normal los caudales registrados en la estación Palmales es tres veces lo registrado en la estación Bolsico.



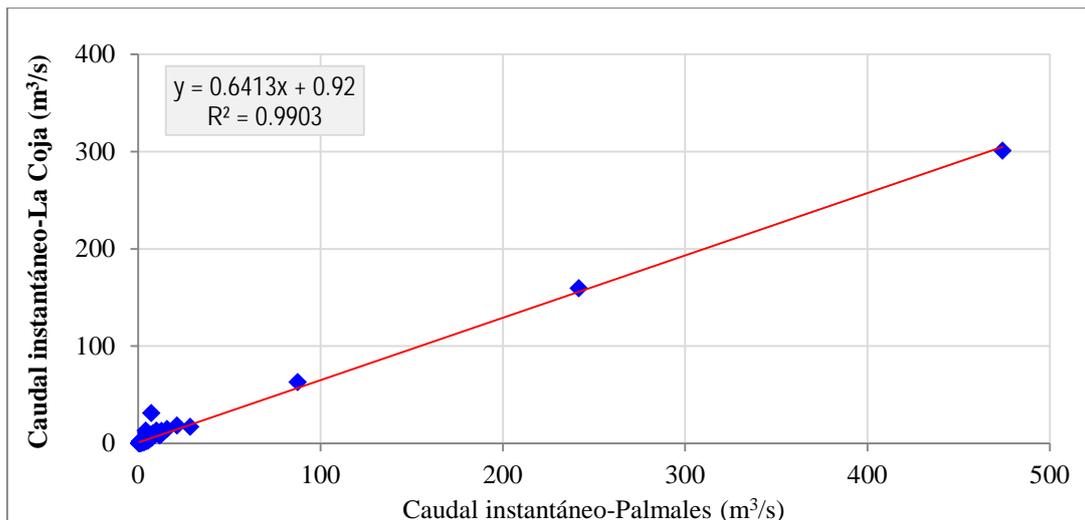
**Figura 25: Regresión lineal simple de caudales - estación Palmales en función de estación Bolsico (2012-2014).**

En la Fig.26, se muestra la correlación entre las cotas instantáneas registradas en la estación La Coja y los caudales generados. Se aprecia una tendencia lineal con un  $R^2$  igual a 0.3, valor representativo a nivel de caudales instantáneos.



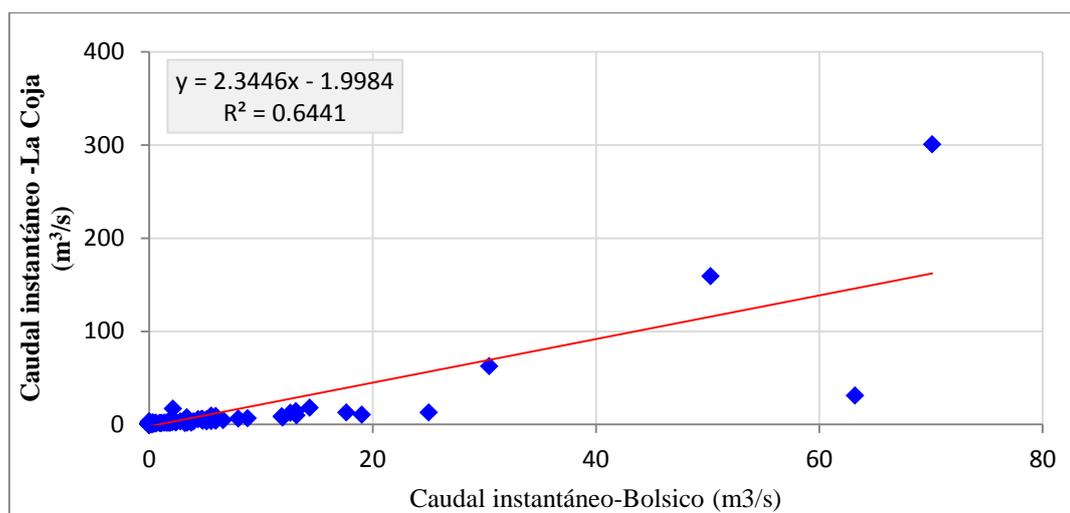
**Figura 26: Regresión lineal simple de cotas en función de caudales - estación La Coja (2014).**

En la Fig. 27 se muestra la correlación lineal entre los caudales instantáneos de la estación Palmales y los generados de La Coja. Se obtuvo un mejor valor de  $R^2$ .



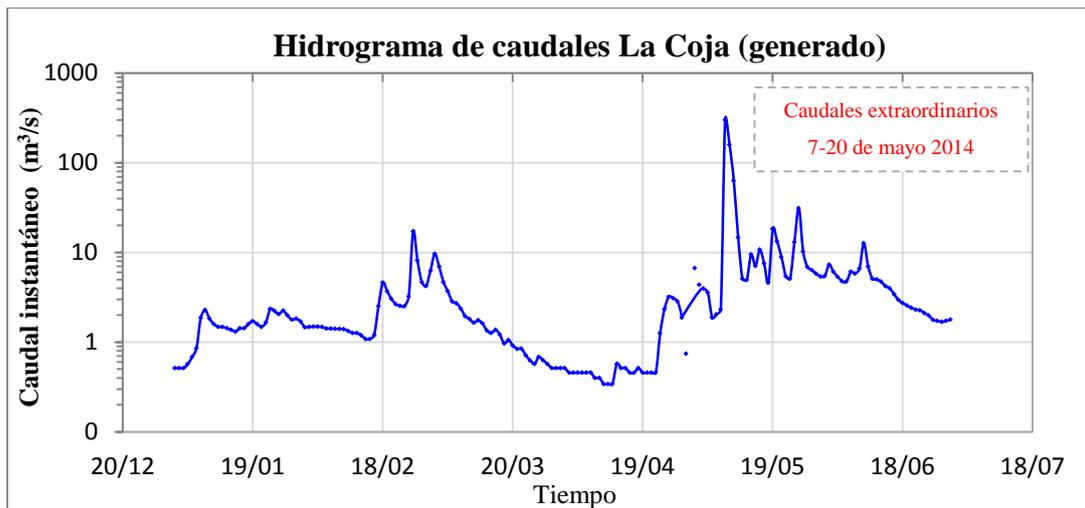
**Figura 27: Regresión lineal simple de caudales en la estación Palmalés en función de la estación La Coja (2014).**

Para los días donde no se realizó mediciones de caudal en la estación Palmalés los caudales instantáneos fueron generados a partir de la estación Bolsico Fig.28.



**Figura 28: Regresión lineal simple de caudales de la estación Bolsico en función de la estación La Coja (2014).**

Finalmente, se obtuvo los caudales instantáneos para la estación La Coja, extrapolados a partir de dos estaciones vecinas consistentes entre sí. Los caudales registrados durante este periodo en promedio estuvieron en el rango de 1 a 12 m³/s, excepto algunos picos de descarga que se presentaron en el mes de mayo. En la Fig. 29 se aprecia los caudales instantáneos para la estación La Coja durante enero a mayo 2014.



**Figura 29: Caudales instantáneos generados en la estación La Coja (2014).**

### 3.3.3 Monitoreo de sedimento de fondo

Monitorear el sedimento de fondo, resulta una tarea difícil; sin embargo, mediante la combinación de una tecnología tradicional (Helley Smith) y una innovadora (ADCP), se logró obtener una serie de datos confiables. Durante la época húmeda 2014 (enero-mayo) se monitoreo los sedimentos de fondo en las estaciones El Tigre (Puyango-Tumbes) y La Coja (Zarumilla). La metodología y el protocolo de muestreo en ambas estaciones fueron las mismas. Sin embargo, debido a las condiciones propias de cada estación como el caudal, tamaño del cauce, tipo de material de fondo y topografía se realizaron algunas variaciones en el protocolo de muestreo. Por ejemplo el tiempo de toma de muestra. A continuación se detallan la metodología aplicada para la selección del tipo de muestreador, protocolo de muestreo, procesamiento y análisis de muestras para obtener el gasto sólido de fondo ( $Q_{sf}$ ) mediante monitoreo.

#### a. Selección del muestreador

Los requisitos técnicos que se utilizaron para la selección de muestreador (Xiaoqing, 2006) se mencionan a continuación:

- El muestreador debe ejercer la mínima perturbación en el flujo, especialmente en las proximidades de la boca muestreador.
- El muestreador debe tener un diseño simple y ser robusta, 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 sedimentos en suspensión y también ser al menos 1,5 veces el tamaño máximo del sedimento de fondo.

El muestreador tipo trampa de diferencia de presiones Helley Smith 76x76 mm contó con estas características (Emmet, 1981). Además, se consideró la aplicabilidad que tuvo en los trabajos realizados (García y Sala, 1998) y (Romero et al., 2011). El muestreador Helley-Smith, está compuesto por un marco de acero del muestreador, una malla de 0.2 mm elaborado de poliéster, y boquilla (Emmet, 1981). Existen dos tipos de tamaño de boquilla que se deben escoger de acuerdo a la granulometría del material de arrastre (Vericat et al., 2006). Para ello en diciembre 2013 se realizó una primera campaña de muestreo superficial y sub superficial (PHI-LAC, 2010) en las estaciones El Tigre y La Coja. De acuerdo con Vericat et al., (2006) cinco veces el tamaño máximo de partículas de lecho de fondo no debe superar el diámetro de la boquilla del muestreador. Los resultados de análisis granulométrico se detallan en el ítem 3.3.5.



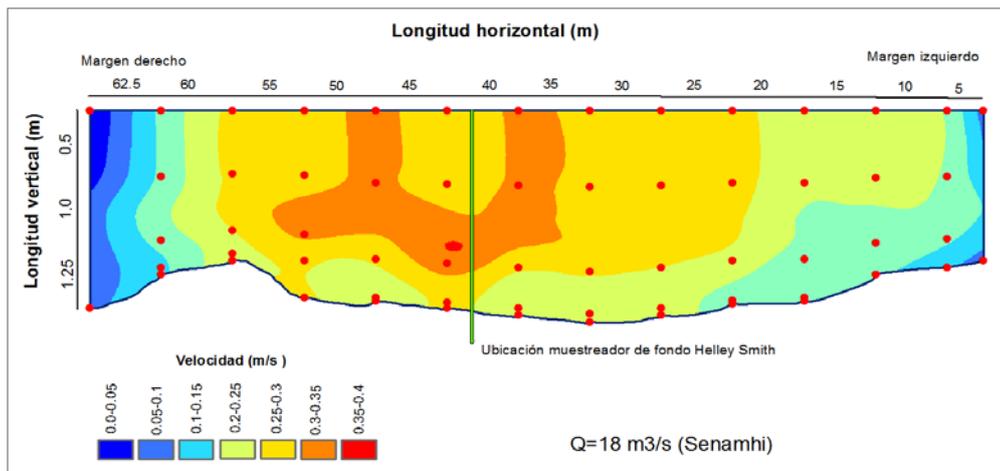
**Figura 30: Prototipos de muestreador de fondo Helley-Smith.**

#### **b. Ubicación del muestreador Helley-Smith**

Para definir la ubicación del muestreador Helley-Smith en la sección de aforo de la estación El Tigre se construyó un perfil de velocidad en base a la batimetría o perfilado de un aforo del año 2007, donde se registró un caudal de 18 m<sup>3</sup>/s. El registro de aforo fue proporcionado por el SENAMHI. Para obtener la gradiente de velocidad se

interpolaron los datos de aforo registrados por cada transecto, para ello se utilizó la herramienta Interpolación (método de Spline) del software Argis 10.0.

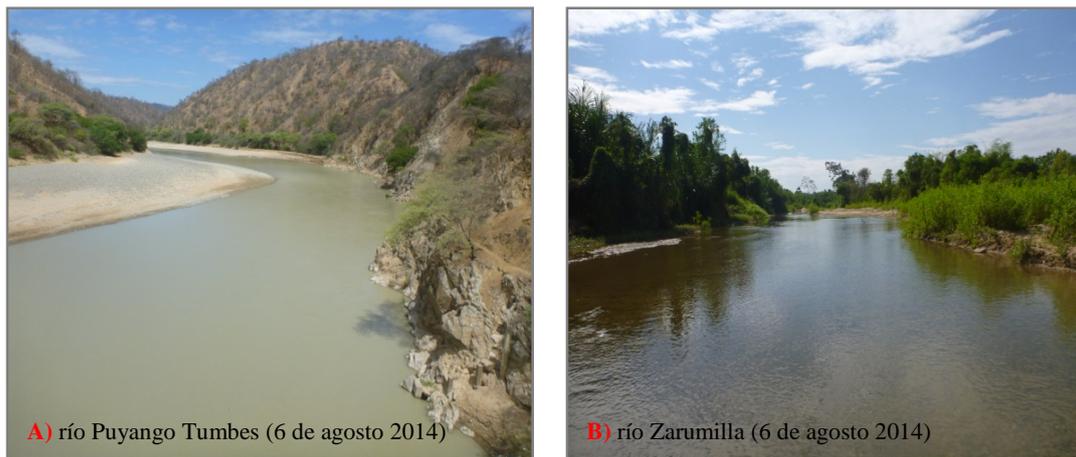
La Fig.31 muestra que las velocidades más altas del perfil de aforo, estas se concentran en el centro de la sección (un metro de profundidad), razón por la cual se determinó la ubicación del muestreador Helley-Smith en el centro de la sección de aforo, aproximadamente entre los 30 y 40 metros respecto a la margen derecha de la sección.



**Figura 31: Gradiente de velocidad de la estación El Tigre (Setiembre, 2007).**

Para la estación La Coja (río Zarumilla) no se pudo obtener un perfil de velocidad ya que, era una estación recién instalada. Sin embargo, la estación tiene una longitud menor de cauce (40 metros). Donde el flujo corre en una misma dirección desde la parte alta de la cuenca (Vericat et al., 2000), a diferencia de la cuenca Puyango-Tumbes cuya planicie costera en la parte baja incluye superficies aluviales ligeramente planas y suavemente onduladas (PEBPT, 2002).

En la Fig.32 se aprecia la imagen del curso del río en ambas estaciones El Tigre y La Coja, A) Erosión lateral en la sección de aforo El Tigre B) Se aprecia la mitad de la sección del río debido a la colonización por vegetación y reducción de ancho del cauce del río en la estación La Coja. En ambos casos el muestreador Helley-Smith fue ubicado en la parte media de la sección.



**Figura 32: Vista panorámica de la estación El Tigre y La Coja.**

**c. Protocolo de toma de muestra de sedimento de fondo**

El protocolo de muestreo de sedimento de fondo se detalla a continuación:

**- Inspección de las condiciones generales del río:**

Se observaron las condiciones de niveles y velocidades que presentaba el flujo, para establecer medidas que se deben tomar antes de realizar el aforo. Esta revisión es importante puesto que cuando un río presenta niveles y caudales altos arrastra materiales como troncos, plantas, basura, etc. que puede poner en riesgo la integridad de los observadores y los equipos de medición. Por lo tanto, las mediciones a caudales altos pueden hacerse solo si se garantiza la protección a los técnicos y los equipos.

**- Numero de muestras:**

Para ríos de montaña se recomienda el método compuesto el cual consiste en la toma de una sola muestra por cada aforo (Xiaoqing, 2006).

**- Tiempo de medición:**

El Servicio Geológico de EE.UU. recomienda un tiempo de muestreo entre 30 a 60 segundos por vertical. Sandra et al., (1999), determina un intervalo de tiempo entre 1 a 2 minutos. Sin embargo, no existe una forma sencilla de determinar un tiempo de muestreo apropiado, pero este debe ser tan corto que permita recoger una muestra con una alta variación del transporte sin que se llene la bolsa del muestreador más del 50 por ciento de su capacidad total (PMC, 2007). Durante la

primera campaña de campo (Diciembre 2013), en la estación El Tigre, se tomaron muestras de sedimento de fondo en diferentes intervalos de tiempo entre 3 y 30 minutos. Del cual se obtuvo un tiempo óptimo de muestreo de 10 minutos para la estación El Tigre. Para la estación La Coja (río Zarumilla) se obtuvo un tiempo de muestreo de 15 minutos.

