

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



**“TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO Y VOLUMEN
GENERADO AGUAS ARRIBA DE LA CAPTACIÓN DEL
CHICCHE – CAJAMARCA 2016”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO HIDRÁULICO

PRESENTADO POR LA BACHILLER:

ROXANA BEATRIZ VALDIVIA DÍAZ

ASESOR:

Dr. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

CAJAMARCA-PERÚ

2018

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud e inteligencia para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres y hermanos, por su ejemplo, apoyo, consejos, valores, por la motivación y sobre todo por su amor.

A mis maestros, en especial a mi asesor de tesis y amigo el Dr. José Francisco Huamán Vidaurre por darme la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico.

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres: Segundo Felipe y María Julia.

A mis hermanos: William y Franklin

Y a mis sobrinos(as): Villett, Mía y Felipe.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Justificación de la investigación.....	2
1.4 Alcances o delimitación de la investigación.....	3
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo general.....	4
1.5.2 Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes teóricos de la investigación.....	5
2.2 Bases teóricas.....	7
2.2.1 Características de las cuencas y ríos de montaña.....	7
Aspectos generales y subcuencas de la cuenca del Chonta.....	9
2.2.2 Caudal.....	11
2.2.3 Caudal dominante o formativo del cauce.....	13
2.2.4 Granulometría de los sedimentos e inicio del movimiento del material de fondo.....	15
Análisis granulométrico.....	15
Inicio del movimiento del material de fondo.....	21
2.2.1 Tipos de transporte de sedimentos.....	24

2.2.2 Cuantificación del transporte de sedimentos	27
Fórmula de Schoklitsch (1962)	29
Fórmula de Bagnold (1980).....	31
Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (1982).....	34
Fórmula de Mizuyama y Shimohigashi (1985).....	36
Fórmula de Bathurst, Graf y Cao (1987).....	37
2.3 Definición de términos básicos	39
CAPÍTULO III	41
MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
3.1 Ubicación espacial	41
3.1.1 Geográfica	41
3.1.2 Política	41
3.1.3 Referencial	42
3.1.4 Ubicación temporal	42
3.2 Equipos y materiales utilizados en la investigación.....	42
3.2.1 Equipos de campo	42
3.2.2 Equipos de gabinete	43
3.2.3 Materiales.....	43
3.3 Procedimiento	43
3.3.1 Visita de campo a la zona de estudio	43
3.3.2 Morfología del río	43
3.3.3 Caudales del río.....	44
3.3.4 Sedimentos del río.....	44
3.3.5 Gasto sólido del río	45
3.3.6 Validación de fórmula empírica.....	45
3.3.7 Volumen de sedimentos	45
3.4 Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados.....	45
3.4.1 Tratamiento y análisis de datos.....	45
Características del río Chonta en el tramo de estudio.	45
Sedimentos del río	49
3.4.2 Presentación de resultados	55

CAPÍTULO IV	65
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
4.1 Caudal del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche	65
4.2 Gasto sólido de fondo que transporta el río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche	65
4.3 Volumen de sedimentos que transporta el río Chonta	67
CAPÍTULO V	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
4.4 Conclusiones	68
4.5 Recomendaciones.....	69
APACLLA NALVARTE, Ricardo. <i>Hidráulica Fluvial</i> . Lima : Fondo Editorial - UNALM, 2014.	70
ANEXO 1	72

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rango de tamices, según el ASTM.	17
Tabla 2. Clasificación de sedimentos por tamaño.	18
Tabla 3. Peso específico de sólidos de los suelos según su clasificación.....	19
Tabla 4. Fuerza tractiva crítica para granulometría uniforme.	24
Tabla 5. Clasificación del transporte de sedimentos.	26
Tabla 6. Coordenadas UTM de ubicación del tramo en estudio del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche.	41
Tabla 7. Caudales de aforo del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche	48
Tabla 8. Puntos de muestreo de sedimentos aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	49
Tabla 9. Granulometría de sedimentos del río Chonta aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.	50
Tabla 10. Densidad aparente de los sedimentos (in situ) del río Chonta aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	52
Tabla 11. Densidad relativa o peso específico de sedimentos (kg/m^3), del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.	53
Tabla 12. Gasto sólido de fondo del río Chonta (kg/s), aguas arriba de la captación El Chicche, aplicando diferentes fórmulas.	54
Tabla 13. Volumen de sólidos de fondo del río Chonta durante el tiempo de concentración de la cuenca (m^3), aplicando diferentes fórmulas.....	54

Tabla 14. Caudal derivado a la C.H. y volumen de sólidos medido en el desarenador de la captación El Chicche (m ³).	55
Tabla 15. Características de las secciones de aforo aguas arriba de la captación El Chicche	56
Tabla 16. Datos obtenidos en campo para el caudal 3,96 m ³ /s	57
Tabla 17. Cuadro resumen de los valores obtenidos para el gasto sólido de fondo (kg/s) del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, para los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aplicando diferentes fórmulas.	61
Tabla 18. Volumen de sólidos de fondo del caudal derivado a la C.H. El Chicche, durante el tiempo de concentración de la cuenca (m ³), aplicando diferentes fórmulas	63
Tabla 19. Gasto sólido de fondo y volumen de sedimentos transportados durante el tiempo de concentración, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, con la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean.....	64
Tabla 20. Caudales mínimos y máximos aforados de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aguas arriba de la captación El Chicche.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema idealizado de división de una cuenca hidrológica de montaña.	8
Figura 2. Sección transversal con tubo de Pitot	12
Figura 3. Curvas granulométricas reales de los suelos.....	16
Figura 4. Ubicación política de la zona de estudio.....	41
Figura 5. Ubicación referencial de la zona de estudio.....	42
Figura 6. Sección de aforo del río Chonta a 100m, aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche.	47
Figura 7. Curva granulométrica de los sedimentos del río Chonta aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	51
Figura 8. Barraje de la captación El Chicche	73
Figura 9. Sección de aforo del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche.....	73
Figura 10. Calibración del tubo de Pitot utilizado durante la investigación.	74
Figura 11. Aforo realizado en el mes de enero de 2016.....	74
Figura 12. Tramo recto del río Chonta aguas arriba de la sección de aforo.....	75
Figura 13. Tramo recto del río Chonta aguas abajo de la sección de aforo	75
Figura 14. Tramo del río Chonta donde se observa la coloración del flujo debido al transporte de sedimentos.	76
Figura 15. Medición de la velocidad del flujo por el método del flotador.....	76
Figura 16. Aforo del día 31.01.2016 (caudal=9.84 m ³ /s).....	77
Figura 17. Extracción de muestras de suelos aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	77

Figura 18. Muestras de sólidos extraídas aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	78
Figura 19. Secado de la muestra extraída del río Chonta, extraídas aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	78
Figura 20. Tamizado de la muestra extraída del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.	79
Figura 21. Determinación de los pesos específicos de los sedimentos extraídos aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.....	79
Figura 22. Relación Caudal (m^3/s) - Gasto sólido de fondo (kg/s) del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, para el año 2016, aplicando diferentes fórmulas.....	80
Figura 23. Vista en planta del desarenador de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche	81
Figura 24. Morfología del tramo de estudio del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la bocatoma “El Chicche”	82
Figura 25. Puntos de muestreo de sedimentos y ubicación de sección de aforo en el tramo de estudio del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la bocatoma “El Chicche”	83

RESUMEN

El transporte de sedimentos en cauces naturales es un fenómeno que generalmente afecta a las obras fluviales tales como las captaciones de derivación; sin embargo, la estimación del gasto sólido de fondo es posible realizarla mediante fórmulas empíricas basadas en la teoría del cortante crítico y del caudal dominante. La presente tesis tuvo como objetivo estimar el transporte de sedimentos de fondo del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, con fórmulas empíricas tales como las fórmulas de Schoklitsch, Bagnold, Parker, Klingeman y Mc Lean, Mizuyama y Shimohigashi, Bathurst, Graf y Cao; utilizando caudales medidos entre enero y abril del año 2016; para luego validar la o las fórmulas mencionadas y se ha determinar el volumen generado por los sedimentos. Los sólidos han sido obtenidos mediante muestreo de un tramo del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche. Los caudales medidos en el año 2016 variaron de 1,29 m³/s a 9,84 m³/s; el gasto sólido de fondo con dichos caudales varió de 6,75 kg/s con la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean a 95,22 kg/s con la fórmula de Bagnold. En base de mediciones de volumen de sólidos depositados en el sedimentador de la captación de la C.H. El Chicche, la fórmula que se aproxima es la de Parker, Klingeman y Mc Lean, siendo esta la más aceptable por estimar el gasto sólido de fondo en el río Chonta.

Palabras claves:

Captación El Chicche, gasto sólido de fondo, caudal dominante, volumen de sedimentos.