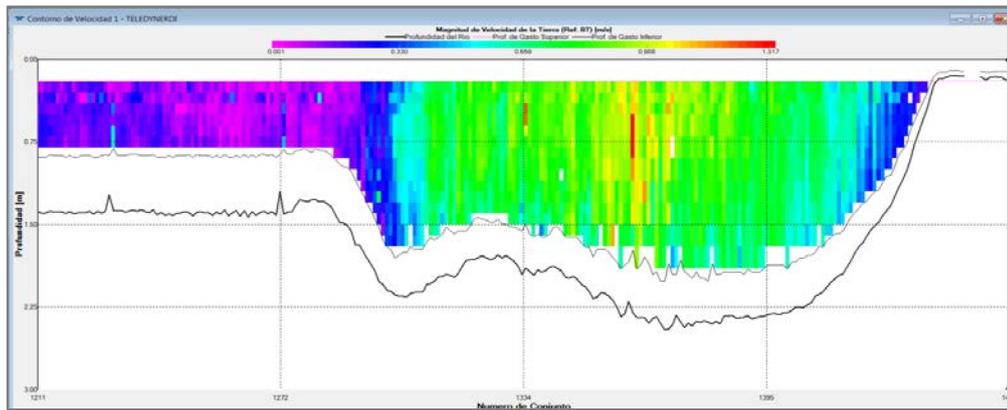
- **Toma de muestra:**

El equipo de fondo Helley-Smith puede ser manipulado mediante una varilla (para bajos caudales) o mediante una cuerda (desde un puente). El equipo deberá ser suspendido hasta el fondo del lecho de la sección de aforo. A partir del momento que el equipo descienda completamente se iniciara la medición del tiempo (tiempo de medición definido previamente). Terminado el tiempo de toma de muestra, elevar el muestreador cuidadosamente para que no se pierda una porción de muestra, retirar la muestra vertiendo su contenido hacia una bolsa hermética, etiquetar y lavar el equipo antes de realizar otro muestreo (PMC, 2007).

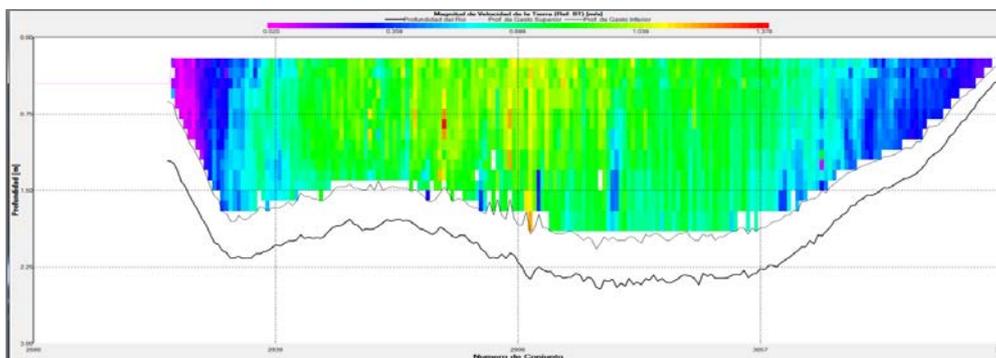
**d. Caracterización del movimiento del sedimento de fondo en el lecho del río (Estación El Tigre)**

Para caracterizar el movimiento del sedimento de fondo en el lecho del río se utilizó el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP). La tecnología acústica Doppler, ya reconocida para la medición precisa de caudales líquidos y características del flujo en sistemas fluviales, puede también ser adaptada para la estimación del transporte de sedimento de fondo. De acuerdo a Latosinski et al., (2011) se halló resultados preliminares que relacionan los valores de velocidad con el comportamiento esperado del transporte de fondo. En la presente tesis el ADCP permitió caracterizar el movimiento del sedimento de fondo, algo innovador hasta la actualidad.

Se realizaron 12 aforos con el ADCP sin embargo, debido a la geometría del perfil en la sección y la dificultad al momento de realizar la medición desde el carro huero no se pudo obtener todos los perfiles de mediciones al perderse la señal que necesita el equipo ADCP al computador (alcance = 100 m), de donde se registra las mediciones. Se seleccionaron los perfiles donde se obtuvieron la medición completa de la gradiente de velocidad desde el inicio hasta el final de la sección. A continuación, se muestran dos perfiles de velocidad registrados con el ADCP en la estación El Tigre, Fig.33 y Fig.34.



**Figura 33: Gradiente de velocidades (1) a partir de medición con ADCP estación El Tigre.**

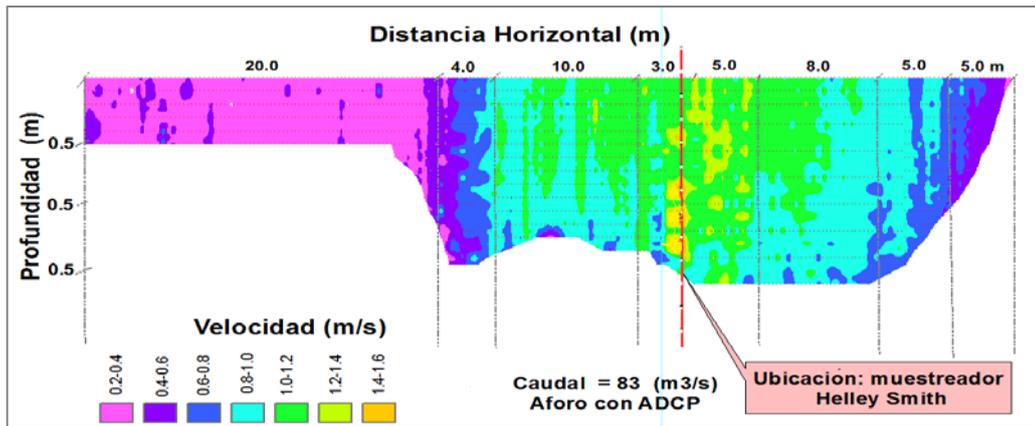


**Figura 34: Gradiente de velocidades (2) a partir de medición con ADCP estación El Tigre.**

La velocidad media fue de 0.68 m/s. Las mayores velocidades se registran en el centro de la sección, siendo el valor máximo de 1.378 m/s. La profundidad media es de aproximadamente de 0.8, y la máxima profundidad es de 1.6 m, cercana a la margen derecha de la sección.

Posteriormente se obtuvo un promedio de las mejores mediciones, las cuales fueron trabajadas en el software Argis 10. La sección promedio obtenida Fig.35 fue subseccionada en función a la gradiente de velocidad registrada. Esto se realizó con la finalidad de calcular el gasto sólido de fondo (Qsf) observado, considerando la distribución de velocidad.

La velocidad media registrada fue de 0.8 m/s. Las mayores velocidades se registran en el centro de la sección, siendo el valor máximo de 1.4 m/s. La profundidad media donde se registraron velocidades fue de aproximadamente de 0.8 m y la máxima profundidad fue 1.6 m, cercana a la margen derecha de la sección.

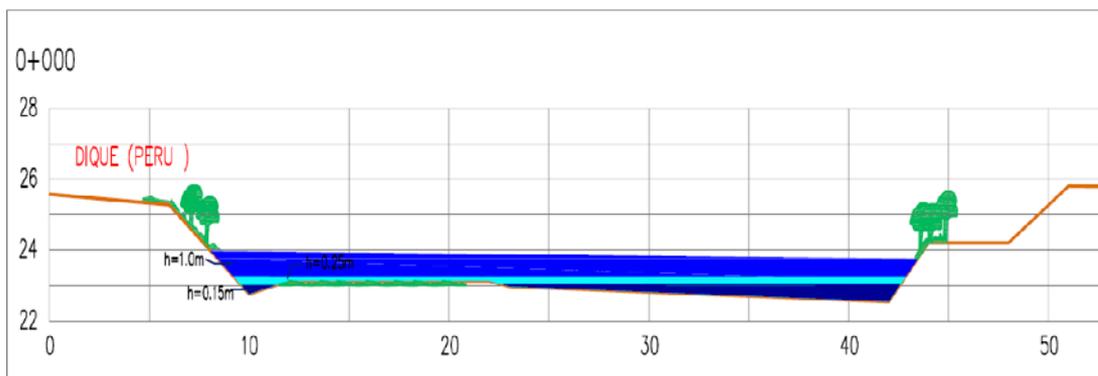


**Figura 35: Gradiente de velocidades promedio en la estación El Tigre (12/04/14).**

Para definir el ancho de la sección de aforo se consideró la batimetría registrada en los últimos años (Fig.48). Para caudales mayores a 300 m<sup>3</sup>/s se registra un ancho de sección entre 90 y 100 metros y para caudales menores a 300 m<sup>3</sup>/s se consideró un ancho total de 60 metros.

**e. Análisis de la Sección de aforo (Estación La Coja)**

Para el caso de la estación La Coja en el río Zarumilla, no se pudo utilizar el equipo ADCP ya que, el nivel registrado durante la campaña fue de 0.2 m , frente al mínimo nivel requerido (un metro) para poder utilizar el equipo. Sin embargo, en la estación La Coja se realizó un levantamiento topográfico, el cual permitió con ayuda de fotos registradas durante la etapa de monitoreo, definir el ancho total de la sección para diferentes niveles.



**Figura 36: Perfil topográfico de la estación La Coja.**

Para niveles de 0 a 0.15 metros la longitud total considerada fue de 10 metros. Niveles entre 0.15 a 0.25 la longitud total fue de 25 metros y para niveles registrados mayores a 0.25 metros se consideró una longitud total de la sección de aforo igual a 36 metros.

#### **f. Procesamiento en laboratorio de muestras (sedimento de fondo)**

Se obtuvieron muestras diarias de sedimento de fondo durante enero – abril 2014. Se trasladó las muestras hacia 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 consideró el protocolo utilizado por Vericat et al., (2006).

- Secado 1 : se secaron todas las muestras a temperatura de ambiente
- Secado 2 : se vaciaron las muestras a unos recipientes para su secado a estufa (120 °C).
- Pesado : se obtuvieron los pesos en kilogramos de las muestras.

#### **g. Ecuación para cuantificar el gasto sólido observado**

A partir de la ecuación de (Iroumé, 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 número de muestras (n). Se calculó el Qsf. Adicional a las variables mencionadas se consideró un factor de velocidad.

En la estación El Tigre, el ancho total de la sección (B) fue dividido en siete sub secciones en función de la gradiente de velocidad Fig.35 Se consideró un factor del 100 por ciento para la sub sección donde se ubicó el muestreador. A partir de ello se calculó el Qsf por sub sección.

En el caso de la estación La Coja, se analizó el perfil topográfico (Fig.36) , cuya variación de tirantes son mínimas y además los caudales registrados fueron bajos, no fue considerado un factor de velocidad, sin embargo se consideró 4 diferentes tipos de ancho de la sección (B) para diferentes tirantes registrados.

$$Qsf = \frac{P * B}{n * t * b} \quad 3.3$$

En el Cuadro 6 y 7 se muestra los parámetros hidráulicos considerados para las estaciones El Tigre y La Coja respectivamente.

**Cuadro 6: Parámetros de cálculo del muestreador de fondo Helley Smith (El Tigre)**

Símbolo	Descripción	Valores
P	Peso	Peso seco de la muestra de fondo (1 valor diario)
B	Ancho mojado	Se consideraron dos anchos 60 y 100 metros
n	Numero de sub muestras	1 muestra por toda la sección
t	Tiempo	Intervalo de tiempo que duro el muestreo, 10 minutos
b	ancho boca Helley Smith	0.0762 m

**Cuadro 7: Parámetros de cálculo del muestreador de fondo Helley Smith (La Coja)**

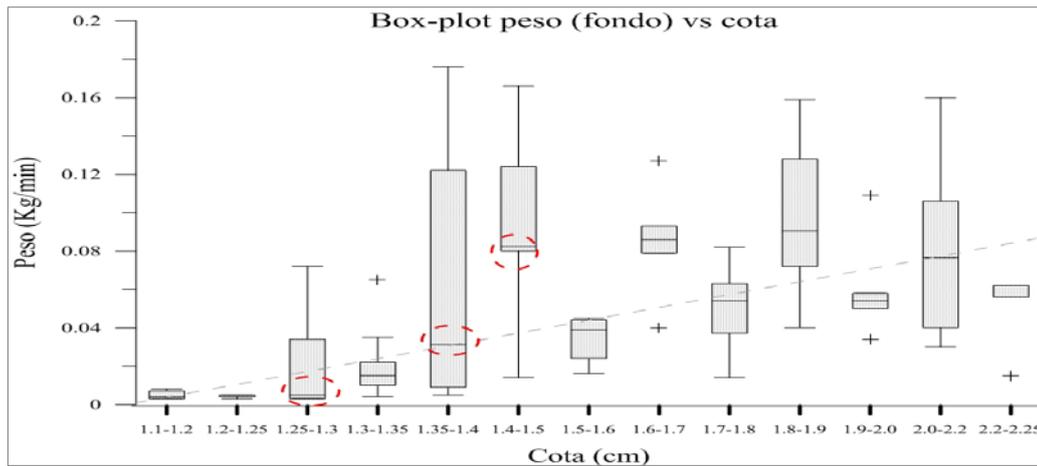
Símbolo	Descripción	Valores
P	Peso	Peso seco de la muestra de fondo (1 valor diario en Kg)
B	Ancho mojado	Se consideraron tres anchos 10;16 y 32 metros
n	Número de sub muestras	1 muestra por toda la sección
t	Tiempo	Intervalo de tiempo que duro el muestreo, 15 minutos
b	ancho boca Helley Smith	0.0762 m

#### **h. Análisis de confiabilidad de datos de fondo**

Antes de realizar los cálculos de estimación del gasto sólido de fondo en t/d. Se realizó un análisis de las muestras obtenidas en ambas estaciones.

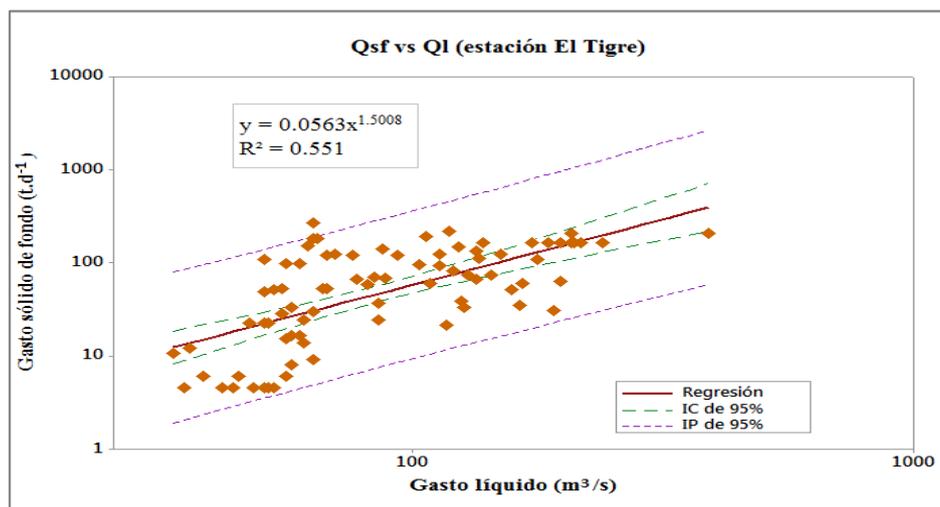
- Estación El Tigre:

En la Fig.37, se muestra el Box plot de peso del sedimento de fondo expresado en kg/min en función de cota registrados en la estación El Tigre. El “+” muestra los valores atípicos. El final de las líneas continuas representa los pesos a 5 y 95 percentil. Los círculos de color rojo muestran la media por la cual fueron remplazados valores atípicos de un rango de datos. Existe una gran dispersión de las muestras, cuando se presentan variaciones de nivel de manera muy rápida. Sin embargo, los grupos de muestras comprendidas entre una variación de no más de un centímetro tienen a ser similares.



**Figura 37: Box - plot de pesos de fondo para un rango de cotas –estación El Tigre.**

A partir de los box plot de los datos de pesos de las muestras, se corrigieron algunos valores atípicos y aquellos que estuvieron muy por encima de la media, se consideró el valor medio del conjunto de muestras (Fig.37). Esto permitió tener una mejor correlación entre el gasto sólido de fondo estimado en t/d en función de los caudales líquidos. En la Fig.38, se muestra la curva de gasto sólido de fondo en función de los caudales líquidos para la estación El Tigre. Las líneas de color verde representa el intervalo de confianza (IC) al 95 percentil y las líneas de color morado representa el intervalo de probabilidad de ocurrencia ajustadas al 5 y 95 percentil.

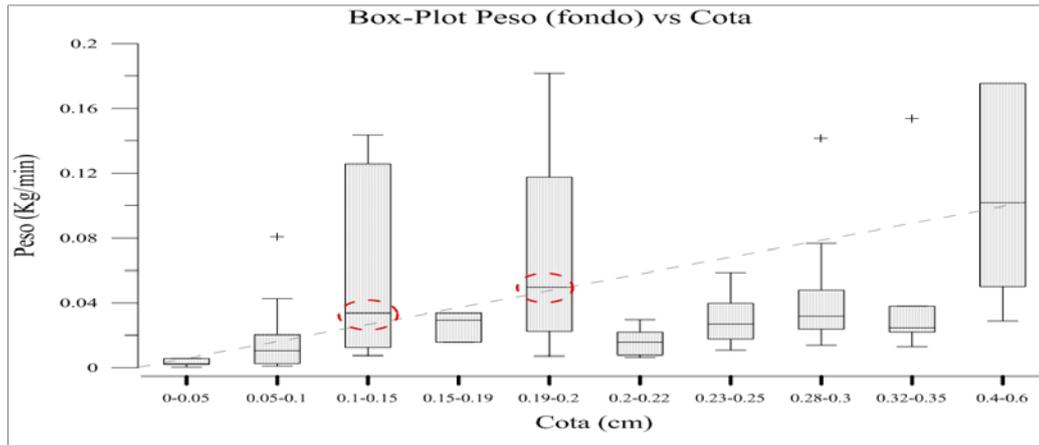


**Figura 38: Modelo de gasto sólido de fondo en función del gasto líquido estación El Tigre (2013-2014).**

De la misma forma en la estación La Coja, se realizó un análisis de datos de muestras de fondo. En la Fig.39 se muestra el box plot de los pesos para cada cota (intervalo de cinco días). Existe una tendencia lineal del incremento de las muestras, con algunas variaciones y valores atípicos. Las muestras con mayores pesos se obtuvieron entre el

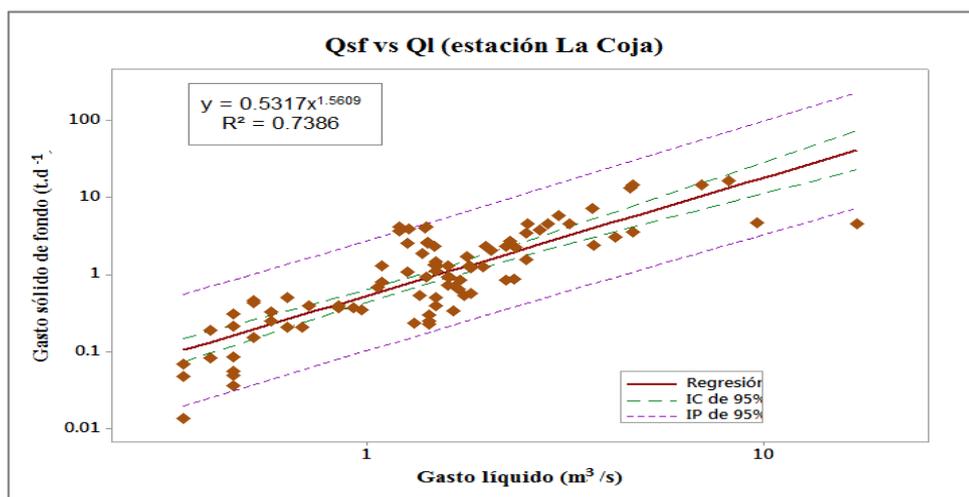
mes de febrero y marzo. El “+” muestra los valores atípicos. El final de las líneas continuas representa los pesos a 5 y 95 percentil. Los círculos de color rojo muestran la media por la cual fueron remplazados valores atípicos de un rango de datos.

A partir del análisis de datos de pesos de las muestras, se corrigieron algunos valores atípicos. Los valores que estuvieron muy por encima de la media fueron remplazados con el valor medio del conjunto de muestras (Figura 39).



**Figura 39: Box - plot de pesos de muestras de fondo para un rango de cotas-estación La Coja.**

En la (Fig.40) se muestra la curva de gasto sólido de fondo versus caudales líquidos para la estación La Coja. Las líneas de color verde representa el intervalo de confianza (IC) al 95 percentil y las líneas de color morado representa el intervalo de probabilidad de ocurrencia ajustadas al 5 y 95 percentil.



**Figura 40: Modelo de gasto sólido de fondo en función del gasto líquido estación La Coja (2013-2014).**

### **3.3.4 Monitoreo de sedimento en suspensión**

En la actualidad el Proyecto HYBAM (Hidrogeodinámica actual de la cuenca Amazónica) viene monitoreando los sedimentos en suspensión en la Amazonia Peruana. Además El proyecto HYBAM monitoreó los sedimentos en suspensión en la estación El Tigre (2004-2012), con un intervalo de muestra cada 10 días.

En la presente tesis se monitoreó los sedimentos en suspensión en la estación El Tigre y La Coja ampliando la intensidad de muestreo a un intervalo diario (enero-mayo 2014).

#### **a. Protocolo de muestreo HYBAM**

El protocolo de muestreo consiste en recolectar manualmente una muestra superficial de agua a la orilla del río en botellas de 500 a 700 ml. La profundidad que se sumerge la botella es aproximadamente a 0.5 metros. Posteriormente las muestras son etiquetadas (fecha, hora, cota o caudal) y conservadas hasta su procesamiento.

#### **b. Procesamiento en laboratorio de muestras**

Para el análisis de las muestras se contó con el apoyo del proyecto HYBAM, quienes proporcionaron su laboratorio ubicado en la UNALM.

El procedimiento consistió primero en obtener el volumen de cada muestra. Luego se filtraron las muestras utilizando un papel filtro (45  $\mu\text{m}$ . de porosidad), para acelerar el proceso de filtrado se utilizó una bomba de vacío. Los residuos que se adhieren a la botella fueron lavados con agua destilada con ayuda de una pipeta. Finalmente, estas muestras fueron secadas a estufa a una temperatura de 105 grados centígrados durante una hora.

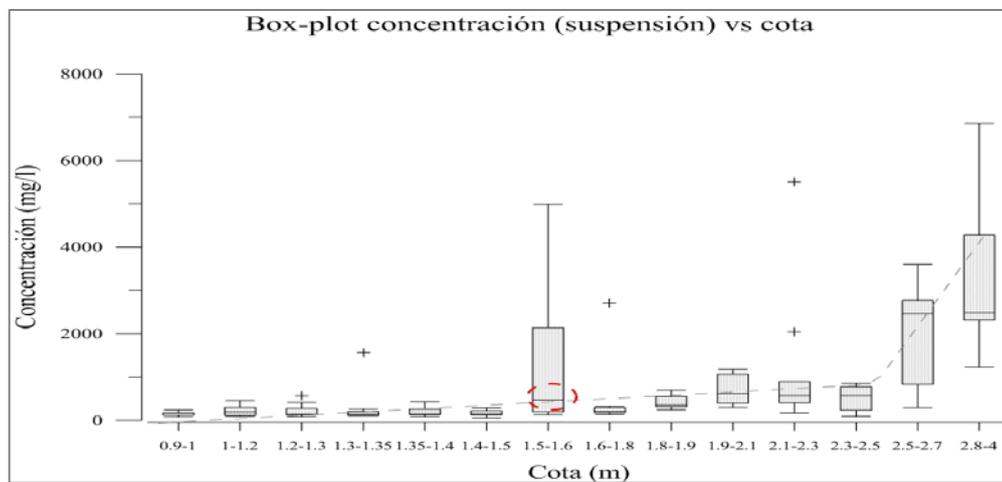
La concentración de material en suspensión de las muestras se determinó por diferencia de peso de filtro es decir (filtro limpio y seco) antes de filtrar y el peso después de la filtración (filtro seco + material), el resultado de la diferencia se dividió entre el volumen de la muestra. El método de cálculo utilizado para obtener la concentración del material en suspensión (mg/l) fue la Ecuación 15 desarrollado por Phillips et al., (1999) para flujos sólidos observados.

A partir de la concentración de sedimentos (MES) y los caudales instantáneos (QI), se calculó el gasto sólido en suspensión (Q<sub>ss</sub>).

### c. Análisis de confiabilidad de datos en suspensión

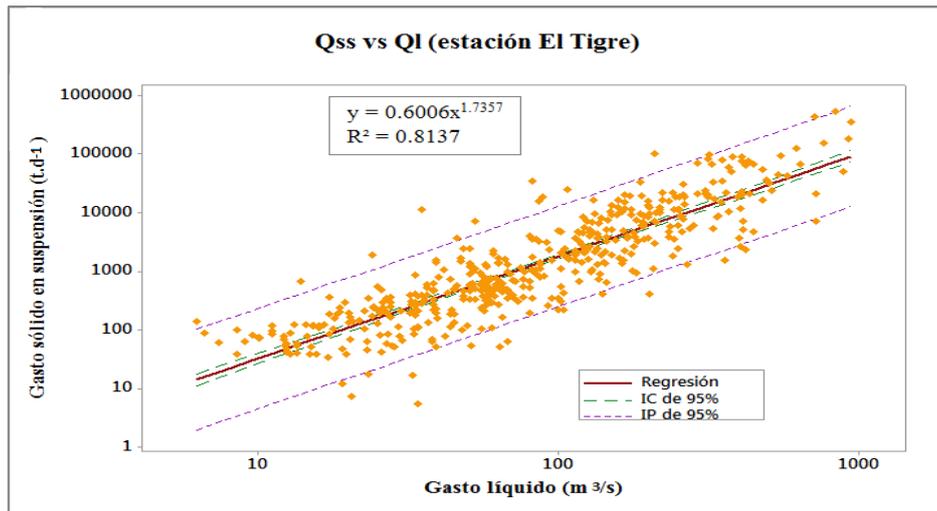
Antes de realizar los cálculos de estimación del gasto sólido en suspensión en t/d. Se realizó un análisis de confiabilidad de los datos observados a partir de las concentraciones (mg/l) en la estación El Tigre y La Coja (enero-mayo 2014).

Para la estación El Tigre (Fig.41) se muestra el Box-plot de las concentraciones de sedimentos en suspensión en función de las cotas, existe una baja dispersión de los datos, con algunos valores atípicos sin embargo, concentraciones por encima de los 1.8 metros registran una mayor dispersión acompañado del incremento de las concentraciones. Se han corregieron algunos valores atípicos por encima de la tendencia promedio (Fig.41). Considerando el valor medio del conjunto de muestras. La mayor dispersión de datos se presentó con los caudales más altos. La serie de datos observados 2014 fue ingresada a la base de Hydraccess, la cual contaba con aforos de sólidos en suspensión desde el año 2004, obteniendo una nueva curva de calibración de relación gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido (el “+” muestra los valores atípicos. El final de las líneas continuas representa los pesos a 5 y 95 percentil (el círculo de color rojo muestra la media por la cual fueron remplazados valores atípicos de un rango de datos).



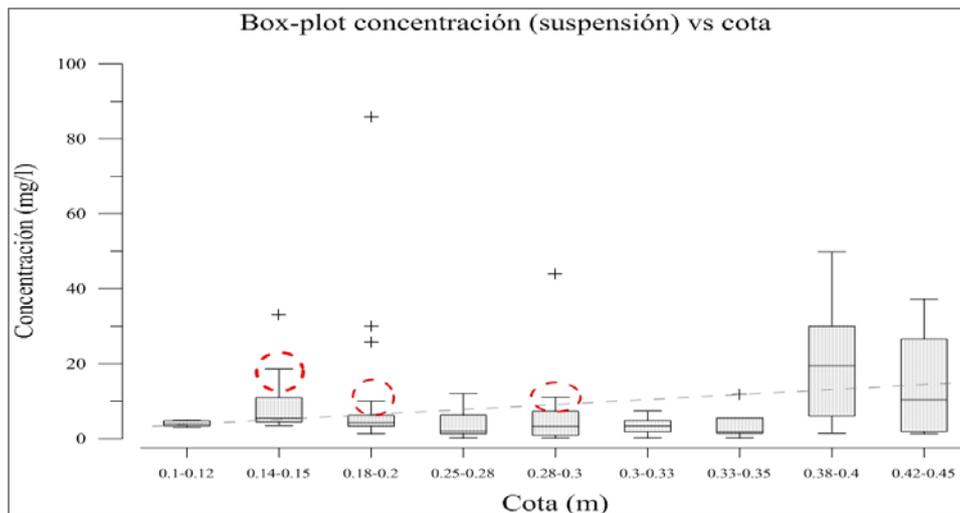
**Figura 41: Box - plot concentración de sedimento en suspensión para un rango de cotas- estación El Tigre.**

En la Fig.42, se muestra la curva de gasto sólido en suspensión versus caudales líquidos para la estación El Tigre (las líneas de color verde representa el intervalo de confianza (IC) al 95 percentil y las líneas de color morado representa el intervalo de probabilidad de ocurrencia ajustadas al 5 y 95 percentil).



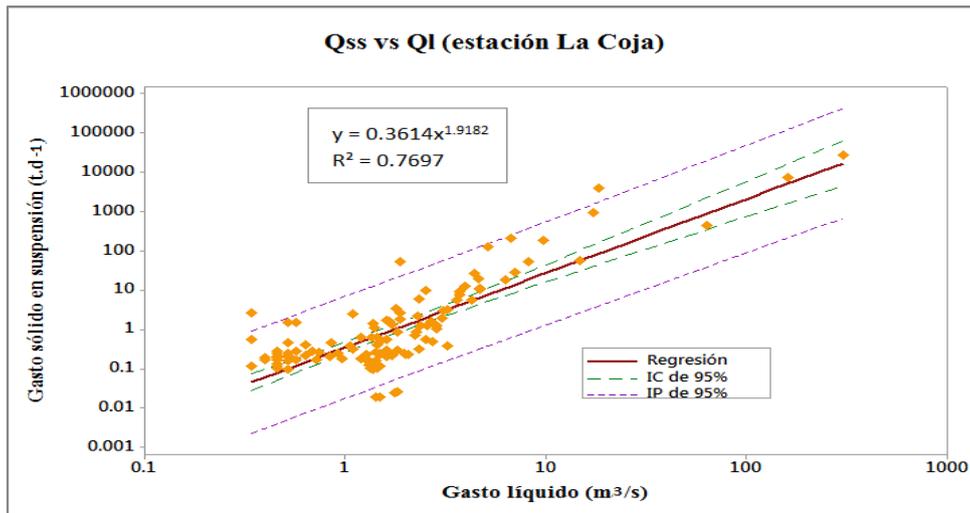
**Figura 42: Modelo de gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido (2004-2014).**

En la estación La Coja (Fig.43) se muestra el Box-plot de las concentraciones de sedimentos en suspensión en función de las cotas (el “+” muestra los valores atípicos. El final de las líneas continuas representa los pesos a 5 y 95 percentil). La incertidumbre de los datos observados es mayor a partir de las cotas 0.38 metros y algunos valores atípicos. Las altas concentraciones de mayo posiblemente están relacionadas con la llegada de las ondas Kelvin al Pacífico Ecuatorial (EFEN, 2014).



**Figura 43. Box - plot de concentración de sedimento en suspensión para un rango de cotas- estación La Coja.**

A partir del análisis de concentraciones, se corrigieron algunos valores atípicos. Los valores atípicos que se presentaron fueron reemplazados por los máximos (Fig.43).



**Figura 44: Modelo gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido estación La Coja (2013-2014).**

Del valor medio del conjunto de muestras. Esto permitió tener un mejor coeficiente de relación ( $r$ ) entre el gasto sólido en suspensión estimado en función de los caudales líquidos. En la Fig.44, se muestra la curva de gasto sólido en suspensión en función de caudales líquidos para la estación La Coja (las líneas de color verde representa el intervalo de confianza (IC) al 95 percentil y las líneas de color morado representa el intervalo de probabilidad de ocurrencia ajustadas al 5 y 95 percentil).