ABSTRACT

The transport of sediments in natural channels is a phenomenon that generally affects fluvial works such as diversion capture; however, the estimation of solid background expenditure is possible using empirical formulas based on the theory of critical shear and dominant flow. The objective of this thesis was to estimate the transport of bottom sediments from the Chonta River, upstream of the El Chicche catchment, with empirical formulas such as the formulas of Schoklitsch, Bagnold, Parker, Klingeman and Mc Lean, Mizuyama and Shimohigashi, Bathurst, Graf and Cao; using flow rates measured between January and April 2016; to then validate the aforementioned formula (s) and determine the volume generated by the sediments. The solids were obtained by sampling a section of the Chonta River upstream of the El Chicche catchment. The flows measured in 2016 varied from 1.29 m³/s to 9.84 m³/s; the solid bottom cost with these flows varied from 6.75 kg/s with the formula of Parker, Klingeman and Mc Lean to 95.22 kg/s with the Bagnold formula. Based on volume measurements of solids deposited in the sedimentation tank of the C.H. The Chicche, the approaching formula is that of Parker, Klingeman and Mc Lean, this being the most acceptable for estimating the solid bottom cost in the Chonta River.

Key words:

Capture The Chicche, solid bottom expense, dominant flow, sediment volume.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En diferentes obras hidráulicas uno de los problemas en el diseño está relacionado con la sedimentología referente al proceso de colmatación de captaciones de derivación y embalses en proyectos de represamiento de agua, con la finalidad de regular el caudal de un río.

La sedimentación en una captación de derivación trae como consecuencia la disminución de la eficiencia de dicha estructura, por lo cual es necesario realizar estudios que permitan conocer con mayor precisión la cantidad de sedimentos que se acumulan.

En Cajamarca existen captaciones en las cuencas de los ríos Mashcón y del Chonta funcionando hace más de cuatro décadas con problemas de colmatación y socavación. De estas captaciones la mayoría se utilizan para dotar de agua a áreas irrigables y otras para la generación de hidroenergía tal como la captación de la Central Hidroeléctrica “El Chicche” ubicada en el río Chonta.

Debido a la problemática del transporte de sedimentos de fondo y su consecuencia en el tiempo en la eficiencia de la captación de la Central Hidroeléctrica El Chicche se planteó en esta investigación estimar el volumen de sedimentos de fondo que transporta el río Chonta, aguas arriba de dicha captación, para caudales aforados durante los meses lluviosos de enero, febrero, marzo y abril de 2016; mediante la aplicación de fórmulas empíricas y posterior validación.

1.1 Planteamiento del Problema

En los meses lluviosos de enero a abril de cada año, en el río Chonta, se presenta transporte de sedimentos que son captados conjuntamente con el flujo líquido y derivados hacia los canales de las diferentes captaciones. En la captación de la central hidroeléctrica El Chicche, ubicada en el río Chonta a una altitud de 2913 m.s.n.m., se ha observado presencia de sedimentos transportados aguas arriba, provenientes del cauce del río, los mismos que ingresan juntamente con el caudal de derivación, que parte de ellos también son derivados y depositados en el desarenador. Las fórmulas empíricas para estimar el gasto sólido de fondo en cauces naturales, son diversas y por lo tanto su aplicación tiene un límite; para el caso del río Chonta es motivo de aplicar fórmulas que se ajusten a las características de los sedimentos y del lecho del río, tales como las fórmulas de Schoklitsch, Bagnold, Parker, Klingeman y Mc Lean, Mizuyama y Shimohigashi, Bathurst, Graf y Cao, con la finalidad de estimar la fórmula que se ajuste a las mediciones de sedimentos que ingresan hacia el canal de derivación de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche, lo cual conlleva a estimar el volumen de sedimentos para diferentes caudales en el río Chonta.

1.2 Formulación del problema

Nuestra investigación busca responder la siguiente pregunta:

¿Cuál es el gasto sólido de fondo y el volumen de sedimentos de fondo del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche, entre los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016?

1.3 Justificación de la investigación

La captación El Chicche es parte de la infraestructura hidráulica de la central hidroeléctrica del mismo nombre la cual actualmente está en funcionamiento, generando 0,62 MW de

potencia eléctrica, cuya energía es utilizada en las zonas de Rinconada-Otuzco y a una pequeña población de Combayo.

Dada la variabilidad de fórmulas empíricas e incertidumbre en sus resultados para el cálculo de gasto sólido de fondo aplicables a ríos de alta montaña, es necesario validar dichas fórmulas a fin de lograr una similitud con la realidad encontrada.

Posterior a dicha validación y calibración de fórmulas empíricas, la presente investigación permitirá estimar el gasto sólido de fondo transportado por el río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche, así como su volumen generado, para los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, cuyos resultados servirán para la toma de decisiones de las autoridades respecto al mantenimiento de la captación El Chicche; así también servirá de precedente para futuras investigaciones referentes al transporte de sedimentos.

1.4 Alcances o delimitación de la investigación

La presente investigación se ha realizado en un tramo de 288 m del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche.

Se ha estimado el gasto sólido de fondo del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, aplicando 5 fórmulas empíricas y caudales aforados en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, considerando una duración de caudal igual al tiempo de concentración de la cuenca en el punto de estudio y caudales iguales y superiores al caudal dominante del río.

La investigación aborda temas de hidrología, topografía y mecánica de suelos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Estimar el gasto sólido de fondo y el volumen de sedimentos de fondo del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016.

1.5.2 Objetivos específicos

- Aforar el río Chonta, aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016.
- Estimar el gasto sólido de fondo que transporta el río Chonta, aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aplicando las fórmulas de Schoklitsch, Bagnold, Parker, Klingeman y Mc Lean, Mizuyama y Shimohigashi, Bathurst, Graf y Cao.
- Validar la fórmula que se ajuste a las mediciones de sedimentos que ingresan hacia el canal de derivación de la central hidroeléctrica El Chicche.
- Estimar el volumen de sedimentos debido al transporte de fondo del río Chonta.
- Estimar el volumen máximo de sedimentos que ingresa al sedimentador de la central hidroeléctrica El Chicche.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos de la investigación

Las corrientes de alta montaña tienen altas pendientes y gran capacidad de transporte de sedimentos; además, generan fenómenos importantes de socavación de fondo y de ataques contra las márgenes. En las corrientes de llanura también existen procesos de transporte de sólidos, socavación y ataques contra las márgenes en magnitudes relativamente moderadas; sin embargo, los depósitos de sedimentos que llegan de las partes altas y los aumentos de nivel por baja velocidad del agua inciden en los desbordamientos y en la inundación de zonas aledañas. (NAVA HERNÁNDEZ, y otros, 2012)

Los ríos de la sierra del Perú se caracterizan por presentar muchas posibilidades de desarrollo de proyectos de aprovechamiento hidráulico, al ser caudalosos en épocas de avenidas o lluvias (enero, febrero y marzo) y de poco caudal en época de estiaje (abril a diciembre), siendo necesario el conocimiento y la aplicación de medidas de prevención y control de la erosión de los cauces de los ríos, a fin de evitar la fuerte erosión de cuencas, que puedan afectar la vida útil de los proyectos desarrollados en ellos, sobre todo en las presas.

La presencia de partículas en el flujo altera el comportamiento hidráulico muchas veces motivado por la presencia de elementos artificiales, como son apoyos de puentes o estructuras hidráulicas, que hacen que se rompa el equilibrio del flujo. Esta complejidad hace que el problema del transporte de sedimentos sea imposible de resolver por la simple aplicación de la teoría de la mecánica de los fluidos. (SARANGO CALVA, 2013)

Según el estudio de “Modelización del transporte de sedimentos, en el río Ramis-Puno” los valores más altos que se pudieron calcular, están dados por las fórmulas de Einstein Brown con 646,46t/día, seguido por la fórmula de Shields con 560,00 t/día, y el de la formula Du Boys con 120,54 t/día.

Así también se puede observar el resultado de la fórmula de Albertson que expresa un valor de 72,60 t/día. Un resultado menor arroja la fórmula de Levi con 21,83 t/día.

Como valores más bajos podemos ver los resultados de las fórmulas de Meyer Peter y Müller con 6,32 t/día, seguido por la fórmula de Einstein con 4,64 t/día y finalmente la fórmula de Schoklitsch con un resultado de 2,74 t/día.