### 3.3.5 Estimación del gasto sólido de fondo a partir de fórmulas empíricas

En la actualidad se vienen aplicando fórmulas empíricas para estimar el transporte de sedimentos de fondo, las mismas que fueron diseñadas bajo un rango de aplicación principalmente en función de la granulometría del lecho en la zona estudiada. Previamente a la selección de las fórmulas empíricas que se utilizaron en este estudio. Durante la primera campaña de campo (noviembre 2013) se realizó el muestreo superficial y sub superficial del lecho del río en las estaciones El Tigre y La Coja.

Se aplicaron siete fórmulas de descarga de fondo: Du Boys – Straub (1987-1935); Yalin (1963); Meyer-Peter y Muller (1948), Schoklitsch (1950), Einstein- Brown (Einstein 1950; Brown 1950); Van Rijn (1984); Pernecker y Vollmer (1984).

En el Cuadro 8 se muestra el diámetro representativo del tamaño de las partículas y algunos parámetros considerados para la selección de las fórmulas mencionadas (Haddadchi, 2013).

**Cuadro 8: Descripción de las ecuaciones de sedimento de fondo**

Nombre de fórmula	Año publicado	Diámetro representativo	Rango de tamaño de partícula	Tipos de datos y descripciones
Do Boys - Straub	1879-1935	D50	-	El lecho por acción del esfuerzo cortante se mueve en una serie de capas superpuestas de espesor D50
Meyer-Peter and Muller	1948-1954	Dm	0.4-30	Sedimentos uniformes con peso específico entre 1.25-4
Schoklitsch	1950	D40	0.3-5	Sedimentos medidos en pequeños flujos bien ordenados y distribuidos. No aplicable para ríos de lecho de arena híper- concentrado
Einstein-Brown	1942-1950	D50	0.785-28.65	Sedimentos uniformes y materiales de peso ligero basados en datos de canal
Yalin	1963	D50	0.315-28.65	Sedimento uniforme y materiales de peso ligero
Van Rijn	1984	D90	0.2-2	Sobre la base de 130 experimentos en un canal
Pernecker y Vollmer	1984	Dm	-	Numero adimensional de Shields entre 0.04 y 0.5

La variación vertical del tamaño de los sedimentos en el lecho del río se manifiesta generalmente por la presencia de tres capas distintas: (1) una capa superficial de material grueso, denominada comúnmente capa de armadura, con un espesor aproximadamente igual al D<sub>90</sub> (Diplas, 1992); (2) una capa subsuperficial, generalmente conformada por sedimentos más finos que los de la capa superficial, con un espesor cercano a dos veces el D<sub>90</sub> (de su propia distribución granulométrica) y (3) la capa del fondo propiamente dicha sin un espesor predeterminado (Diplas y Fripp, 1992) y compuesta por sedimentos de tamaños similares a los de la capa subsuperficial pero con menor contenido de finos (Church, 1987). La diferencia en los tamaños de los sedimentos entre la capa superficial y las subyacentes depende en buena medida del régimen de caudales y del aporte de sedimentos aguas arriba del sector en estudio (Bunte y Abt, 2001).

Debido a lo antes mencionado, se requirió conocer la predominancia del tipo de material de lecho a nivel superficial o sub superficial. Para conocer la granulometría del material de lecho de los ríos (estación El Tigre y La Coja) y encontrar una mejor distribución de su composición en la capa superficial o sub superficial, se realizó una granulometría separada de cada capa. Se utilizó el método fotográfico para la capa superficial con ayuda de una

criba de 50 x 50 cm, luego se retiró la capa superficial para la toma de muestra sub superficial (PMC, 2002).

Para el muestreo superficial y sub superficial primero se estableció un margen de 100 metros aguas arriba y aguas debajo de la estación de aforo, luego se ubicó zonas con diferente material de lecho superficial. A partir de ello se determinó el número de muestras.

#### **a. Método superficial (Método fotográfico)**

Se realiza en el lecho del río con presencia de gravas o acorazados ya que la manipulación de las muestras tiene un alto grado de dificultad.

Para el análisis se utilizó una criba de 1 m x 1m confeccionado de tubos de agua. La criba fue colocada en el punto de muestreo y luego se tomó una foto verticalmente al material de lecho superficial atrapado dentro de la criba. En gabinete estas fotografías fueron trabajadas en el programa AutoCAD 2012. A continuación se describe la metodología empleada:

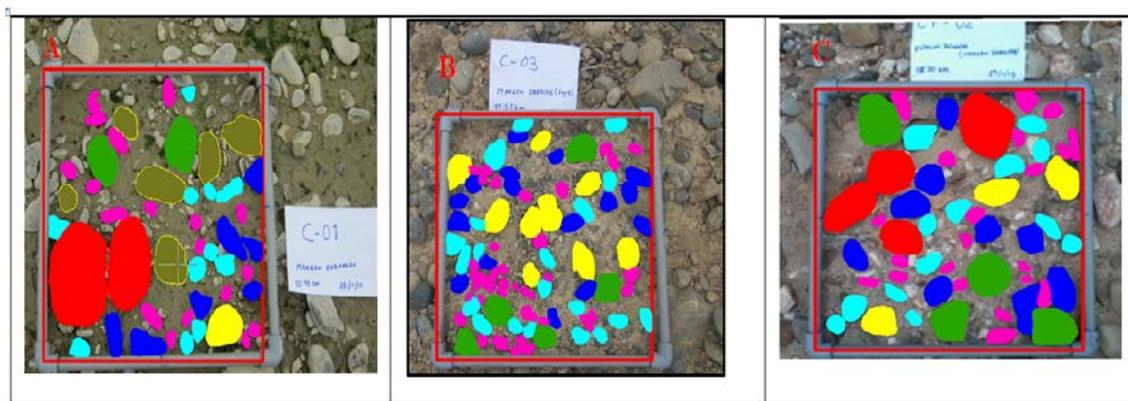
- Se definieron los siguientes rangos de tamaños de grano: mayores a 7cm, 5-6 cm, 4-5 cm, 3-4 cm, 2-3 cm, 1-2 cm y menores a 1 cm.
- Se aproximó la forma de las piedras observadas en la fotografía, convenientemente ampliada a la forma de un elipsoide o una esfera según el caso y se determinó la longitud del eje medio. Con este valor se ubicó cada grano en uno de los rangos definidos en el punto anterior.
- Se determinaron las áreas de las gravas y piedras y se sumaron todas las correspondientes a un mismo rango de tamaños.
- Se encontró el porcentaje del área total ocupado por cada rango de tamaños, la fracción de tamaños menores de 1 cm se asumió como la diferencia.

En la estación El Tigre se definieron cuatro puntos de muestreo de material de lecho, debido a la variabilidad del material superficial en las dos márgenes de la sección. Se apreció mayor presencia de gravas expuestas en la margen izquierda del río y mayor presencia de grandes depósitos de arena fina en la margen derecha. Cabe indicar que la estación de aforo está ubicada aguas debajo de un tramo del río con efecto de curvatura. Se ha comprobado que aguas abajo una curva hacia la derecha causa un movimiento espiral en sentido contrario a las agujas del reloj y si a la curva le sigue una tangente larga,

el flujo espiral persistirá (Gonzales, 2004). Por lo cual, las partículas más grandes se sedimentan en la parte externa de la curva, formándose bancos de arena fina en la parte interna. En el Anexo 2 (Fig.56 y Fig.57) se aprecia las cuatro zonas establecidas para el muestreo granulométrico.

En la estación La Coja se definieron dos zonas de muestreo, debido a una distribución uniforme de material superficial en la sección. La granulometría de los materiales gruesos superficiales se determinó de acuerdo al método fotogramétrico, que relaciona el área total ocupada por un material de un tamaño preestablecido al área total del muestreo.

Se seleccionaron las muestras cuyo material superficial estén conformados por gravas en su mayoría, obteniendo solo 2 muestras con presencia de gravas en el río Puyango - Tumbes y una muestra para el río Zarumilla, las cuales se aprecian en la Fig.45 (muestra C-01, margen izquierda del río Tumbes (A), muestra C-03, margen derecha del río Tumbes (B), muestra CP-02, margen izquierda río Zarumilla (C)).



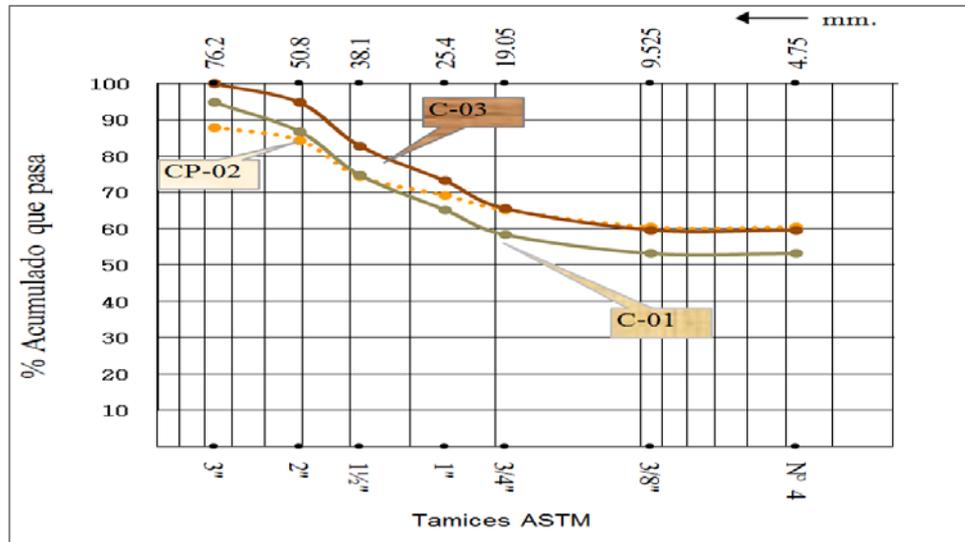
**Figura 45: Análisis fotográfico de muestras superficiales en las estaciones El Tigre y La Coja.**

De acuerdo al análisis granulométrico (Cuadro 9) realizado de las muestras superficiales, existe una mayor predominancia de arenas a finos en ambos ríos, con una mejor distribución homogénea del material en la muestra C-03

**Cuadro 9: Resumen datos obtenidos mediante análisis fotográfico**

Muestra	Río	<70	60-50	50-40	40-30	30-20	20-10	>10
C-01	Tumbes	12.00%	3.60%	10.00%	5.20%	4.00%	4.80%	60.40%
C-03	Tumbes	0.00%	5.20%	12.00%	9.60%	7.60%	5.92%	59.68%
CP-02	Zarumilla	5.20%	8.00%	12.00%	9.60%	6.80%	5.20%	53.20%

En la Fig.46 se muestra que la muestra C-01 y C-03 (río Puyango-Tumbes) muestran una distribución similar de grava fina. La muestra CP-02 (río Zarumilla), posee una distribución uniforme de grava gruesa a fina.



**Figura 46: Granulometría de muestras superficiales en las estaciones El Tigre y La Coja.**

#### **b. Método sub superficial (tamizado)**

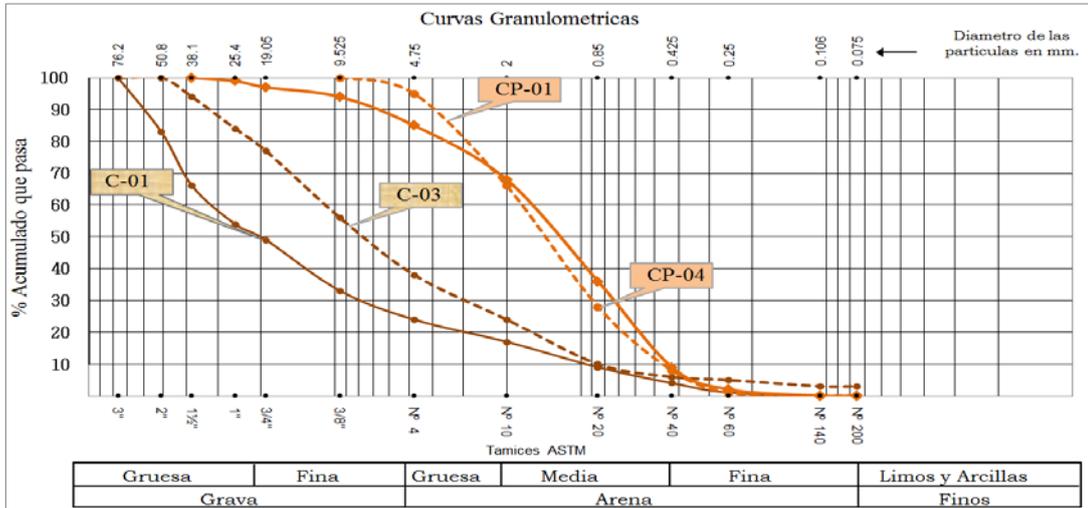
El protocolo de muestreo de material sub superficial se detalla a continuación:

- Se realizaron calicatas de aproximadamente 1x1 metro en superficie, alcanzado una profundidad máxima de un metro, quedando sujeta la profundidad de excavación a la naturaleza del terreno (principalmente a la presencia del nivel freático).
- La excavación se realizó por capas, removiendo en primer lugar el material superficial, para después proceder con la excavación en capas de 10 a 15 cm de espesor.
- Se recolectaron las muestras de aproximadamente 2kg, en bolsas herméticas, para luego ser analizadas por tamizado.

Las calicatas ejecutadas en la estación el Tigre del río Puyango-Tumbes se diferencian en su capa superficial. Esto se debe al acorazamiento de pequeñas gravas a la margen izquierda del río. Por el contrario, en su margen derecha se aprecia gran cantidad de depósitos de bancos de arenas. El río Zarumilla superficialmente presenta gran cantidad de arenas finas y un porcentaje mayor de gravas en su margen izquierda

El análisis de las muestras por tamizado se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UNALM. En la Fig.47 se muestran las curvas granulométricas obtenidas a

partir de la muestras sub superficiales (las muestras C-01 y C-03 corresponden a la estación El Tigre y las muestras CP-01 y CP-04 a la estación La Coja. Las líneas continuán representa a las muestra ubicada a la margen derecha del río y las líneas punteadas representan a las muestras ubicadas a la margen izquierda del río).



**Figura 47: Granulometría sub superficial del lecho del río en las estaciones El Tigre y La Coja.**

De acuerdo al análisis granulométrico en la estación El Tigre, se aprecia la presencia de depósitos fluviales y las acumulaciones fluviales están constituidas por gravas arenosas y arenas gravosas con inclusiones de canto rodado en su composición.

En la estación La Coja sin embargo se apreció depósitos granulares constituidos por arenas y gravas con nulo contenido de canto rodados en su composición. El porcentaje de gravas es inferior al 20 por ciento y de constitución fina.

A partir de las curvas granulométricas se determinó los diferentes diámetros representativos de las partículas para ambas zonas estudiadas.

$$d_m = \frac{\sum di * \Delta pi}{100} \tag{3.1}$$

Dónde:

- $\Delta pi$  : Valor en porcentaje de cada intervalo en que se divide la curva granulométrica puede ser variable o constante.
- $di$  : Diámetro medio correspondiente a cada intervalo en que se dividió la curva granulométrica.

En el Cuadro 10 y Cuadro 11 se muestran los diferentes diámetros de partículas requeridos para el cálculo de ecuaciones empíricas de sedimento de fondo para la estación El Tigre y La Coja respectivamente.

**Cuadro 10: Diámetros representativos de las partículas en la estación El Tigre**

<b>Diámetro característico</b>	<b>C-01(mm)</b>	<b>C-01(m)</b>	<b>C-03 (mm)</b>	<b>C-03 (m)</b>	<b>Promedio (mm)</b>	<b>Promedio (m)</b>
D90	60.03	0.060	32.40	0.0324	46.21	0.0462
D84	52.03	0.052	25.40	0.0254	38.71	0.0387
D65	36.83	0.037	12.82	0.0128	24.83	0.0248
D50	20.18	0.020	7.55	0.0076	13.87	0.0139
D40	12.90	0.013	5.13	0.0051	9.02	0.0090
D35	10.39	0.010	3.95	0.0039	7.17	0.0072
D16	1.80	0.002	2.89	0.0029	2.34	0.0023
Dm	26.60	0.027	12.39	0.0124	19.49	0.0195

**Cuadro 11: Diámetros representativos de las partículas en la estación La Coja**

<b>Diámetro característico</b>	<b>CP-01(mm)</b>	<b>CP-01(m)</b>	<b>CPA-04 (mm)</b>	<b>CPA-04 (m)</b>	<b>Promedio (mm)</b>	<b>Promedio (m)</b>
D90	4.09	0.004	6.99	0.0070	5.54	0.0055
D84	3.42	0.003	4.51	0.0045	3.97	0.0040
D65	1.96	0.002	1.85	0.0018	1.90	0.0019
D50	1.39	0.00139	1.24	0.0012	1.32	0.0013
D40	1.11	0.001	0.95	0.0009	1.03	0.0010
D35	1.00	0.001	0.83	0.0008	0.91	0.0009
D16	0.56	0.001	0.51	0.0005	0.53	0.0005
Dm	2.03	0.002	3.06	0.0031	2.55	0.0025

Otros parámetros de forma como la viscosidad del agua, gravedad y peso específico del agua fueron determinados, a partir de tablas. Además se determinó el peso específico del suelo a partir de la misma muestra de lecho de fondo. En el Cuadro 12 y Cuadro 13 se muestran los parámetros obtenidos para cada estación de estudio respectivamente.

**Cuadro 12: Parámetros de forma de la estación El Tigre**

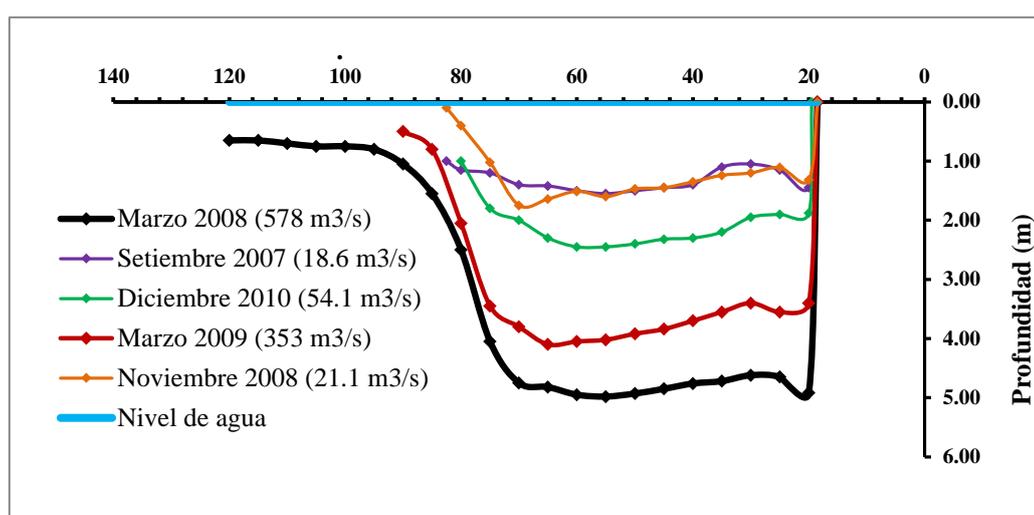
Viscosidad (m <sup>2</sup> /s)	Gravedad (m <sup>2</sup> /s)	PSA (Kgf/m <sup>3</sup> )	PSS (Kgf/m <sup>3</sup> )
0.000000893	9.81	1000	2689

**Cuadro 13: Parámetros de forma de la estación La Coja**

Viscosidad (m <sup>2</sup> /s)	Gravedad (m <sup>2</sup> /s)	PSA (Kgf/m <sup>3</sup> )	PSS (Kgf/m <sup>3</sup> )
0.000000893	9.81	1000	2683

### c. Parámetros hidráulicos

Con la finalidad de realizar una mejor estimación del gasto sólido de fondo mediante el uso de ecuaciones empíricas, se definió cinco perfiles en la estación El Tigre, para diferentes caudales entre los años 2007 y 2010. Se contó con aforos de la estación El Tigre por el SENAMHI. En la Fig.48 se muestran los perfiles para cada caudal (En el eje x se aprecia la profundidad máxima alcanzada al momento de realizar el aforo con molinete, respecto a un nivel de agua. Para caudales mayores a 400 m<sup>3</sup>/s la sección tiende a extenderse hacia la margen izquierda del río). Se aprecia que el cauce o el lecho del río no cambió significativamente en los últimos años. Cabe indicar que el cálculo se realizó por cada vertical distanciada cada cinco metros a partir del inicio de la sección de aforo. Estimando así un gasto sólido de fondo por cada vertical los cuales finalmente fueron sumados para obtener un gasto sólido para cada caudal.



**Figura 48: Perfiles de aforo de caudales de la sección El Tigre.**

A partir de estas secciones hidráulicas se determinó los demás parámetros hidráulicos requeridos en las ecuaciones empíricas de gasto sólido. En el Cuadro 14 se muestra los parámetros hidráulicos determinados.

**Cuadro 14: Parámetros hidráulicos en la estación El Tigre**

<b>Cota (cm)</b>	<b>Caudal Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Perímetro P (m)</b>	<b>Radio Hidráulico R (m)</b>	<b>Velocidad V (m<sup>2</sup>/s)</b>
350	578.73	1591.5	236.4	7	2.50
272	353.36	1155.7	167.2	7	2.06
131	54.08	634.4	136.3	5	0.54
97	21.15	376.4	129.2	3	0.34
91	18.34	462.0	152.8	3	0.27

En la estación La Coja se contó con un perfil hidraulico; sin embargo, se realizó un levantamiento topográfico de la sección de aforo (Fig.37). A partir del perfil topográfico y los caudales registrados en el periodo de monitoreo se determinó los parámetros hidráulicos de la sección. En el Cuadro 15 se muestra los parámetros obtenidos.

**Cuadro 15: Parámetros hidráulicos en la estación La Coja**

<b>Cota (cm)</b>	<b>Caudal Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Perímetro P (m)</b>	<b>Radio Hidráulico R (m)</b>	<b>Velocidad V (m<sup>2</sup>/s)</b>
100	60.00	46.8	50.9	0.9	1.28
50	9.26	11.9	36.2	0.33	0.78
25	2.65	5.9	21.6	0.27	0.45

Otros parámetros hidráulicos que se determinaron fueron la pendiente media del cauce (S) y el Coeficiente de rugosidad (n). La pendiente media para la parte baja de la cuenca Puyango Tumbes es de 0.002 (Lazarte, 2012) y (PEBPT, 2001). Para la cuenca Zarumilla es de 0.001 (ANA, 2012). Por otro lado el coeficiente de rugosidad o de manning fue determinado a partir de dos métodos: la Ec.2.41 de Manning, 1988 y por tablas (Coronado, 1992), ver Cuadro 2 y Cuadro 3.

$$n = \frac{d^{2/3} * S^{1/2}}{U} \quad 3.2$$

Dónde:

n : Coeficiente de manning  
d : Profundidad del flujo en metros  
S : Pendiente de la perdida de carga  
U : Velocidad media de la corriente, en m/s.

La profundidad del flujo y la velocidad media de la corriente fueron asignadas en función de un perfil batimétrico promedio Fig.48.

**Cuadro 16: Coeficiente de Manning (Ecuación de Manning)**

Parámetro	El Tigre	La Coja
d	4.98	0.82
S	0.002	0.001
U	2.5	0.84
<b>n</b>	<b>0.034</b>	<b>0.031</b>

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO DE SEDIMENTOS DE FONDO**

En diciembre 2013, se inició el monitoreo del transporte de sedimentos de fondo en las estaciones El Tigre (Puyango-Tumbes) y La Coja (Zarumilla). Cuantificar el gasto sólido de fondo resultó una tarea difícil y compleja. Para el caso del Perú no existen trabajos al respecto. Se realizó un análisis local de las áreas en estudio (pendiente, cobertura vegetal, granulometría, hidrología, transporte de sedimentos). Esto permitió entender la relación de los sedimentos de fondo con los sedimentos en suspensión así como la relación de los caudales líquidos con los caudales sólidos. A partir de este estudio ha sido posible definir una estrategia de muestreo la cual, mediante la combinación de un equipo (Helley-Smith) y el uso del ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) se ha logrado obtener una serie de datos observados confiables. A continuación se detalla la estrategia de muestreo en campo seguida, dicho punto ha sido desarrollado más extensamente en el ítem 3.2.

- a. Caracterización del ciclo hidrológico anual estacional de caudales líquidos. Se deberá ubicar todas las estaciones hidrométricas existentes y analizar las condiciones de cada una de ellas como accesos, años de registro histórico de caudales líquidos y condiciones bajo la cual se realiza los aforos líquidos (puente oroya, botes etc.).
- b. A partir del ítem anterior se seleccionara la ubicación de la estación hidrosedimentológica. Es preferible que este ubicado en una estación hidrométrica existente con amplio registro de caudales.
- c. Ubicada la estación hidrosedimentológica se debe caracterizar la granulometría de la zona de estudio (lecho superficial y subsuperficial) para caracterizar el tipo de material de arrastre y de fondo del lecho el río.
- d. A partir del análisis granulométrico se definirá que tipo de abertura de boquilla debe tener el muestreador de fondo Helley-Smith (76 mm o 154 mm)
- e. Se deberá conocer el perfil batimétrico de la sección de aforo. Para una mayor precisión se recomienda el uso un ADCP (tecnología Doppler) el cual permita obtener un perfil de profundidades y una gradiente de velocidades, a partir de la cual se definirá la cantidad

y ubicación del equipo de muestreo de fondo (Helley-Smith). El perfil de velocidad obtenido permitirá caracterizar el movimiento de sedimento de fondo dándole mayor precisión a la cuantificación del gasto sólido de fondo.

- f. A partir del ítem anterior se realizarán pruebas de mediciones con el equipo muestreador. Se obtendrá un tiempo óptimo de muestreo con el Helley-Smith, en el cual la malla encargada de capturar los sedimentos de fondo no deberá capturar una cantidad de muestra cuyo volumen sobrepase las tres cuartas partes de su capacidad de almacenamiento. Para la cuenca Puyango-Tumbes se ha definido un tiempo de muestreo óptimo de diez minutos para caudales menores a  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- g. Se deberá realizar una adecuada capacitación a la persona encargada de realizar el muestreo (Observador) y a su vez supervisar ocasionalmente el uso del equipo, debido al escaso conocimiento de esta técnica en el Perú.
- h. Las campañas de monitoreo de sedimentos de fondo se realizarán durante el periodo húmedo de acuerdo al ciclo hidrológico de la cuenca estudiada. El intervalo de toma de muestras dependerá del tipo de resultado que se quiera obtener (caracterización anual, mensual o diaria).
- i. Las muestras obtenidas serán guardadas en bolsas herméticas que aseguren su conservación, dichas muestras deberán ser adecuadamente etiquetadas (nombre de estación, fecha, cota o caudal registrado).
- j. El análisis y procesamiento en laboratorio y posterior cálculo para cuantificar el gasto sólido de fondo a partir las muestras obtenidas se detallan en el punto 3.2.3.

Para la presente tesis se seleccionó el equipo muestreador Helley - Smith, debido a los buenos resultados obtenidos en otros ríos de montaña como el río Santa Isabel y Málaga de Bolivia o con similares características hidráulicas como el río Tordera de España entre otros. Sin embargo, considerando que en los ríos Puyango-Tumbes y Zarumilla se presentan picos de caudales durante eventos extraordinarios (El Niño) que pueden alcanzar los  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  a más (Morera,2014) y dada las condiciones de las estaciones El Tigre (dificultad de realizar el aforo desde un puente tipo oroya) y La Coja (no existencia de ningún tipo de puente). Las grandes cantidades de palizadas que el río arrastra durante ese periodo desestabilizaría la posición del equipo y este podría ser arrastrado, incluso se pondría en riesgo la integridad del observador durante la manipulación del equipo.

## 4.2 DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN Y DE FONDO

### a. Modelo hidrosedimentológico entre caudales líquidos y sólidos

Se ha obtenido una serie de datos confiables diarios de caudales sólidos. A partir del cual se generó un modelo de correlación potencial simple entre caudales líquidos y sólidos.

En la Fig.49 se muestra la correlación potencial log-log entre los registros históricos del caudal sólido instantáneo de fondo (marrón) y suspensión (naranja 2004-2013 y azul 2014) en  $t.d^{-1}$  con caudales líquidos instantáneos en  $m^3.s^{-1}$  para la cuenca Puyango-Tumbes (El Tigre). Las líneas continuas representan el intervalo de confianza al 5 y 95 percentil.

Existe una clara relación potencial entre los caudales líquidos y las descargas de sedimentos de fondo y en suspensión. Si se compara ambos tipos de transporte para un mismo caudal instantáneo la magnitud del gasto sólido en suspensión es 12 veces la magnitud del gasto sólido de fondo. La tendencia potencial del gasto sólido de fondo disminuye respecto al gasto sólido en suspensión. Este proceso podría estar relacionado a la gran disponibilidad de limos y arcillas a lo largo del lecho del río que se van depositando, producto principalmente de la erosión la cual es constante en cuencas de montaña y cuyo transporte se hace más sencillo debido al tamaño de las partículas.

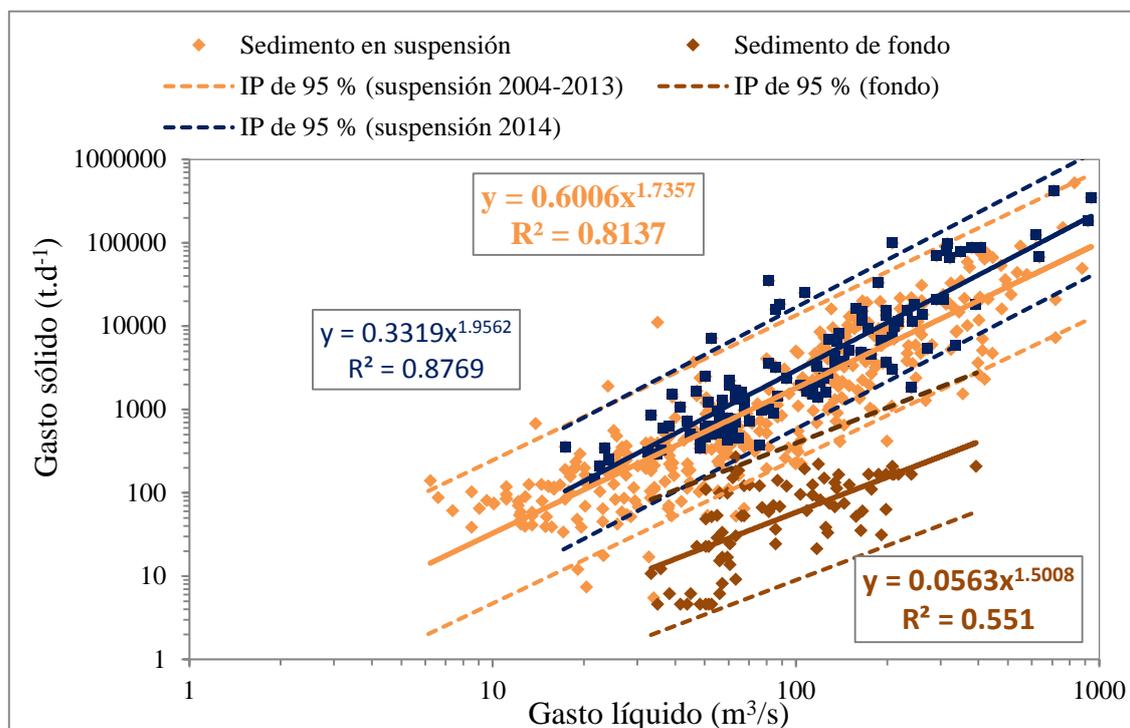
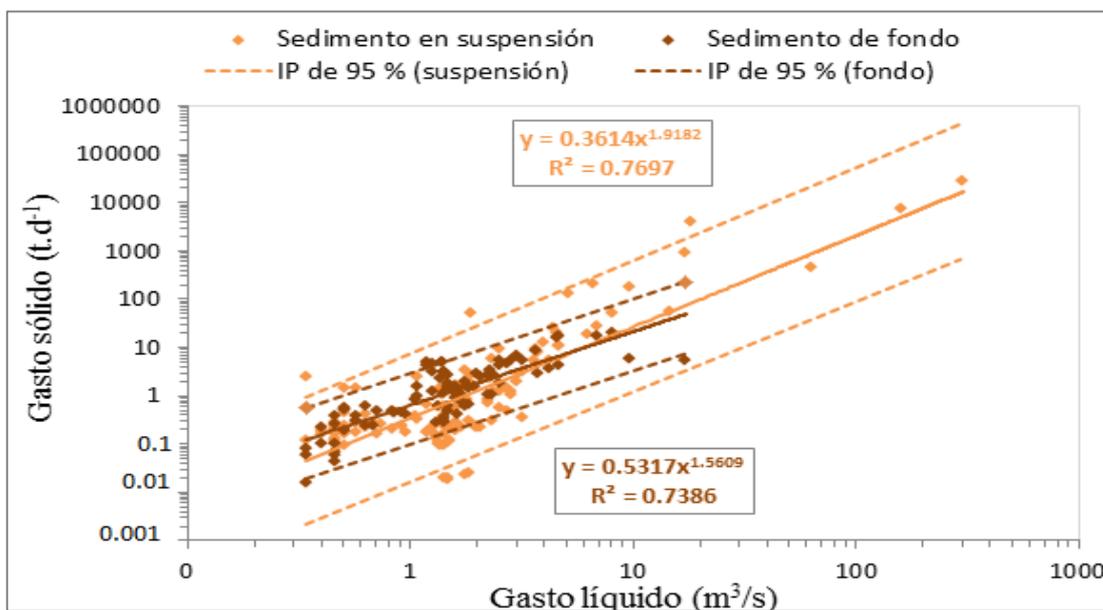


Figura 49: Relación de gasto sólido en función del gasto líquido-río Puyango-Tumbes.