La gran variación que existe en la aplicación de fórmulas empíricas para el gasto sólido de fondo, tiene relación con las diferentes condiciones en las que fueron concebidas, pues en el lecho tenemos una mezcla de granos, y en estas se usan valores representativos de la graduación de granos constituyentes del lecho, así como las condiciones de flujo, etc. (HUAMAN GUTIERREZ, 2014)

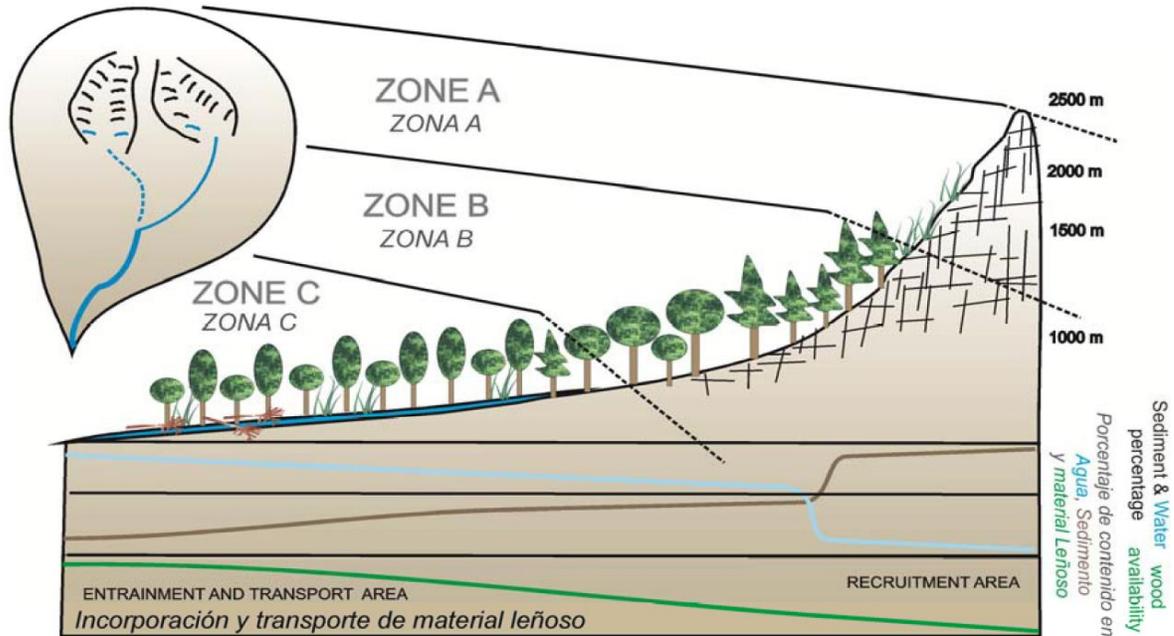
Los caudales mensuales promedio del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche muestran caudales superiores al promedio anual durante los meses de diciembre a mayo (periodo húmedo), e inferiores durante junio a noviembre (periodo seco). El caudal promedio mensual para todo el año es de 4,17 m³/s (SALZGITTER-SISA, 2010).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Características de las cuencas y ríos de montaña

Los principales factores que determinan los procesos hidrológicos y geomorfológicos que tienen lugar en una determinada región montañosa son el clima y la geología. Además, el grado de desarrollo espacial de estos procesos producen los tres tipos básicos de contextos en que tradicionalmente se divide una cuenca hidrológica: (zona A) producción, (zona B) transporte y (zona C) depósito. Según esta división, la zona de producción representa la zona más alta de la cuenca y es fundamentalmente de dominio coluvial. Los procesos fundamentales que se producen están ligados a las laderas, con predominio de producción de sedimentos, presentando muy elevada susceptibilidad a la ocurrencia de erosión y desplazamientos superficiales. La zona de transporte, de altitud media, de marcado dominio aluvial, en donde va perdiendo influencia la producción de sedimentos, predomina el desarrollo de la zona de transferencia que transporta el agua y la carga sólida. Finalmente, la zona más baja o zona de depósito, con marcado carácter aluvial-fluvial. A lo largo del trazado de los canales se suele producir el depósito en las márgenes en forma de barras, o los derrubios en el lecho. (RUIZ VILLANUEVA, 2012)

Figura 1. Esquema idealizado de división de una cuenca hidrológica de montaña.



Fuente: (RUIZ VILLANUEVA, 2012)

Los ríos de montaña se caracterizan por poseer lechos pavimentados con sedimentos gruesos, lo que le da al lecho una rugosidad elevada y una gran resistencia al flujo. Bajo esta capa se encuentran partículas de menor tamaño; esta característica se denomina acorazamiento del fondo lecho y éste fenómeno es uno de los causantes de la gran variabilidad espacial y temporal del transporte de sedimentos en este tipo de ríos. Otra característica de estos cauces es su pendiente longitudinal pronunciada, que varía de 5 a 10%. Las tasas de caudales tan variables son producto de su pendiente. Los ríos de montaña poseen un régimen hidrológico estacional con gran variabilidad espacial y temporal. Con respecto a su morfología, presentan una elevada variabilidad espacial pero reducida variación temporal, donde se pueden encontrar diferentes formas de lecho que se van turnando a lo largo del cauce.

Los ríos de montaña se pueden considerar estables debido a que solo para caudales de magnitud considerable se observan tasas de transporte de sólidos de fondo, o el sedimento es puesto en movimiento. Lo anterior es debido al tamaño del sedimento que lo compone y por el efecto de acorazamiento. (SILVA MEULEN, 2014)

Aspectos generales y subcuencas de la cuenca del Chonta.

La cuenca del Chonta tiene su origen en la zona de puna de la cordillera Cumullca. El curso medio de este río se caracteriza por valles profundos hendidos en forma de V, cuyo aprovechamiento agrícola es mínimo. La pronunciada pendiente del río proporciona el carácter de torrente y se presta favorablemente para el aprovechamiento hidroenergético.

Cerca de la localidad de Otuzco, el río Chonta sale del valle profundo y entra en la meseta de Cajamarca a 2600 m.s.n.m.

La ubicación geográfica de la cuenca se encuentra entre los paralelos 06° 55' y 07° 05' de latitud sur y 78° 19' y 78° 31' de longitud oeste. En coordenadas UTM (WGS84) sus puntos extremos se encuentra entre los paralelos 775 000 y 798 000 de coordenadas este; 9 213 085 y 9 233 414 de coordenadas norte. (SALZGITTER-SISA, 2010)

En la zona de estudio, el río Chonta tiene las siguientes características:

Área de la cuenca: 275,5 km²

Longitud del curso principal: 25,1 km

Clima

- Precipitación pluvial. La precipitación promedio total anual varía entre 1,250 mm en las partes altas hasta 600 mm en las bajas; en todas las altitudes, el régimen de lluvias a lo largo del año presenta un período lluvioso de octubre a abril con un decaimiento leve

en noviembre y diciembre y otro, de escasa precipitación entre los meses de mayo a septiembre, que alcanza sus niveles más bajos de junio a agosto, donde se registran valores inferiores a 10 mm/mes.

- Temperatura. En las partes altas, la temperatura máxima media mensual oscila entre 15,7°C y 19,3°C, valores que corresponden a los meses de marzo y enero, respectivamente, mientras que la temperatura mínima media mensual, se encuentran entre -1,2°C y 1,6°C, para los meses de agosto y marzo, respectivamente; en las partes bajas, la temperatura máxima media mensual oscila entre 20,9°C y 21,9°C, valores que corresponden a los meses de marzo y setiembre, respectivamente, mientras que la temperatura mínima media mensual se encuentran entre 4,6°C y 9,3°C, para los meses de julio y febrero, respectivamente.
- Humedad relativa. En las zonas altas de la cuenca, la humedad relativa varía entre un máximo de 85,8% registrado en el mes de marzo, hasta un mínimo de 63% medido en el mes de julio, mientras que en las partes bajas, este parámetro meteorológico varía entre 74,6% y ocurre en marzo, mientras el menor valor ocurre en el mes julio, cuando los instrumentos han registrado una humedad de 62,7%. (NIPPON KOEI, 2010)

Hidrografía

El río Chonta, pertenece a la Región Hidrográfica del Amazonas, a la intercuenca del Alto Amazonas, a la cuenca del Río Marañón, a la intercuenca Alto y a la cuenca del Río Crisnejas, confluye con el río Mashcón en un punto cercano a la ciudad de Cajamarca, aguas abajo del cual recibe el nombre de Cajamarquino. (SALZGITTER-SISA, 2010)

2.2.2 Caudal

Es la cantidad de fluido que atraviesa una sección conocida de una corriente durante una unidad de tiempo concreta; generalmente se expresa en m^3/s . El régimen de caudales de una corriente de agua durante un período determinado, es el único término del balance hidrológico de una cuenca que puede ser medido directamente con una buena precisión.

El régimen de caudales es un dato básico, indispensable, para esta investigación.

El objeto de toda estación de aforo es poder establecer la curva de caudales contra el tiempo. Sin embargo en países como el nuestro las estaciones de aforo de caudales son inexistentes en muchos sitios, lo que ha obligado a recurrir a métodos aproximados para la estimación de los caudales de diseño, como son los métodos de regionalización. Sin embargo jamás debe olvidarse que ningún método por bueno que sea reemplaza la medida directa de la variable. (RUFINO HINOJOSA, 2006).