En la Fig.50 se muestra la correlación potencial log-log entre los registros histórico del caudal sólido instantáneo de fondo (marrón) y suspensión (naranja) en  $t.d^{-1}$  con caudales líquidos instantáneos en  $m^3.s^{-1}$  para la cuenca Zarumilla. Las líneas continuas representan el intervalo de confianza al 5 y 95 percentil. La magnitud de la línea de descarga de sedimentos en suspensión es menor que la línea de descarga de sedimento de fondo para un rango de caudales menor a  $20 m^3/s$ .

Se tiene un registro de datos observados instantáneos de sedimento en suspensión hasta los  $400 m^3/s$  de caudal líquido y de datos observados de sedimento de fondo hasta los  $20 m^3/s$  de caudal líquido. Para esta cuenca la magnitud del gasto sólido de fondo es 0.6 veces la magnitud del gasto sólido en suspensión. Sin embargo, la tendencia potencial del gasto sólido de fondo disminuye respecto al gasto sólido en suspensión.

De lo antes mencionado se debe considerar el bajo rango de caudales registrados durante el monitoreo de sedimentos de fondo lo cual todavía genera incertidumbre de datos observados. Sin embargo, desde ya se aprecia el aporte importante del transporte de sedimentos en la cuenca Zarumilla.



**Figura 50: Relación del gasto sólido en función del gasto líquido-río Zarumilla.**

### **b. Dinámica del transporte de sedimentos en las cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla**

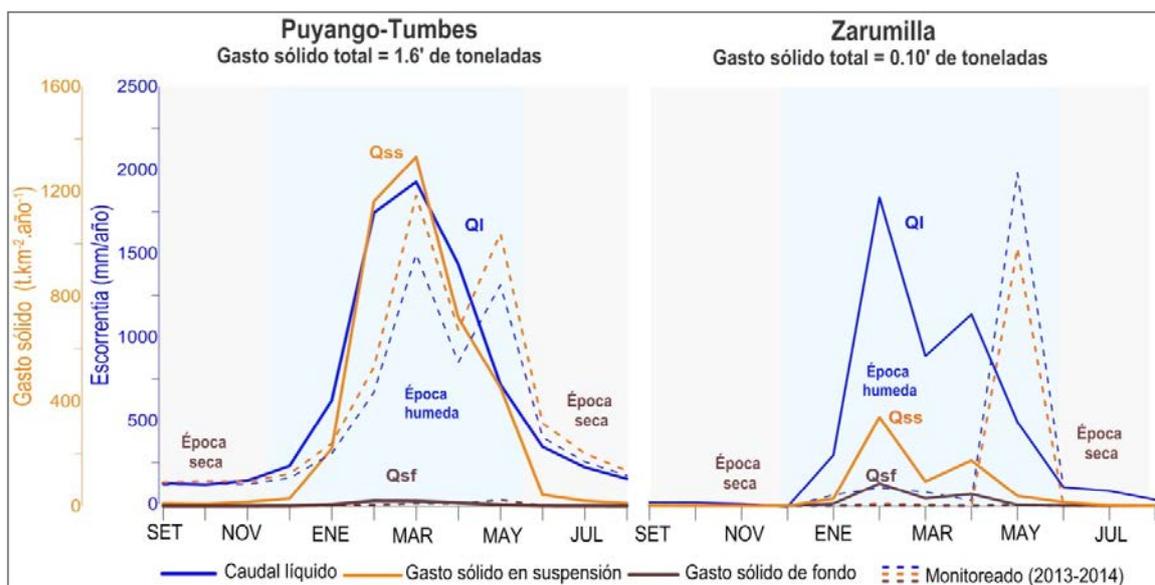
En la Fig. 51 se compara la dinámica del transporte de sedimentos para ambas cuencas. El eje X representa el espacio temporal, el eje Y (azul) representa la escorrentía, el eje Y

(naranja) representa el gasto sólido en suspensión y de fondo en  $t.km^{-2}.año^{-1}$ . Las líneas continuas representan los caudales históricos y las líneas punteadas corresponden al ciclo hidrológico monitoreado (2013-2014). Los mayores picos del gasto sólido total (suspensión y fondo) en ambas cuencas se dan durante los meses de febrero, marzo y abril.

Para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre, se obtuvo un  $Q_{st}$  promedio histórico igual a  $340 t.km^{-2}.año^{-1}$ , 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). Para la cuenca Zarumilla en la estación La Coja, se obtuvo un  $Q_{st}$  promedio histórico equivalente a  $136 t.km^{-2}.año^{-1}$ , de los cuales el 99 por ciento se transporta en época de lluvias y el 1 por ciento en transición (Morera,2014).

Como resumen de lo antes dicho se observa que el transporte de sedimentos en ambas cuencas es predominada por los sedimentos en suspensión con un mayor aporte de sedimento de fondo en la cuenca Zarumilla. La diferencia entre la dinámica del sedimento de fondo y en suspensión se ve altamente influenciada por la granulometría del material de arrastre y del material del lecho del río a su vez por las características hidráulicas de cada cuenca principalmente por la velocidad del flujo líquido.

Durante el periodo de monitoreo (2013-2014) en la cuenca Puyango-Tumbes se transportó  $530 t.km^{-2}.año^{-1}$  de los cuales el 98 por ciento se transportó en suspensión y un 2 por ciento en fondo y en la cuenca Zarumilla se transportó  $158 t.km^{-2}.año^{-1}$  de los cuales el 80 por ciento se transportó en suspensión y un 20 por ciento en fondo.



**Figura 51: Dinámica del transporte de sedimentos en la cuenca del río Puyango-Tumbes y Zarumilla.**

Durante el ciclo hidrológico monitoreado (2013-2014), no se observaron caudales superiores al promedio histórico. Sin embargo, durante abril y mayo 2014 se presentaron grandes caudales, probablemente como consecuencia de la llegada de las ondas Kelvin hacia el Pacífico ecuatorial central (EFEN, 2014). Este evento modificó completamente el ciclo hidrológico, a pesar de ello el ciclo hidrológico 2013-2014 es considerado un año seco para la región norte del Perú. Por lo cual, nuestro análisis del transporte de fondo tiene un mayor sesgo respecto del transporte en suspensión, del cual se tiene registros monitoreados desde el año 2004.

El gasto sólido total en la zona norte del Perú es entre tres y diez veces menos que la producción en los Andes de América del Sur. El gasto sólido total en la cuenca Puyango-Tumbes a la altura de la estación El Tigre es 1.6 millones de toneladas anuales equivalentes a  $530 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  y en la cuenca Zarumilla a la altura de la estación La Coja es 0.1 millones de toneladas anuales equivalentes a  $158 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ . El río Napo en los Andes del Ecuador registra un gasto sólido total promedio de  $900 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  (Laraque et al., 2004), el río andino Carare de Colombia registra un gasto sólido total promedio de  $2200 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  (Restrepo et al., 2006) y en los orientales de Bolivia un promedio de  $3200 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  (Guyot et al., 1996). El mayor porcentaje del transporte de sedimentos se da durante la época húmeda (más del 90 por ciento).

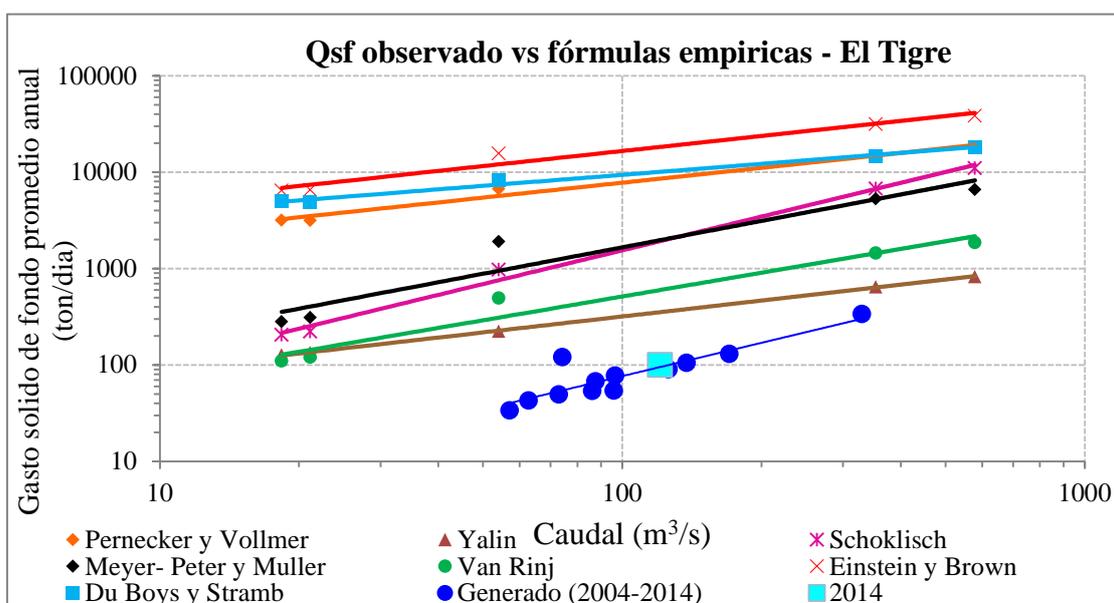
Debido a que los estudios de transporte de sedimento de fondo son casi nulos en el Perú se ha comparado esto con lo estimado en el río Ebro de España. Las tasas de transporte de sedimento de fondo en la cuenca Puyango-Tumbes (estación El Tigre) es 0.032 millones de toneladas anuales equivalentes a  $10.6 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  y en la cuenca Zarumilla (estación La Coja) es 0.025 millones de toneladas anuales equivalentes a  $31.6 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ . Siendo de dos a ocho veces más respectivamente lo estimado en el río Ebro de España el cual registra un promedio anual de  $4.7 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  durante los años 1950 y 1975 antes de la construcción de presas, posterior a ello se han registrado un promedio de  $1.7 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  (Vericat, 2006). Por lo cual, se resalta el aporte considerable de sedimentos de fondo en las zonas estudiadas.

### 4.3 COMPARACIÓN GASTO SÓLIDO DE FONDO OBSERVADOS Y ESTIMADOS A PARTIR DE LAS FÓRMULAS EMPÍRICAS

De acuerdo a los parámetros hidráulicos (caudal, pendiente, velocidades, radio hidráulico) y parámetros de forma (granulometría, viscosidad, peso específico, coeficiente de rugosidad) en la sección de las estaciones El Tigre (Puyango-Tumbes) y La Coja (Zarumilla) se estimó el gasto sólido de fondo (Qsf) a partir de las ecuaciones empíricas de: Yalin, Meyer-Peter y Muller, Schoklish, Van Rinj, Einstein y Brown, Du Boys, Pernecker y Vollmer. Estos resultados fueron comparados con los obtenidos mediante monitoreos (Fig.52 y Fig.54).

#### a) Estación El Tigre (Puyango-Tumbes)

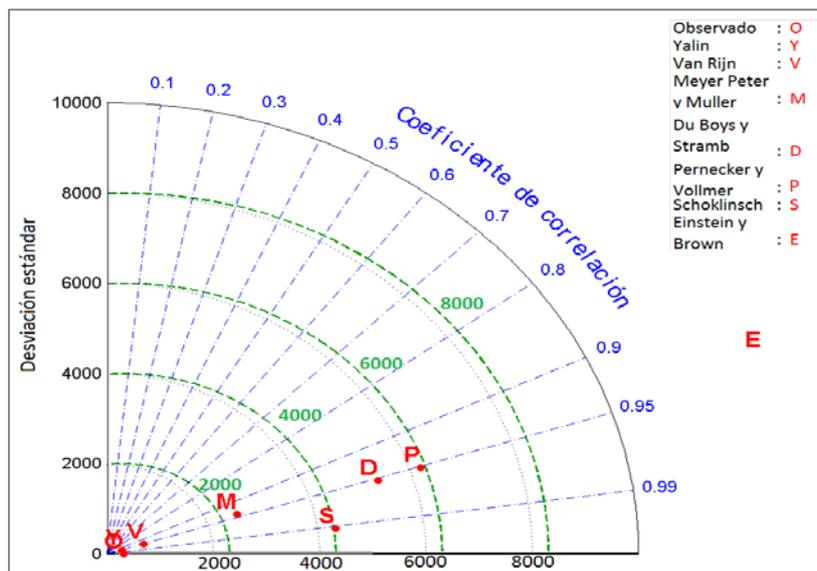
En la Fig.52 se muestra el gasto sólido de fondo promedio anual (t/d) observado y estimado. Se ha proyectado la tendencia potencial a partir de los registros observados. Sin embargo, este se limita a un rango bajo de caudales monitoreados diarios menores 580 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado todas las fórmulas sobreestiman el gasto sólido de fondo observado para un rango de caudales observados. La estimación mediante fórmulas aparece como líneas continuas. El promedio anual de gasto sólido de fondo resultó 99.5 toneladas diarias para un caudal promedio anual de 109 m<sup>3</sup>/s (cuadrado celeste). Debido al alto rango de variabilidad de resultados se han ajustado los ejes a escala logarítmica.



**Figura 52: Comparación del gasto sólido de fondo anual en función del caudal líquido promedio anual mediante ecuaciones empíricas y datos observados-río Puyango-Tumbes.**

Se realizó un análisis estadístico representado por el diagrama de Taylor (Fig.53). El eje vertical izquierdo representa la desviación estándar. El eje de la semicircunferencia representa el coeficiente de correlación de lo estimado mediante fórmulas y lo observado. Los semicírculos de color verde representan el error medio cuadrático (RMS) de las formulas frente a los observados. La muestra está compuesta de cinco datos de Qsf observado (t/día) representado por la letra “O” frente a cinco datos estimados de Qsf por cada fórmula empírica. El rango de caudales utilizados va desde 18 a 580 m<sup>3</sup>/s. Las fórmulas de Van Rijn y Yalin son las que mejor se ajustan a los datos observados y la fórmula de Schoklisch y Einstein - Brown las que presentan mayor dispersión y error relativo.

La correlación de las fórmulas empíricas con lo observado varía entre 0.94 hasta 0.99. Sin embargo, la desviación estándar es alta con un rango de 300 a 6000 t/d excluyendo a las fórmulas de Einstein y Brown quien supera los 10000 t/d. La fórmula de Yalin resultó la que mejor ajuste tiene con los valores observados. Sin embargo este resultado se limita a un periodo de monitoreo 2013-2014.



**Figura 53: Diagrama de Taylor -río Puyango-Tumbes.**

Cabe preguntarse en este punto el porqué de este bajo poder de predicción de las ecuaciones utilizadas. Las ecuaciones de Meyer Peter y Muller, Schoklisch, Einstein y Brown, Du Boys no incorpora el efecto de la viscosidad dinámica. Esta omisión puede afectar la predicción, en especial cuando existen valores significativos de lavado en los cauces. En la época húmeda el río Puyango-Tumbes acarrea mucho material. Al terminar

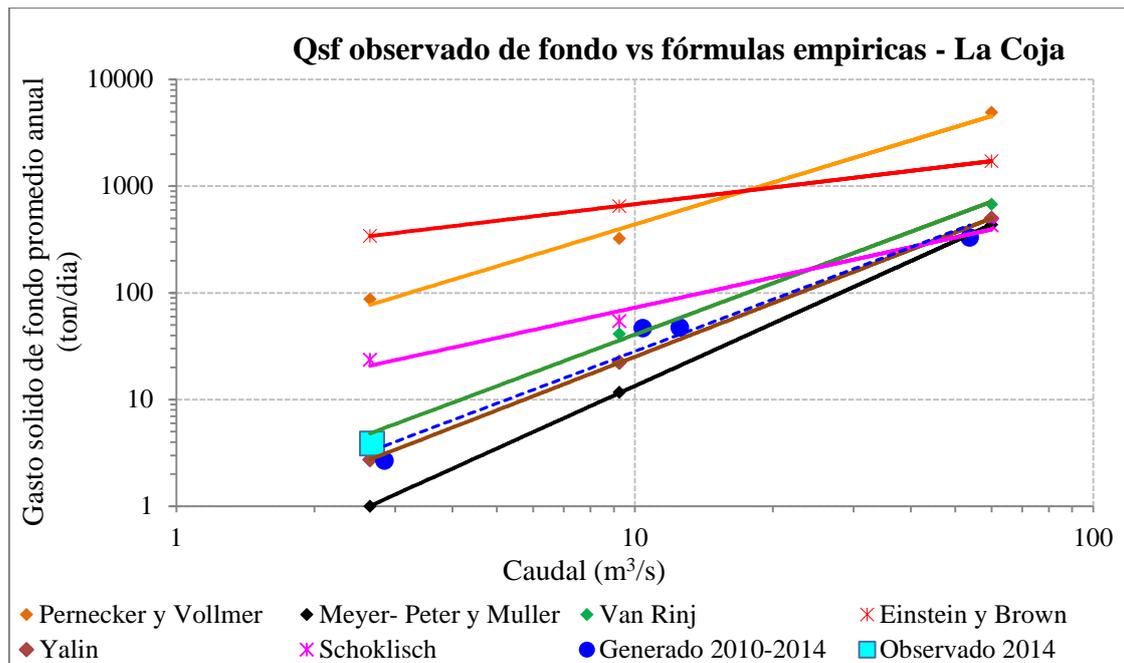
esta temporada empieza a perder capacidad de transporte. Otra consideración es que no todas las ecuaciones consideran la magnitud de la rugosidad del cauce a excepción de Meyer–Peter y Muller. Aguas arriba de la estación de monitoreo El Tigre se encuentran afloramiento de rocas intrusivas que son más resistentes a la erosión fluvial (Palacios, 1994) y de acuerdo al análisis granulométrico del lecho de fondo realizado antes del inicio de la época húmeda y posterior a ella (Fig.47) muestra un material de lecho compuesto por gravas con presencia de arenas, lo cual reduce el transporte de sedimento de fondo.

Otra consideración está relacionada con que todas las ecuaciones asumen una oferta ilimitada del transporte de sedimento. Sin embargo, cada río en particular posee diferente característica hidráulica, geomorfológica y sedimentológica. Otro factor no considerado está relacionado al comportamiento del lecho a la tensión de arrastre ejercida con el flujo ya que, cuando se presentan grandes crecidas cambian las condiciones del tamaño de partículas. Lo cual contrasta con la granulometría de lecho de fondo obtenida antes y después del periodo de monitoreo, en la cual se aprecia un ligero aumento del tamaño de partículas (Fig.47).

Considerando un período de monitoreo caracterizado por la ausencia de grandes crecidas (año seco) para la cuenca del río Puyango-Tumbes surge otra interrogante, ¿Cuál sería la característica de la tendencia del gasto sólido de fondo observado en función del caudal, bajo condiciones de grandes avenidas y/o eventos extremos? Posiblemente la tendencia de esta relación que se muestra en la Fig.53 se incrementa ya que a mayores caudales la capacidad de transporte también se incrementa.

#### **b) Estación La Coja (Zarumilla)**

En la Fig.54 se muestra el gasto sólido de fondo (t/d) en función del caudal líquido ( $m^3/s$ ). La estimación mediante fórmulas aparece como líneas continuas. El promedio anual de gasto sólido de fondo resultó 3.8 toneladas diarias para un caudal promedio anual de 2.7  $m^3/s$  (cuadrado celeste). Debido al alto rango de variabilidad de resultados se han ajustado los ejes a escala logarítmica. La magnitud de las fórmulas empíricas respecto a lo observado tiene un rango de 9 hasta 135 veces más lo observado. Las fórmulas empíricas para la cuenca Zarumilla se ajustan mejor a lo observado debido al tipo de granulometría a lo largo del lecho del río.

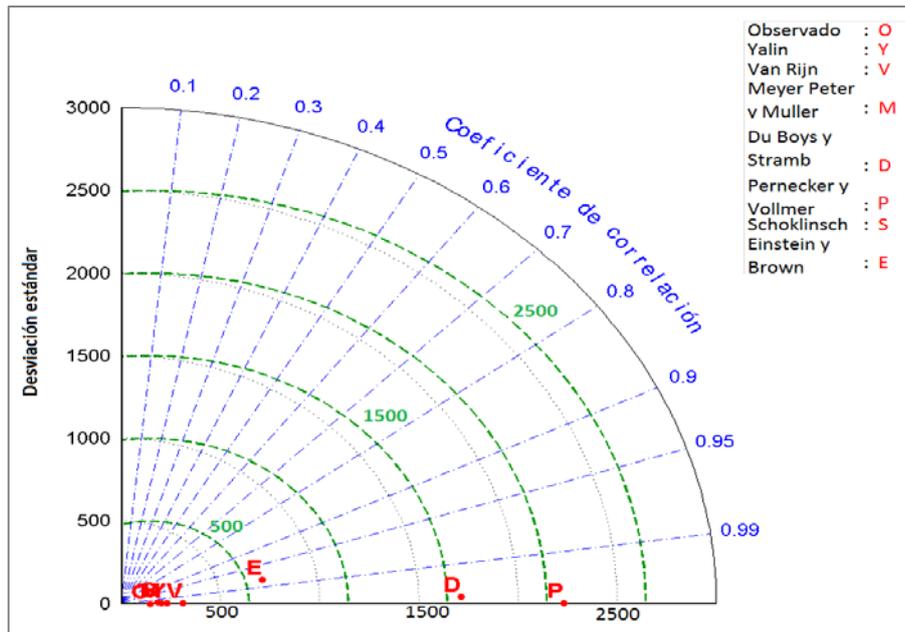


**Figura 54: Comparación gasto sólido de fondo en función del caudal líquido mediante ecuaciones empíricas y datos observados.**

Durante el periodo monitoreado los caudales fueron relativamente bajos sin embargo, se obtuvieron muestras significativas de sedimento de fondo. La magnitud de las ecuaciones empíricas respecto a lo observado varía entre menos 9 y 135 veces.

Se realizó un análisis estadístico representado por el diagrama de Taylor (Fig.55). El eje vertical izquierdo representa la desviación estándar. El eje de la semicircunferencia representa el coeficiente de correlación de lo estimado mediante fórmulas y lo observado. Los semicírculos de color verde representan el error medio cuadrático (RMS) de las formulas frente a los observados. La muestra está compuesta de tres datos de Qsf observado (t/día) representado por la letra “O” frente a tres datos estimados de Qsf por cada fórmula empírica.

La correlación de las fórmulas empíricas con lo observado varía entre 0.98 hasta 1. La desviación estándar de las fórmulas de Yalin, Schoklisch, Vanj Rijn y Meller-Peter y Muller varía en un rango de 184 a 300 t/d y las fórmulas de Einstein y Brown, Du Boys y Stramb y Pernecker y Vollmer tienen una desviación estándar entre 700 y 2000 t/d . El error relativo varía entre 84 y 165 para las fórmulas con mejor ajuste y 500 hasta 2000 para las fórmulas con menor ajuste.



**Figura 55: Diagrama de Taylor – río Zarumilla.**

A diferencia de la cuenca Puyango –Tumbes las fórmulas empíricas de Yalin, Schoklisch, Vanj Rinj y Meller-Peter y Muller tienen un menor rango de dispersión en la cuenca Zarumilla para el rango de caudales monitoreados. Este resultado contrasta favorablemente lo afirmado por diversos autores ya que, sugieren que las fórmulas del transporte de sedimento de fondo predicen razonablemente bien el gasto sólido de fondo en corrientes con fondo arenoso. Esto se debe principalmente a que la mayoría de las ecuaciones fueron desarrolladas a partir de experimentos realizados en canales experimentales y en algunos casos calibrados en ríos de bajas pendientes y material de lecho compuesto por arenas con nulo contenido de canto rodado en su composición.

## V. CONCLUSIONES

A partir de la caracterización del transporte del lecho fluvial de fondo mediante el uso del ADCP (Perfilador de corriente acústico Doppler) y el muestreador Helley Smith ha sido posible establecer una metodología de muestreo de sedimento de fondo el cual combina la selección del equipo muestreador, el monitoreo, la frecuencia de muestreo, así como el posterior procesamiento en laboratorio y cálculos en gabinete.

La dinámica del transporte de sedimentos en suspensión y de fondo en la cuenca Puyango-Tumbes (estación El Tigre) y Zarumilla (estación La Coja) está relacionada con su ubicación, geomorfología, uso de suelos, factores climáticos como la precipitación, escorrentía, eventos extraordinarios como El Niño y su influencia antrópica. Siendo predominado por los sedimentos en suspensión.

Para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre, se obtuvo un gasto sólido total promedio histórico ( $Q_{st}$ ) igual a 1.6 millones de toneladas anuales, de los cuales el 98 % se transporta en suspensión (1.57 millones de toneladas anuales) y un 2% en fondo (0.032 millones de toneladas anuales).

Para la cuenca Zarumilla en la estación La Coja, se obtuvo un gasto sólido total promedio histórico ( $Q_{st}$ ) igual a 0.1 millones de toneladas anuales de los cuales el 75 % se transportan en suspensión (0.075 millones de toneladas anuales) y un 25 % en fondo (0.025 millones de toneladas anuales).

Se aprecia un aporte importante de sedimento de fondo en la cuenca Zarumilla a la altura de la estación La Coja relacionado principalmente al tipo de composición granulométrica. En el caso de la estación el Tigre las acumulaciones fluviales están compuestas por gravas arenosas y arenas gravosas con inclusiones de canto rodado en su composición. Sin embargo, a la altura de la estación La Coja las acumulaciones granulares están compuestas principalmente por arenas gruesas, material uniforme con mayor predisposición a ser transportados.

La fórmula de Yalin es la que mejor ajuste tiene respecto a los datos observados de gasto sólido de fondo. Esto se debe a que la fórmula asume que el incremento de las tasas de

transporte es debido al movimiento promedio de las partículas, relacionado directamente a la velocidad del flujo líquido. Lo cual contrasta con lo observado durante el periodo de monitoreo. Además, las constantes empíricas de la fórmula se desarrollaron en canales de aforo, conteniendo diversos tamaños de partículas de sedimento (0.78 a 28.6 mm) similares al tipo de granulometría obtenida en ambas cuencas. Sin embargo, este resultado todavía posee gran incertidumbre durante ocurrencia de grandes avenidas y la influencia de eventos extremos como El Niño.

## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda mejorar la curva de calibración de caudales líquidos en ambas cuencas Puyango-Tumbes y Zarumilla mediante el uso de tecnologías acústicas. Lo cual permita realizar mediciones de caudales de manera instantánea o continua durante eventos de crecidas.

Previo a la modelación del transporte de sedimentos en la cuenca Puyango-Tumbes y Zarumilla; se recomienda continuar monitoreando los sedimentos de fondo en las estaciones El Tigre y La Coja durante caudales altos para ajustar los resultados obtenidos en esta tesis.

Se recomienda implementar la estación La Coja con equipos como limnómetros, levelómetros etc. Además de la instalación de una estructura como un puente tipo oroya para facilitar el monitoreo de sedimentos.

Se recomienda plantear políticas de gestión en el estudio sedimentológico el cual integre instituciones como universidades, gobiernos regionales, Autoridad Nacional del Agua, Autoridades Locales del Agua (ANA), 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 relacionadas al conocimiento, gestión y operación de los recursos hídricos, con la finalidad de impulsar el manejo y gestión de sedimentos desde los Andes hacia el Océano Pacífico. Con un especial énfasis en el monitoreo de sedimentos de fondo, debido a la alta variabilidad entre la dinámica de sedimentos de fondo y en suspensión en cuencas geográficamente cercanas tal como se ha demostrado en este estudio.

De acuerdo a las dificultades presentadas durante el monitoreo de sedimentos de fondo utilizando el muestreador Helley-Smith durante eventos de crecidas. Se recomienda evaluar el uso de otro tipo de muestreador directo como la trampa o muesca en lechos de río de composición granulométrica uniforme como arenas o equipos de medición indirecta de tipo acústico como el Hydrophone o Goephone en lechos de río acorazados.

Ante posible y futuras construcciones de obras de captación como presas o embalses en el cauce de los ríos Zarumilla o Tumbes. Se recomienda considerar las tasas de transporte de sedimento total estimadas en la presente tesis.

Se recomienda plantear un plan de control de erosión en los ríos Puyango-Tumbes y Zarumilla, mediante el uso y conservación de suelos, con la finalidad de reducir las tasas de erosión de los suelos por factores naturales (e.j.: geología, clima, relieve) y también por factores de origen antrópico (e.j.: deforestación y mal manejo).

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguirre, J. 1983. Hidráulica de sedimentos. Centro Interamericano del Desarrollo Integral de Aguas y Tierra. Venezuela. 269p.
- ANA, 2009. Medición de descarga líquida en grandes ríos. Autoridad Nacional del Agua. Brasil. Ministerio del Ambiente de Brasil. 129p.
- ANA, 2010. Monitoreo de las aguas subterráneas en el valle del río Zarumilla. Autoridad Nacional del Agua. 78p.
- ANA, 2012. Resultados del tercer monitoreo en las cuencas de los ríos Tumbes y Zarumilla lado peruano. Autoridad Nacional del Agua. 70p.
- Alonso, C.V. 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *ASA* 24(5):1211-1220.
- Armijos, H.; Grave, A.; Vauchel, P.; Frayzy, P.; Santini, W.; Moquet, J.; Goyut, J. 2013. Suspended Sediment dynamics in the Amazon River of Perú. *Journal of South America Earth Sciences*. 44:75-84.
- Avendaño, C. & Cobo, R. 1998. Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa. *CEDEX*. 113-120.
- Betancourt, A.; Narvaez, A.; & Roulet, M. 2005. Small-scale gold mining in the Puyango River Basin, South Ecuador. A study of environmental impacts and human exposures. *Eco health*. 2:32-232.
- Bathurst J.C. 1987. Measuring and modelling Bedload transport in channel Network *Hydrology*. New York. 69-98.
- Espinosa, M.; Osterkamp, W. & López, V. 2004. Transporte de sedimentos en corrientes naturales. Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimento de fondo. *Terra Latinoamericana*. 22: 377-386.
- Carvalho, N. 2010. Hidrosedimentológica práctica (2da edición). 635p.
- Coronado, F. 1992. Diseño y Construcción de Canales. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chanson, H.; Takeuchi, M. & Trevethan, M. 2007. High-Frequency suspended sediment flux measurements in a small estuary. *The university of Queensland*. 9-13.
- Chow. 2000. Hidrología aplicada. Primera edición. Copyright. 299p.
- Claude, N.; Rodríguez, S.; Bustillo, V.; Breheret, J.G. & Macarie, J.J. 2012. Estimating Bedload Transport in a large sand-gravel bed river from direct sampling, dune

- tracking and empirical formulas. *Geomorphology*. 47-57. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.07.030.
- Coello, X. 2006. Characterization of the Zarumilla transboundary aquifer between Peru and Ecuador. UNESCO-IHE.169p.
- CVC. 2010. Proyecto de modelación del río Cauca PMC-FASE III. Corporación autónoma regional del valle de Cauca. Colombia. 150p.
- DGAS. 1995. Gestión Integradas de los recursos hídricos en el Perú. Dirección general de aguas y suelo. Ministerio de Agricultura. 45p.
- EFEN. 2014. No se espera un evento de El Niño extraordinario en la costa peruana en los próximos meses. Comité multisectorial encargado del estudio nacional del fenómeno de El Niño. Comunicado Oficial N° 7-2014.
- Emmett, W.W. 1980. A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley Smith.U.S:Geol.Surv.44p.
- FAO.1994. Erosión de suelos en América Latina. Suelos y Aguas.19p.
- FAO. 2014. Medición sobre el terreno de la erosión y de la escorrentía. Disponible en línea en <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s07.htm>.
- García, C. & Echemendia, A. 1986. Esquema regional precisado para aprovechamiento hidráulico norte provincia de Camaguey. Investigaciones hidrográficas en Ing. Geología. Proyecto Hidráulico. Camaguey.27p.
- Garcia, C. & Sala, M. 1998. Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas. Comparación con las tasas reales de transporte obtenidas en el río Tordera. España.70 (7): 59-72.
- Garde, R.J. 1995. History of fluvial hydraulics. Oxford. 138p.
- Guns, M. & Vanacker, V. 2012. Forest cover change trajectories and their impact on landslide occurrence in the Tropical Andes. *Environmental Earth Sciences*. 70(7): 2941-2952. doi: 10.1007/s12665-013-2352-9.
- IAEA. 2009. Estudio de hidrología isotópica en America Latina. 262p.
- INGEMMET. 2006. Estudio Geo ambiental de la cuenca Puyango –Tumbes. Geodinámica e Ingeniería Geologica. Boletín N°32.
- Iroumé, A. 2003. Sediment transport in a mountainous catchment in the Andes of the Ninth Region of Chile. *Bosque*.24 (1):125-135.doi: 10.4067/S0717-92002003000100010.
- Jakuschoff, P. 1932.Movimiento de sólidos en suspensión. Teoría y Práctica. ingeniería Hidráulica. Universidad de Berlín.10 (1):24p.