Medición del caudal de un río

El caudal de un río se puede medir mediante la metodología del tubo de Pitot, el cual por su precisión, bajo costo y fácil instalación, se utiliza en la medición de velocidades en canales y en pequeñas corrientes naturales. El tubo de Pitot permite medir la velocidad de la corriente a diferentes profundidades, por lo cual se puede conocer la velocidad media del flujo en la sección, que multiplicada por el área de ésta, nos da el caudal de la corriente. En consecuencia es un medidor directo de caudal, y puede usarse tanto en conductos libres como a presión. (RUFINO HINOJOSA, 2006)

Determinación del caudal en una sección irregular:

Consiste en medir la velocidad a 20% y 80% de profundidad a partir de la superficie, siendo V_i el promedio de ambas velocidades. Este método es el más usado en la práctica.

$$V_i = \frac{V_{0,2hi} + V_{0,8hi}}{2} \quad (1)$$

Donde:

$V_{0,2hi}$ = Velocidad medida al 20% de profundidad a partir de la superficie, en m/s.

$V_{0,8hi}$ = Velocidad medida a 80% de profundidad a partir de la superficie, en m/s.

Y el caudal Q_i correspondiente a la respectiva área de influencia, A_i , es:

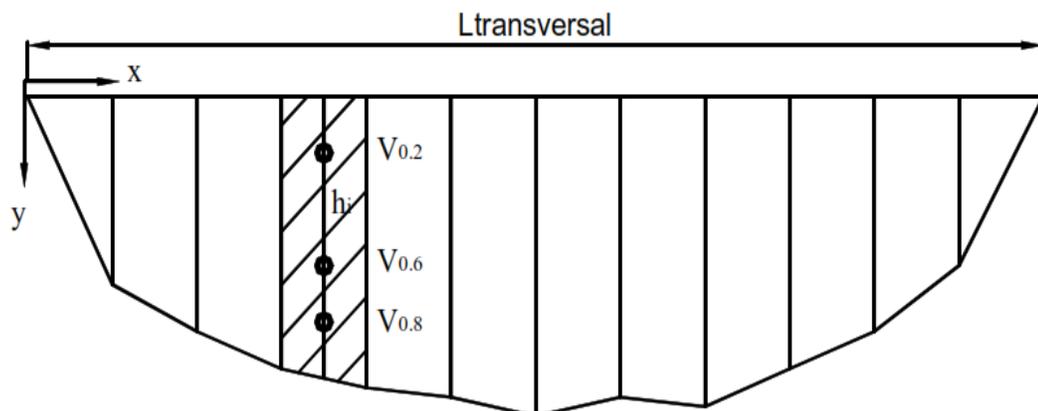
$$Q_i = \sum V_i A_i \quad (2)$$

Donde:

A_i = área correspondiente al promedio de velocidades, en m^2 .

NOTA: Cuando las profundidades de la sección son pequeñas, menores de 0,6 m, solo se mide la velocidad a 0,6 de la profundidad, velocidad que se considera representativa de la velocidad media de la vertical. (RUFINO HINOJOSA, 2006).

Figura 2. Sección transversal con tubo de Pitot



Fuente: (RUFINO HINOJOSA, 2006)

Teniendo datos como área transversal y la velocidad, será factible calcular el coeficiente de rugosidad de Manning, usando la siguiente fórmula:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (4)$$

Donde:

V = Velocidad media, en m/s.

R_h = Radio hidráulico de la sección, en m.

P_m = Perímetro mojado de la sección transversal, en m.

A = Área de la sección transversal, en m^2 .

A_m = ancho medio de la sección transversal, en m.

S = Pendiente longitudinal del fondo del cauce, en m/m.

n = coeficiente de rugosidad de Manning.

2.2.3 Caudal dominante o formativo del cauce.

La geometría de un río es consecuencia de los caudales que transporta, su geometría permanente se debe a que ciertos caudales, por su magnitud, por su frecuencia o por una combinación de ambas cosas, se convierten en los caudales determinantes.

El río se desborda de su cauce en periodos de inundación que ocurren periódicamente, y este caudal que llena a rebosar el cauce, es especialmente importante porque es el responsable principal de la forma y dimensiones del mismo. Esto es así porque mientras el

agua está contenida en el cauce, circula con cierta velocidad, en tanto que cuando se desborda levemente, el incremento de caudal inunda las llanuras adyacentes y deposita sedimento en ellas, pero no cambia sustancialmente el flujo en el cauce central.

El caudal que llena el cauce, desarrolla la mayor acción modeladora sobre el cauce, puesto que un caudal mayor es menos frecuente y sobretodo apenas incrementa la acción.

Por eso este caudal de cauce lleno se conoce también como caudal formativo o dominante. Para calcular el caudal dominante existen varios métodos de diversa complejidad, aunque un orden de magnitud para el caudal formador se sitúa en la avenida que se da dos veces al año como promedio o bien, según otros, un caudal con un periodo de retorno de 1,4 años. Para algunas hidrologías irregulares como la de algunas zonas de España, se han encontrado mejores correspondencias con un periodo de retorno de 1,5 a 7 años, acercándose a la cifra más alta cuanto mayor es la irregularidad hidrológica. El caudal formativo sería el determinante de la geometría hidráulica. (CORUÑA, 2002)

La descarga formativa o dominante de varios ríos estudiados no tiene una frecuencia recurrente común. Usando un conjunto de 233 datos, Williams obtuvo la siguiente ecuación de regresión para la descarga formativa. (APACLLA NALVARTE, 2014)

$$Q = 4,0 A_f^{1.21} S^{0.28} \quad (5)$$

Donde:

Q = Caudal dominante, en pies³/s.

A_f = Área correspondiente al cauce con caudal dominante, en pies².

S = Pendiente de la superficie de agua, en pie/pie.

Los parámetros de aplicación de la fórmula corresponden a $0,5 \leq Q(m^3/s) \leq 28\ 320$, $0,0041 \leq S(\%) \leq 8,10$ y $0,00019 \leq D_{50}(m) \leq 0,19$

2.2.4 Granulometría de los sedimentos e inicio del movimiento del material de fondo

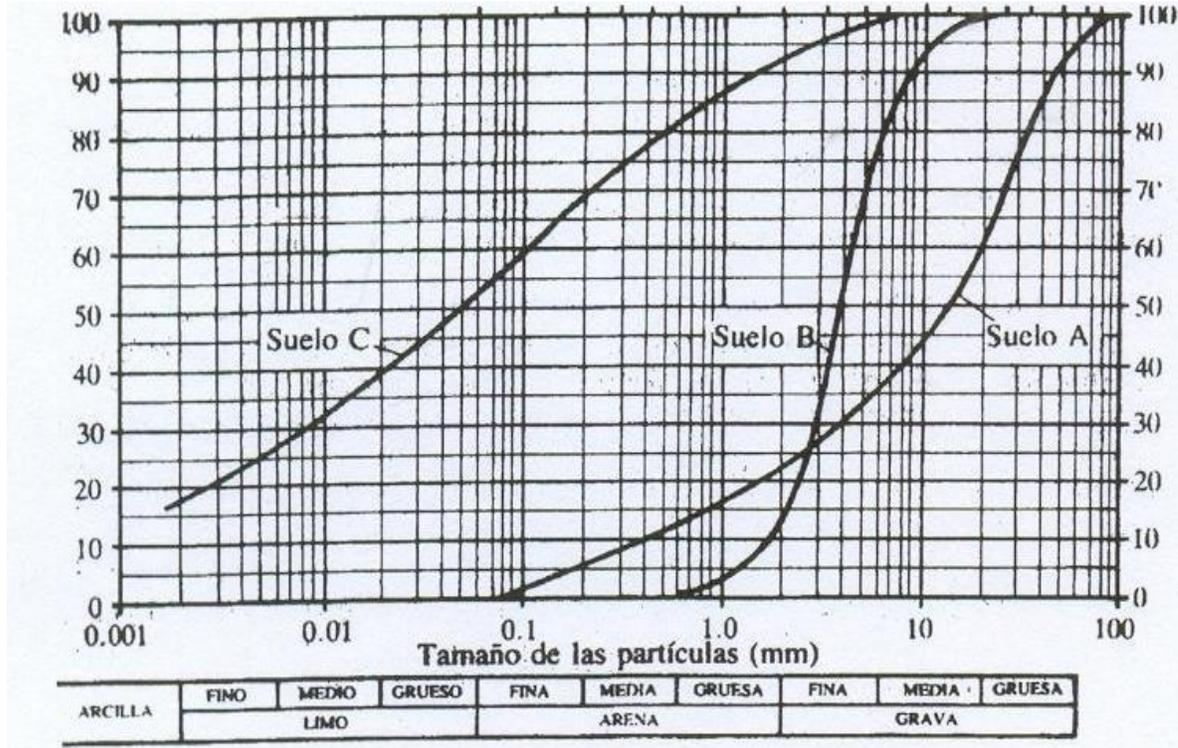
En los ríos de montaña el lecho está constituido por partículas de diferentes tamaños. Generalmente la característica más influyente de estas partículas en el estudio de inicio y transporte de sedimento es el peso. Sin embargo se ha observado que en ríos de montañas el peso específico tiene poca variación entre partículas de distintas dimensiones, y debido a esto la característica que toma mayor relevancia para describir el lecho es el diámetro de cada partícula, como representación del volumen del grano (SILVA MEULEN, 2014).

Análisis granulométrico

Es el proceso para determinar la proporción de participación de los granos de suelo, en función de sus tamaños, lo que llamamos gradación del suelo.

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico sirven para elaborar la curva granulométrica. Cuyos límites de tamaño de las partículas que constituyen un suelo, ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo.

Figura 3. Curvas granulométricas reales de los suelos



Fuente: (HOYOS SAUCEDO, 2000)

- La curva A, nos indica un suelo bien gradado y de grano grueso.
- La curva B, nos indica un suelo mal gradado, poco uniforme (curva parada sin extensión).
- La curva C, nos indica un suelo arcilloso o limoso (fino).

Método de análisis granulométrico - Método por tamizado

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en la diferencia de tamaño. En el tamizado se vierten los sólidos sobre un tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas y retiene las de tamaños superiores. Un tamiz puede efectuar solamente una separación en dos fracciones.

Estas fracciones se llaman fracciones de tamaño no especificado, porque aunque se conoce el límite superior o inferior del tamaño de las partículas que contiene, se desconoce su tamaño real. (HOYOS SAUCEDO, 2000).

Tabla 1. Rango de tamices, según el ASTM.

Designación	Abertura (ϕ)	Designación	Abertura (ϕ)
3"	75 mm	N° 16	1180 μ
2"	50 mm	N° 20	850 μ
1 1/2"	37,5 mm	N° 30	600 μ
1"	25 mm	N° 40	425 μ
3/4"	19 mm	N° 50	300 μ
3/8"	9,5 mm	N° 60	250 μ
N° 4	4,75 mm	N° 100	150 μ
N° 8	2,36 mm	N° 140	106 μ
N° 10	2 mm	N° 200	75 μ

Fuente: (HOYOS SAUCEDO, 2000)

Tabla 2. Clasificación de sedimentos por tamaño.

Nombre	Tamaño	Tamizado
Canto rodado		
- Muy grande	4m - 2 m	
- Grande	2 m - 1 m	
- Mediano	1 m - 0,5 m	
- Pequeño	0,5 m - 0,25 m	
Guijarro		
- Grande	286 mm - 128 mm	
- Pequeño	128 mm - 64 mm	
Grava		
- Muy gruesa	64 mm - 32 mm	
- Gruesa	32 mm - 16 mm	
- Mediana	16 mm - 8 mm	Pasa el tamiz 3" y es retenido por el tamiz N°4
- Fina	8 mm - 4 mm	
- Muy fina	4 mm - 2 mm	
Arena		
- Muy gruesa	2 mm - 1 mm	Pasa el tamiz N°4 y es retenido por el tamiz N° 200
- Gruesa	1 mm - ½ mm	
- Mediana	½ mm - ¼ mm	
- Fina	¼ mm - 1/8 mm	
Limo	1/16 mm - 1/256 mm	Pasa el tamiz N°200
Arcilla	1/256 mm - 1/4096 mm	Pasa el tamiz N° 200

Fuente: (Bolinaga, 1979)

Peso específico de los sedimentos

Se define como peso específico de los sólidos (γ_s), a la relación del peso en el aire, de un volumen dado de partículas sólidas, al peso en el aire de un volumen igual de agua destilada a una temperatura de 4° C.

El valor de la Peso Específico de Sólidos de un Suelo queda expresado por un valor abstracto; además de servir para fines de clasificación, interviene en la mayor parte de los cálculos de la mecánica de suelos.

La densidad de los suelos varía comúnmente entre los siguientes valores:

Tabla 3. Peso específico de sólidos de los suelos según su clasificación.

Tipo de suelo	Peso específico (g/cm ³)
Cenizas volcánicas	2,20 a 2,50
Suelos orgánicos	2,50 a 2,65
Arenas y gravas	2,65 a 2,67
Limos inorgánicos	2,67 a 2,72
Arcillas poco plásticas	2,72 a 2,78
Arcillas plásticas	2,78 a 2,84
Arcillas expansivas	2,84 a 2,88
Suelos con abundante hierro	3,00

Fuente: (HOYOS SAUCEDO, 2000)

Terminado el análisis granulométrico, podemos obtener parámetros importantes como:

Coefficiente de uniformidad

Es el coeficiente de graduación o uniformidad del suelo, expresada numéricamente

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6)$$

Si el $Cu > 4$ a 6 , indicará que el suelo es bien graduado.

Donde:

D_{60} = Diámetro de la curva granulométrica tal que el 60% de las partículas son menores que él, en m.

D_{10} = Diámetro de la curva granulométrica tal que el 10% de las partículas son menores que él, en m.

La uniformidad de un suelo puede expresarse por el coeficiente de uniformidad, que es la relación entre el d_{60} y el d_{10} , siendo el d_{60} el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo en peso y d_{10} el valor correspondiente para el 10%. Un suelo con un coeficiente de uniformidad menor de 2 se considera “uniforme” (Lambe, 1999).

Densidad aparente de los sedimentos (ρ_a)

$$\rho_a = \frac{P_s}{V_0} \quad (7)$$

P_s = Peso seco de la muestra extraída en campo, en kg.

V_0 = Volumen que la muestra ocupaba en campo, en m^3 .

Densidad relativa o peso específico de sedimentos ($\rho_r = \gamma_s$)

$$\rho_r = \gamma_s = \frac{W_s}{V_f - V_i} \quad (8)$$

ρ_r = Densidad relativa, adimensional.

γ_s = Peso específico de sedimentos, en kg/m^3 .

W_s = Peso seco de la muestra, en kg.

V_i = Volumen del agua (inicial), en m^3 .

V_f = Volumen del agua más la muestra (final), en m^3 .

Porosidad (η)

$$\eta = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (9)$$

ρ_a = Densidad aparente de la muestra, en kg/m^3 .

ρ_r = Densidad relativa de la muestra, en kg/m^3 .

Densidad relativa de la partícula dentro del agua (Δ)

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (10)$$

γ_s = Peso específico de las partículas, en kg/m^3 .

γ = Peso específico del agua, en kg/m^3 . En problemas de ingeniería se considera que $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$. (MAZA ÁLVAREZ, y otros, 2007).

Rugosidad del cauce debido a las partículas en un fondo plano (n')

Para evaluar la rugosidad debida a las partículas n' en un fondo plano, Meyer- Peter y Müller sugieren utilizar la siguiente fórmula:

$$n' = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (11)$$

D_{90} = Diámetro de la curva granulométrica tal que el 90% de las partículas son menores que él, en m.

Las unidades de n' son $\text{s/m}^{1/3}$ peso es menor. (MAZA ÁLVAREZ, y otros, 2007)

Inicio del movimiento del material de fondo

El movimiento inicial de las partículas del lecho en un canal, depende de la granulometría del lecho, la pendiente y el caudal necesario para generar arrastre, ya que el flujo actúa sobre estas partículas tratando de sacarlas de su estado de reposo. La resistencia de la

partícula a ser movida puede relacionarse con su peso sumergido, el cual es función del peso específico sumergido, y del tamaño de su diámetro “D”. Con estas variables puede formarse el parámetro adimensional o tensión cortante adimensional, también llamado parámetro de Shields o de movilidad.

El inicio de movimiento corresponde al estudio de las condiciones donde estas partículas comienzan a moverse. Desde un punto de vista práctico, no es posible definir el inicio del movimiento, sino, sólo las condiciones correspondientes a un cierto grado de movimiento que es cuantificable mediante un valor pequeño, pero no nulo.

En ríos de pendiente fuerte, el inicio de movimiento de las partículas de sedimentos es retrasado y obstaculizado no solamente por el tamaño de partículas, sino por la disposición y agrupamiento de las mismas y las formas del lecho, siendo estos factores causantes de un incremento en la resistencia al flujo. Para la iniciación del movimiento tres etapas:

- En una primera fase, la partícula del sedimento comienza a vibrar sin cambiar de posición. La vibración se inicia levemente y aumenta paulatinamente junto con el caudal, hasta que un vórtice la arranca del fondo, en forma súbita.
- En la segunda, la partícula se desplaza a saltos, o rueda. El número de elementos que se mueven es reducido y ellos encuentran fácil y rápido reacomodo aguas abajo. Las partículas se mueven aleatoriamente y alcanzan sucesivos estadios de reposo.
- En la tercera, se incrementa el número de las partículas que se movilizan por el fondo. Se observa que muchas de ellas no encuentran acomodo inmediato. Se detienen temporalmente pero no fijan en un lugar. Se mantienen vibrando y reinician el

desplazamiento. Se considera que éstas se encuentran en una condición de inestabilidad crítica.