- Jiménez, P. 2006. Estudio sobre la estabilidad de traviesas y lechos de escollera con transporte de sólidos. Tesis. Argentina.
- Knighton, A.L. 1998. Fluvial forms and processes. *Earth Surface Processes and Landforms*. 24 (4): 378-379. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199904)24:4<378.
- Kondolf, G.M. 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*. 21 (4): 533-551.
- Latosinski, F.G.; Szupiany, R.N.; Garcia, G.M.; Amsler, M.L. & Pujol, A. 2011. Estimación del transporte de sedimentos de fondo en un gran río con perfilador acústico doppler. 75p.
- Lavado, W., & Espinoza, J.C. 2014. Impact of El Niño and La Niña events on Rainfall in Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 29:171-178. doi: 10.1590/S0102-77862014000200003
- Lazarte, E.A. 2012. SIG de la cuenca del río Puyango-Tumbes para la gestión de los recursos hídricos. Tesis. Universidad de Piura.
- Lewis, W; Saunders, J.1989. Concentration and transport of dissolved and suspended in the Orinoco River. 203-240.
- Martin, J. 2002. ingeniería Fluvial. Argentina. UPC. 205p.
- Maza, J. 1996. Transporte de sedimentos. México. Instituto de ingeniería UNAM. 531p.
- Morera, S. B.; Mejia-Marcacuzco, A.; Guyot, J.L.; Gálvez, C.; Salinas, F.; Collas, M., & Ingol-Blanco, E. 2013. Uncertainty in Suspended Sediment Load Estimates for Mountain Rivers. Case of Study of Central Andes in Peru. Paper presented at the World Environmental and Water Resources Congress, Cincinnati, Ohio. 3216-3225. doi: 10.1061/9780784412947.318
- 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, D.S.; Wagner, C.R.; Rehmel, M.S.; Oberg, K.A. & Rainviller, F. 2013. Measuring discharge with acoustic doppler current profiler from a moving boat. *U.S. Geological Survey techniques and methods*. 3:1-95. doi:dx.doi.org/10.3133/tm3A22.
- Obando, O.F. & Ordoñez, J.J. 2007. Análisis hidrológico de la crecida extraordinaria del río Tumbes del 23 al 27 de febrero 2006. Brasil. 15p.
- Osio, M; Valencia, F; Cartaya, H. 2000. Calculo del coeficiente de rugosidad n manning en grandes ríos. Venezuela. Ingeniería UC. 12p.
- Ochoa, A.; Pineda, L.; Crespo, P. & Willems, P. 2014. Evaluations of TRMM 3B4 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the

pacific – Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18:3179-3193.

- OMM. 2011. Guía de prácticas hidrológicas. Organización Meteorología mundial. 324p.
- Palacios, O. 1994. Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada, Zorritos. Carta Geologica Nacional, Boletín N°54. 190p.
- PCI. 2002. Estudio de Pre factibilidad para obras hidrológicas en el río Puyango-Tumbes. Pacific Consultants International. 300p.
- PEBPT. 2002. Plan de Gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del proyecto especial binacional Puyango-Tumbes. 158p.
- PEBPT. 2012. Resultados del tercer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial en las cuencas de los ríos Zarumilla y Puyango-Tumbes. 200p.
- PHI-LAC. 2010. Programa hidrológico internacional de la UNESCO para America Latina y el Caribe. Uruguay. Boletín N°22. 144p.
- Phillips, J. M.; Webb, B. W.; Walling, D. E., & Leeks, G.J.L. 1999. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes*. 13(7): 1035-1050. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K.
- Poleto, C. & Maten, G.H. 1991. Urban Street Pullunts. *Revista de búsqueda en Geociencia*. Instituto de Geociencia. 35 (2):3-8.
- Restrepo, J. & Pierini, J. 2012. Measurement Measurement of suspended sediment concentration using optical and acoustic devices: application in tropical systems. *Latin American journal of aquatic research*. 40(1):153-168.
- Rijn, V. 1986. Manual de sediment transport measurement. Delt, The Netherarlands. Hydraulics Laboratory.
- Rocha, A. 1998. Introducción a la hidráulica fluvial. Universidad Nacional de ingeniería.
- Romero, M.; Claros, V.; & Maldonado, V. 2011. Evaluación del transporte de sedimentos en ríos de pendiente fuerte altamente acorazados. 85: 343-356.
- Ryan, S.E. & Porth, L.S. 1999. A field comparison of three pressure-difference Bedload samplers. *Geomorphology*. 307-322.
- Sandra, E.; Ryan, & Troendle, C.A. 1999. Measuring Bedload with Handheld Samplers in Course - Grained Mountain Channels. Stream Systems Technology Center.
- Schumm, S. A. 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *Paleontol*. 31:19-29.

- SENAMHI. 2007. Atlas hidrológico de las cuencas Zarumilla y Tumbes ubicadas en el departamento de tumbes. Disponible en [http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/paper\\_ATLASTUZA2.pdf](http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/paper_ATLASTUZA2.pdf).
- Silva, G. 2007. Ríos y Corrientes Naturales, Departamento Técnico-Cámara de Construcción de Quito-Ecuador.
- Simons, D.B., & Senturk, F. 1992. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. Water Resources Publications.
- Sotelo.2009. Hidráulica Fluvial.Fundamentos.561pp.
- Tarras-Wahlberg, H.; Caudwell, S.W., & Lane, N.S. 2005. El Niño Events, Rainfall Patterns and Floods in the Puyango River Basin, Southern Ecuador. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 21(2): 201-210. doi:10.1002/hyp.1297
- Tarras-Wahlberg, H.; Flachier, A.; Fredriksson, G.; Lane, S.; Lundberg, B., & Sanford, O. 2000. Environmental Impact of Small- Scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador. 29(8): 484-491. doi:10.1579/0044-7447-29.8.484.
- USGS. 2009. Measuring discharge with acoustic doppler current profilers from a moving boat. *Science for a changing world*.
- Vanoni,V. 2006. Sedimentation Engineering. USA: ASCE-American Society of Civil Engineers.
- Vauchel, P. 2010. Software para manejo y procesamiento de información hidrometeorológicas. Recuperado el 25 de Mayo de 2014, de <http://www.orehybam.org/>.
- Vericat, D., Church, M., & Batalla, R. J. 2006. Bed load bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley – Smith sampler in gravel bed river. *Water Resources Research*, 42. doi: 10.1029/2005WR004025
- Xiaoqing, Y. 2006. Manual on Sediment Management and Measurement. World Meteorological organization. 47.
- Zulkafli, Z., Wouter, B., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., & Guyot, J.-L. 2014. A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean–Amazon River Basins. *Hydrometeor*. 15:581–592. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>.

## ANEXO 1: CAMPAÑAS DE CAMPO Y ANALISIS DE MUESTRAS



**Figura 56. Material superficial expuesto en la sección de la estación El Tigre (campaña de campo N°1-diciembre 2013).**

A) C-01 ubicada en la margen izquierda aguas abajo de la estación el Tigre, profundidad máxima 30 cm. En su mayor porcentaje se observó gravas. B) C-02 ubicada a la margen derecha aguas abajo de la estación El Tigre, profundidad máxima 1 m, se observó arenas con presencia de gravas. C) C-03 ubicada en la margen derecha aguas abajo de la estación El Tigre, profundidad máxima 1m, se observó arena fina. D) C-04 ubicada a la margen derecha aguas arriba de la estación el Tigre, profundidad máxima de 1 m, en su mayor porcentaje se observó arena fina.



**Figura 57. Granulometría del material de lecho expuesto de lecho en la estación El Tigre.**

Método fotográfico utilizando un marco tipo criba de 50 x50 cm.



**Figura 58. Granulometría del material de lecho expuesto en la estación La Coja.**

A) La Coja (río Zarumilla), antes del inicio de la época húmeda. B) Material expuesto CPA-04, para analizar por el método fotográfico.



**Figura 59. Estación hidrosedimentológica El Tigre.**

Se presenta a los 2 muestreadores Helley Smith (Acompañan el técnico del PEBPT Manuel Mena y el Observador Emmer Aguilar).



**Figura 60. Pruebas de medición con el muestreador de fondo Helley Smith en la estación El Tigre.**

Acompañan La Ingeniera de medio ambiente Rosario y la Asistente de la autoridad Local del Agua-Tumbes.



**Figura 61. Charla sobre el protocolo de muestreo de sedimentos de fondo en la estación La Coja.**

Acompañan el Dr. Sergio Morera del IGP, Observador Luis Oviedo y el Técnico Manuel Mena del PEBPT.



**Figura 62. Pruebas de muestreo con el muestreador de fondo Helley- Smith en la estación La Coja**

Estimación del tiempo óptimo que el muestreador Helley-Smith permanecerá en el lecho del río.



**Figura 63. Calibración de un equipo ADCP.**

Acompañan el observador Emmer Aguilar, el Ing. Jorge Carranza del SENAMHI y el Dr. Sergio Morera.



**Figura 64. Preparación del carro huaro para mediciones de sedimento en la estación El Tigre.**

Se realizan los aforos de sólido y líquidos.



**Figura 65. Mediciones con el muestreador de fondo Helley-Smith en la estación El Tigre.**

A) Recojo del muestreador Helley Smith (desde el carro huaro), luego de permanecer suspendido en el lecho del río, se aprecia gran cantidad de sedimento de fondo retenido. B) Vaciado de muestra de sedimento de fondo hacia una bolsa hermética para su conservación.



**Figura 66. Material superficial de lecho expuesto después de la época húmeda en la estación El Tigre.**

A) Muestreo sub superficial del lecho del río posterior a la época húmeda. B) Vista panorámica del lecho del río (El Tigre), no se aprecia acumulación ni cambios en el material expuesto en la margen derecha del río.



**Figura 67. Material de lecho expuesto después de la época húmeda en la estación La Coja.**

A) Muestreo sub superficial del lecho del río posterior a la época húmeda B) Estación La Coja, posterior a la época húmeda, se aprecia gran cantidad de acumulación de sedimento de fondo, compuesto principalmente de arena gruesa.



**Figura 68. Secado al ambiente de muestras de sedimento de fondo.**

Universidad Nacional Agraria La Molina.



**Figura 69. Análisis en laboratorio de muestras de sedimento de fondo.**

A) Secado a estufa de las muestras a temperatura de 105 °C durante 1 hora. B) Pesado de muestras, posterior al secado (Laboratorio del Proyecto Hybam - UNALM).



**Figura 70. Análisis de laboratorio de muestras de sedimento en suspensión.**

A) Filtrado de muestras en suspensión, con ayuda de una rampa de filtración (250ml) conectada a una bomba de succión (Laboratorio del Proyecto Hybam - UNALM). B) Secado de filtros con sedimentos durante una hora a una temperatura de 60°C.



**Figura 71. Tamizado de muestras de sedimento de fondo.**

Laboratorio de mecánica de suelos, UNALM.

## ANEXO 2: PRESUPUESTO

### Cuadro 17: Presupuesto equipos y materiales

ETAPA	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U. (S/.)	COSTO (S/.)	
	<b>FONDO</b>					
<b>Equipos y Materiales</b>	<i>Equipo de fondo</i>					
	Muestreador 404-018 Helley Smith -8035 (29.5kg)	uni	2	1500	3000	
	Malla Nyal, 250 micras,0096,37por ciento y accesorios	Global	1	350	350	
	Malacate manual	uni	2	250	500	
	Abrazaderas	uni	8	20	160	
	Cable de acero y accesorios	Global	1	300	300	
	<i>Materiales</i>					
	Bolsas Ziplox	Global	1	400	400	
	Marcadores indelebles	Global	1	30	30	
	Sticker para rotulado	Global	1	50	50	
	<b>Total fondo</b>					<b>4790</b>
	<b>SUSPENSIÓN</b>					
	<i>Materiales</i>					
	Botellas de 500ml	Global	1	200	200	
	Sticker para rotulado	Global	1	100	100	
	Cooler para conservación y/o traslado de muestras	Global	1	1000	1000	
	Membrana filtrante de 0.45um y 47 mm	uni	4	250	1000	
	Bolsas Ziplox	Global	1	200	200	
	<b>Total suspensión</b>					<b>2500</b>
	<b>MUESTREO DEL LECHO DEL RÍO</b>					
<i>Materiales</i>						
Marco tipo grilla 1x1 m	Global	2	50	100		
<b>Total muestreo de lecho</b>					<b>100</b>	
	<b>TOTAL EQUIPOS Y MATERIALES</b>				<b>S/. 7390</b>	

**Cuadro 18: Presupuesto de Laboratorio**

ETAPA	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U. (s/.)	COSTO (S/.)
	<b>FONDO</b>				
<b>Laboratorio</b>	Granulometría de muestra de fondo	Global	8	85	680
	Peso específico del suelo	Global	4	85	340
	<b>Total fondo</b>				1020
	<b>SUSPENSIÓN</b>				
	<b>Laboratorio</b>				
	Análisis de muestras en suspensión y fondo	Global	240	50	12000
	<b>Total suspensión</b>				
	<b>LECHO DEL RÍO</b>				
	<b>Análisis de muestras (Laboratorio)</b>				
	Granulometría	uni	8	85	680
	Peso específico del suelo	uni	8	85	680
	<b>Total muestreo de lecho</b>				1360
	<b>TOTAL LABORATORIO</b>			S/.	<b>14380</b>

**Cuadro 19: Presupuesto de Operación**

ETAPA	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U. (s/.)	COSTO (S/.)
	<b>OBSEVADORES</b>				
<b>Operación</b>	Toma, recolección y envío de muestras (Tumbes)	Global	2	2000	4000
	Gastos de envío y recojo de muestras hacia Lima	Global	4	150	600
	<b>Total observadores</b>				4600
	<b>VIATICOS</b>				
	Transporte y movilización Lima-Tumbes	Global	5	500	2500
	Estadía y alimentación	Global	30	220	6600
	Movilidad	Global	3	200	600
	Personal de apoyo de campo	Global	6	300	1800
	Imprevistos	Global	1	1000	1000
		<b>TOTAL GASTOS DE OPERACIÓN</b>			S/.

**TOTAL**

**S/. 34270.00**

Otros equipos que se utilizaron durante el monitoreo de sólidos y líquidos:

-Equipo ADCP

-Sonda de Turbidez Ysi-660

Precios referenciales para el monitoreo diario (1 muestra) de sólidos en suspensión y fondo y tres campañas cortas de campo en la estación El Tigre (río Puyango-Tumbes) y La Coja (río Zarumilla).