La gran cantidad de variables y parámetros involucrados en el movimiento de las partículas hace extremadamente difícil la cuantificación del movimiento incipiente. (MEULEN SILVA, 2014)

Fuerza tractiva crítica

La fuerza que ejerce la corriente sobre el fondo por unidad de área se denomina fuerza tractiva τ_o . El movimiento de las partículas constituyentes del lecho empieza cuando la fuerza tractiva es mayor que la fuerza tractiva crítica $(\tau_o)_c$. se denomina fuerza tractiva crítica a la fuerza mínima necesaria para poner en movimiento las partículas constituyentes del lecho. (HUAMAN GUTIERREZ, 2014)

Por lo tanto, para que haya movimiento de fondo se requiere que:

$$\tau_o > (\tau_o)_c \quad (12)$$

Caso contrario, cuando $\tau_o < (\tau_o)_c$ el lecho no presenta movimiento y se comporta como si fuese un lecho rígido.

La condición $\tau_o = (\tau_o)_c$ corresponde a la iniciación del movimiento de las partículas del fondo, definida en términos de la fuerza tractiva.

Un valor que se denomina $(\tau_o)'_c$, corresponde al valor de τ_o para el que las partículas se ponen en suspensión y viajan distribuidas en la sección transversal. Por lo tanto, para que haya transporte sólido de fondo se requiere que:

$$(\tau_o)_c < \tau_o < (\tau_o)'_c \quad (13)$$

Se denomina gasto sólido total (T_T) a la suma de ambos gastos sólidos (fondo más suspensión).

$$T_T = T_F + T_S \quad (14)$$

Si las partículas no fuesen de granulometría uniforme podrían darse las tres condiciones; cada una de ellas para una determinada porción de la curva granulométrica. (Rocha Felices, 1998).

Tabla 4. Fuerza tractiva crítica para granulometría uniforme.

Condición	Transporte Sólido		
	Fondo	Suspensión	Total
$\tau_o < (\tau_o)_c$	0	0	0
$(\tau_o)_c < \tau_o < (\tau_o)'_c$	T_F	0	T_F
$\tau_o > (\tau_o)_c$	0	0	T_S

Fuente: (ROCHA FELICES, 1998)

2.2.1 Tipos de transporte de sedimentos

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

El transporte puede ser por rodamiento o deslizamiento sobre el fondo, a saltos dentro del flujo y suspendido o soportado por el flujo durante el tiempo que es transportado. El transporte de sedimentos puede darse también como una combinación de los anteriores. (APACLLA NALVARTE, 2014)

Se entiende por sedimento a todas las partículas de suelo roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua.

Según su comportamiento, al ser transportado por el flujo, el sedimento se puede diferenciar en dos grandes grupos: el del fondo y el de lavado. Al estudiar un tramo del río el primero es el material que forma el fondo o álveo del cauce y el segundo el que no se encuentra dentro de ese material. Este último está formado por partículas muy finas como limos y arcillas que el agua transporta en suspensión. (MAZA ÁLVAREZ, y otros, 2007)

Se conoce como carga de fondo a los sedimentos que generalmente ruedan, que se deslizan o avanzan a saltos apoyándose sobre el fondo, están constituidos por las arenas, gravas y boleas.

Por otra parte la carga en suspensión está constituida por la carga de fondo en suspensión más el material o carga de lavado.

- La carga de fondo en suspensión está conformada por las partículas de material del fondo que viajan suspendidas por la corriente.
- El material o carga de lavado es el material fino menor que 0,062 mm, como limos y arcillas, provenientes de la superficie de la cuenca y que son arrastrados por el escurrimiento pluvial al cauce.

Las partículas se mueven en diferentes formas, dependiendo de las condiciones de flujo, la densidad del fluido y las características de los sedimentos. Las fuerzas que tratan de iniciar el movimiento de los sedimentos. Las fuerzas que tratan de iniciar el movimiento de los sedimentos son las de empuje y sustentación que la corriente ejerce, mientras que las

fuerzas que se oponen al movimiento son las de fricción de las partículas al apoyarse unas sobre otras y las de peso propio. (APACLLA NALVARTE, 2014).

Tabla 5. Clasificación del transporte de sedimentos.

Tipo	Concepto teórico	Criterio de cálculo	Utilización
Transporte en la capa de fondo F gF, GF, Qf, QF	Material del fondo que rueda, salta o es arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo.	En función de las características hidráulicas de la corriente, geometría del cauce y las propiedades del sedimento.	- Rectificaciones - Estudios de erosión.
Transporte de fondo en suspensión FS gFS, GFS, qFS, QFS	Material del fondo del cauce que es transportado en suspensión debido a la velocidad y turbulencia de la corriente.	En función de las características hidráulicas de la corriente, la geometría del cauce y las propiedades del sedimento.	- Derivación de ríos para canales y plantas de tratamiento. - Bordes de protección, desvíos temporales y cauces de alivio. - Bombeo directo de un río.
Transporte total de fondo	Material de fondo transportado por la corriente tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión.	La suma del sedimento transportado en la capa de fondo más el suspendido dentro de la corriente.	- Tiempo de azolve en presas derivadoras. - Estabilidad y rectificación de cauces. - Bordes de protección.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, Protección y Control de Cauces, México 2000.

El transporte total de fondo está formado por el material de fondo que es transportado por la corriente, tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión. Por tanto, el transporte de fondo es igual a la suma del arrastre en la capa de fondo más el transporte de fondo en suspensión. (MAZA ÁLVAREZ, y otros, 2007).

Los sedimentos de fondo son aquellos que son transportados por el flujo a través de un proceso de saltación y ocasionalmente, son arrastrados o ruedan en el fondo. Teóricamente se asume que estos sedimentos ocupan una capa en el fondo del río, con un espesor igual a $2d$, siendo d el diámetro de sus partículas.

La carga de sedimentos de fondo, expresada en t/día, o como concentración, en kg/m^3 , este dato es necesario para caracterizar y cuantificar fenómenos de depositación o sedimentación.

No existe un método para medir directamente la carga de sedimentos de fondo en un río. Dependiendo del caso, este valor se obtiene indirectamente como un porcentaje estimado de los sedimentos en suspensión (del 10% al 20% en los ríos de llanura y del 20% al 50%, o más, para ríos de montaña).

También se puede obtener utilizando fórmulas y metodologías empíricas en función de las características hidráulicas y geométricas de la sección. (OCHOA RUBIO, 2011).

2.2.2 Cuantificación del transporte de sedimentos

La evaluación de los diferentes tipos de transporte de sedimentos requiere tanto de los métodos o procedimientos como de información técnica relacionada con las características y propiedades mecánicas de los sedimentos, la hidráulica e ingeniería de ríos, así como de información hidrológica que permita determinar los gastos. De acuerdo con los tipos de

transporte, se cuenta con una gran cantidad de métodos de evaluación, los cuales han sido clasificados en cuatro grupos. (APACLLA NALVARTE, 2014).

El transporte de sedimentos por unidad de tiempo y de ancho (transporte unitario) para su cuantificación puede expresarse en peso o en volumen.

- En peso: $g_x = \text{kgf/s/m}$
- En volumen: $q_x = \text{m}^3/\text{s/m}$

El subíndice x indica la existencia de diferentes tipos de transporte.

Cuando se expresa en volumen, el valor calculado no considera espacios entre las partículas de sedimento, por lo que puede relacionarse g_x con q_x a partir de la expresión siguiente:

$$G_x = \gamma_s Q_x \tag{15}$$

Si el material transportado se deposita durante un periodo de tiempo Δt , el volumen V que ocuparía está dado por:

$$V = \frac{q_x B \Delta t}{1 - \eta} = \frac{g_x B \Delta t}{\gamma_s (1 - \eta)} \tag{16}$$

O bien:

$$V = \frac{Q_x \Delta t}{1 - \eta} = \frac{G_x \Delta t}{\gamma_s (1 - \eta)} \tag{17}$$

Donde:

V = volumen de sedimentos, en m^3 .

g_x = transporte unitario de sedimentos en peso, en kg/s/m .

q_x = transporte unitario de sedimentos en volumen, en $m^3/s/m$.

B = ancho del fondo del cauce, en m.

Δt = intervalo de tiempo, en s.

G_x = transporte de sedimentos en peso que pasa por la sección completa.

Q_x = transporte de sedimentos en volumen que pasa por la sección completa.

η = porosidad.

De acuerdo con el origen del material y el mecanismo de transporte, se consideran seis tipos de transporte de sedimentos, tal como se muestra en la tabla 5: Clasificación del transporte de sedimentos. Esta clasificación permite agrupar de manera conveniente los métodos de cálculo, criterios y fórmulas.

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 con lecho de grava. De acuerdo con Bathurst et al. (1987), la ecuación de Schoklitsch predice razonablemente bien la descarga de sedimentos de fondo en corrientes naturales con suministro ilimitado de sedimentos; precisaron, además, que en corrientes con disponibilidad limitada de sedimentos, la ecuación debe aplicarse para cada clase de tamaño de partículas que arrastra la corriente. Esta ecuación no involucra de manera explícita el esfuerzo hidráulico y el tirante de la corriente, de acuerdo con Bagnold (1980), el no incluir cualquiera de estas variables, podría presentar desventajas para la aplicación de la ecuación de Schoklitsch, en particular, en cauces someros. La ecuación de Schoklitsch tiene la expresión: (BRAVO ESPINOZA, y otros, 2004)

$$\tau_{*c} = \frac{d_c S}{\Delta D} \quad (18)$$

Para $D \geq 0,006$ m

$$G_x = 2500 A_m S^{\frac{1}{3}} (q S^{\frac{7}{6}} - 0,2 \Delta^{\frac{5}{3}} D^{\frac{3}{2}}) \quad (19)$$

$$d_c = 0,076 \frac{\Delta D}{S} \quad (20)$$

Y para $0,0001\text{m} \leq D \leq 0,003\text{m}$

$$G_x = 2500 A_m S^{\frac{1}{3}} (q S^{\frac{7}{6}} - 19,05 \tau_{*c}^{\frac{5}{3}} \Delta^{\frac{5}{3}} D^{\frac{3}{2}}) \quad (21)$$

$$d_c = 0,000285 \frac{\Delta D^{1/3}}{S} \quad (22)$$

Donde:

G_x = Transporte total de sedimentos en peso, en kg/s.

A_m = Ancho medio de la sección, en m.

τ_{*c} = Parámetro adimensional de Shields.

d_c = Tirante crítico para el inicio de arrastre, en m.

S = Pendiente del fondo del canal, en m/m.

Δ = Densidad relativa de la partícula dentro del agua, adimensional.

D = Diámetro de la partícula, para esta fórmula se usa $D=D_{40}$, en m.

q = Caudal unitario de agua $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

(PEÑALOSA OLARTE, y otros, 2010).

Entre las asunciones que fundamentan la ecuación de Schoklitsch figuran:

- Un valor crítico de gasto unitario deberá excederse antes de que ocurra el inicio del desplazamiento del sedimento.
- Existe un movimiento total del lecho no consolidado del cauce una vez que las condiciones críticas se han excedido.
- El tirante y el esfuerzo hidráulico no guardan una relación directa con el arrastre de fondo, debido a que con frecuencia las condiciones críticas sólo son excedidas en una parte del canal natural.
- Un tamaño efectivo de partícula no es suficiente para describir la variación de los tamaños de las partículas de sedimento y de su arrastre.
- Las formas presentes en el fondo del cauce no influyen en el proceso de transporte.
- La fuerza de ascenso no es importante en el proceso de transporte. (PEÑALOSA OLARTE, y otros, 2010)

Fórmula de Bagnold (1980)

La ecuación de Bagnold relaciona el gasto de energía, expresada por el concepto de potencia del caudal, con la tasa de trabajo, representada por la tasa de transporte de sedimentos. Esta expresión se aplica a corrientes con distribución unimodal o bimodal, esto es, que en el tamaño de partículas de sedimento existe una o dos clases con frecuencia máxima. (BRAVO ESPINOZA, y otros, 2004)

La descarga total del arrastre de fondo está dada por:

$$G_x = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} i_{br} A_m \left[\frac{(\omega - \omega_c)}{(\omega - \omega_c)_r} \right]^{3/2} \left[\frac{d}{d_r} \right]^{-2/3} \left[\frac{D_{50}}{D_r} \right]^{-1/2} \quad (23)$$

Donde:

G_x = Transporte total de sedimentos en peso, en kg/s.

γ_s = Peso específico del sedimento seco, en kg/m³.

γ = Peso específico de la fase líquida, en kg/m³.

i_{br} = Proporción del peso del sedimento del cauce de la fracción i , en kgf/m/s.

ω, ω_c = Potencia unitaria del caudal y del umbral unitario de ω , en kgf/m/s.

d, d_r = Tirante de la corriente y valor de referencia para d , en m.

D_{50} = Diámetro del 50% del material sólido, en m.

D_r = Valor de referencia del diámetro de partícula, en m.

A_m = Ancho medio de la sección, en m.

El subíndice r indica valores de referencia que Bagnold extrajo de un estudio de Williams

(1970). Estos son:

$$(\omega - \omega_c)_r = 0,5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} ;$$

$$i_{br} = 0,1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} ;$$

$$d_r = 0,1 \text{ m};$$

$$D_r = 0,0011 \text{ m}$$

La potencia del caudal por unidad de área, medida en el fondo del cauce, es:

$$\omega = \gamma d S V \quad (24)$$

En donde:

ω = Potencia disponible por unidad de longitud y ancho, en kg/m.s.

d = Tirante medio de la sección, en m.

V = Velocidad media de la fase líquida, en m/s.

S = Pendiente de fondo del cauce, en m/m.

El umbral de la potencia unitaria del caudal está dado por:

$$\omega_c = 290 D_{50}^{3/2} \log \left[\frac{12d}{D_{50}} \right] \quad (25)$$

La ecuación de Bagnold depende de varias asunciones:

- La potencia del caudal disponible para el arrastre del sedimento es la energía cinética, la cual permanece constante a lo largo del cauce.
- El transporte es una función inversa del tirante de la corriente y del tamaño de partículas.
- El umbral de la potencia del caudal es definido por un esfuerzo cortante crítico adimensional.
- La distribución de tamaño de partículas se caracteriza por la moda.
- El transporte de partículas no se circunscribe a la vecindad del fondo del cauce
- La potencia de la corriente ejercida sobre el fondo del cauce controla la tasa de arrastre y no la potencia del caudal ejercida sobre las partículas de sedimento.
- Las condiciones de flujo no originan dunas u otras formas en el fondo del cauce.

Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (1982)

La ecuación de Parker, Klingeman y Mc Lean (1982) es una de las pocas ecuaciones desarrolladas a partir de mediciones hechas en corrientes naturales con lecho de grava, basándose única y exclusivamente en datos de campo. En su desarrollo se usó el análisis de similitud. Esta ecuación asume que todos los tamaños de partículas inician, de manera simultánea, su movimiento cuando una condición crítica de disturbio o colapso de la cama del cauce (pavimento) es excedida. Evidencias experimentales y de campo apoyan este concepto de movilidad uniforme (Andrews, 1983). La ecuación de Parker *et al.* predice el arrastre de fondo para condiciones de cuasi-equilibrio, en corrientes con fondo no consolidado, de tamaño medio, de pendiente moderada y con presencia de grava, pero sin acumulaciones importantes de arena en el fondo del cauce (Parker, 1990).

La tasa de transporte de fondo, en peso seco, está definida por:

$$G_x = 1400 \left(\frac{W^* g^{1/2} (dS)^{3/2}}{2,65} \right) \quad (26)$$

Donde:

G_x = Transporte total de sedimentos en peso, en kg/m/s.

g = Aceleración de la gravedad, en m/s².

d = Tirante medio de la sección, en m.

S = Pendiente de fondo del cauce, en m/m.

Para $\phi_{50} < 0,95$

$$W^* = 0,0025 \phi_{50}^{14,2} \quad (27)$$

Para $0,95 < \phi_{50} < 1,65$

$$W^* = 0,0025 e^{[14,2(\phi_{50}-1)-9,28(\phi_{50}-1)^2]} \quad (28)$$

Para $\phi_{50} > 1,65$

$$W^* = 11,2 \left[1 - \frac{0,822}{\phi_{50}} \right]^{4,5} \quad (29)$$

$$\phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{0,0876} \quad (30)$$

$$\tau_{50}^* = \frac{0,606 R_h S}{D_{50sub}} \quad (31)$$

En donde:

ϕ_{50} = Esfuerzo hidráulico normalizado para el tamaño de partícula D_{50sub} ;

τ_{50}^* = Esfuerzo hidráulico adimensional para D_{50sub} .

D_{50sub} = Mediana de la distribución de tamaño de partículas de la sub-superficie del lecho del cauce (L).

Entre las asunciones de la ecuación de Parker, Klingeman y Mc Lean, figuran:

- Todas las partículas de un cauce, finas y gruesas, de manera aproximada, son igualmente móviles al inicio de su desplazamiento y durante el proceso de transporte para un mismo valor de esfuerzo cortante.
- La distribución del tamaño de partículas permanece constante durante ascensos en el gasto de la corriente.
- Para un rango amplio de gastos está presente un pavimento formado con materiales granulares gruesos.

- La descarga del arrastre de fondo es función de la mediana del tamaño de partículas de la sub-superficie del lecho.
- El esfuerzo crítico de Shields (0.06) no representa un buen parámetro de la condición de umbral para el colapso del lecho de grava (pavimento).
- La habilidad de la corriente, medida en términos del tamaño máximo de partícula que puede transportar, carece de significado en un contexto de arrastre cuasi-uniforme de partículas.
- El concepto de cauce con pavimento formado por partículas gruesas es esencial en la formulación de la hipótesis de movilidad uniforme.

Fórmula de Mizuyama y Shimohigashi (1985)

Se considera que presenta buenos resultados en cauces de montaña, para determinar el caudal sólido (BRICEÑO BRICEÑO, 2017). A partir de experiencias en cauces de fuerte pendiente proponen para fluido sin concentración significativa de finos en suspensión:

$$G_x = 20A_m \frac{S^2}{\Delta^2} \frac{q}{\sqrt{g\Delta D_{50}^3}} \quad (32)$$

En donde:

G_x = Transporte total de sedimentos en peso, en kg/s.

S = Pendiente de fondo del cauce en m/m.

Δ = Densidad relativa de la partícula dentro del agua, adimensional.

q = Caudal unitario de agua m³/s/m.

g = Aceleración de la gravedad 9,81 kg/s².

D_{50} = Diámetro del 50% del material sólido, en m.

A_m = Ancho medio de la sección, en m.

Fórmula de Bathurst, Graf y Cao (1987)

Esta relación expresa el transporte de sedimentos en función de la pendiente y el caudal. El cálculo de la capacidad de transporte sólido de fondo se basa en la ecuación de Schoklitsch: (LÓPEZ ALONSO, 2004)

$$G_x = 2.5 S^{3/2} \gamma (q - q_c) A_m \quad (33)$$

En donde:

G_x = Transporte total de sedimentos en peso, en kg/s.

S = Pendiente de fondo del cauce en m/m.

γ = Peso específico de la fase líquida, en kg/m³.

q_c = Caudal crítico unitario en m³/s/m.

q = Caudal unitario en m³/s/m.

A_m = Ancho medio de la sección, en m.

El caudal crítico unitario se puede calcular para sedimentos de granulometría uniforme y con una pendiente entre 0,25 y 20%.

$$q_c = 0.15 S^{-1.12} \sqrt{g D_{50}^3} \quad (34)$$

En donde:

g = Aceleración de la gravedad 9,81 kg/s².

D_{50} = Diámetro del 50% del material sólido.

Los autores comprobaron que si D_{50} se toma como el de la capa superficial se obtiene un valor de q_c muy superior al registrado, mientras si se emplea el de la capa subsuperficial se infracalcula ligeramente.

Para pendientes entre 0,25 y 10% se recomienda:

$$q_c = 0.21 S^{-1.12} \sqrt{g D_{16}^3} \quad (35)$$

Donde D_{16} corresponde a la capa superficial de sedimento.

D_{16} = Diámetro del 16% del material sólido.

El caudal sólido unitario, está dado por:

$$q_x = \frac{2,5S^{\frac{3}{2}}}{\frac{\gamma_s}{\gamma}} (q - q_c) \quad (36)$$

Tiempo de Concentración.

Es el intervalo que transcurre entre el fin del período de precipitación y el fin de la escorrentía directa en el hidrograma. Este intervalo representa el movimiento de la escorrentía proveniente del lugar más remoto de la cuenca hidrológica.

Es aquel tiempo en el cual la gota ubicada en el punto más lejano llega a la salida de la cuenca. Este tiempo de concentración puede variar desde unos pocos minutos hasta una o más horas, dependiendo fundamentalmente de las condiciones fisiográficas de la cuenca.

Llamado también tiempo de viaje o de equilibrio, es el tiempo que demora en recorrer una partícula de agua (gota) desde el punto más lejano, hasta el punto emisor.

El tiempo de concentración t_c , se puede estimar con la ecuación de Kirpich

$$t_c = 0,000325 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (37)$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del cauce principal, en m.

S = Pendiente del cauce, en m/m.

2.3 Definición de términos básicos

Aforo: Medición de la cantidad de agua que lleva una corriente en unidad de tiempo

Rugosidad: Conjunto de irregularidades de la capa de fondo del lecho del río, respecto a una capa idealmente lisa, se representa por el tamaño y la forma de los granos que forma el perímetro mojado y que producen un efecto retardante sobre el flujo.

Fuerza tractiva crítica: Es aquella originada por el agua en el fondo de un cauce y que inicia el movimiento de las partículas sólidas ubicadas en dicha profundidad. La fuerza tractiva crítica también se presenta en profundidades por debajo del lecho del río.

Sedimentos: Partículas procedentes de las rocas o suelos que se encuentran en la cuenca y que luego son acarreadas por las aguas que escurren.

Tamaño de partícula: También conocida como graduación, se refiere a las proporciones por masa seca de un suelo distribuido en rangos de tamaño de partículas específicos. Se utiliza para clasificar los suelos con fines ingenieriles o agrícolas, ya que el tamaño de las partículas afecta la rapidez con la que el agua u otro fluido se mueve a través el suelo.

Caudal dominante: Es aquel caudal a cauce lleno que desarrolla una acción modeladora del mismo, determinando la geometría hidráulica del río.

Transporte de sedimentos: Traslado de materiales erosionados de un lugar a otro para ser sedimentados. El transporte de sedimentos es posterior a la erosión o arranque de materiales, y anterior a su sedimentación o depósito. Consiste en una traslación de materiales, motivada por el agua.

Gasto sólido: Cantidad de partículas, en unidades de peso o volumen, que pasa por una sección determinada en la unidad de tiempo. Las unidades que se usan frecuentemente para el gasto sólido son: N/s, kg/día, t/mes, m³/año, etc. el gasto sólido puede expresarse también por unidad de ancho, de río o canal, y entonces se llama gasto sólido específico.

Volumen de sedimentos: Cantidad (en m³) de partículas sólidas transportadas por un río en un determinado tiempo y que en algunos tramos del río (curvas) se depositan después de una máxima avenida.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación espacial

3.1.1 Geográfica

Tabla 6. Coordenadas UTM de ubicación del tramo en estudio del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche.

UBICACIÓN	GEOREFERENCIACIÓN		
	ESTE	NORTE	ALTITUD
Punto más alto	787293,602	9216161,060	2916,755 m.s.n.m.
Punto más bajo	787155,511	9216005,393	2909,955 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

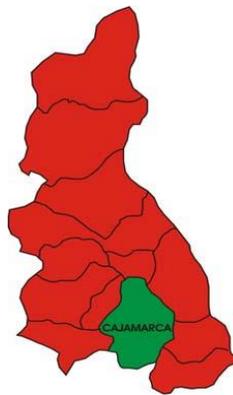
3.1.2 Política

La central hidroeléctrica El Chicche, se encuentra ubicada en la Región Cajamarca, provincia de Cajamarca, Distrito de Baños del Inca, en el caserío de Rinconada Otuzco.

Figura 4. Ubicación política de la zona de estudio



Región: Cajamarca
Fuente: Elaboración propia



Provincia: Cajamarca



Distrito: Baños del Inca

3.1.3 Referencial

Figura 5. Ubicación referencial de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Ubicación temporal

La investigación se realizó durante los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016.

3.2 Equipos y materiales utilizados en la investigación

3.2.1 Equipos de campo

- Velocímetro digital: Global wáter, modelo FP 211
- Tubo de Pitot
- Cámara fotográfica
- Estación total Leica TS-06
- Trípode

- Bastón y prisma topográfico
- Calculadora Texas voyage 200

3.2.2 Equipos de gabinete

- Laptop Sony Vaio core i3
- Impresora multifuncional HP 2050

3.2.3 Materiales

- Herramientas manuales: estacas, wincha, cordel, ganchos separadores, etc.
- Software AutoCAD Civil 3D 2016, Microsoft Excel 2010, Microsoft Word 2010, Microsoft Power Point 2010.
- Materiales de escritorio: papel blanco 80 gr., libreta de apuntes, lapiceros, etc.

3.3 Procedimiento

3.3.1 Visita de campo a la zona de estudio

- Visita a la zona de estudio para conocer sus características generales, y seleccionar el tramo de estudio del río Chonta.
- Toma de fotografías del tramo de estudio.
- Identificación de zonas con visible acumulación de sedimentos, considerándolos como posibles puntos de muestreo de sedimentos. (ver figura 25 del Anexo 01)
- Identificación de un tramo recto ubicación de una sección de aforo a 100 m aguas arriba de la captación El Chicche.

3.3.2 Morfología del río

- Levantamiento topográfico de 165 m aguas arriba y 123 m aguas abajo de la captación El Chicche, haciendo un total de 288 m del tramo del río Chonta.

- Elaboración del plano topográfico a curvas de nivel del tramo en estudio del río Chonta (288 m, ver figura 24 del Anexo 01).
- Se determinó el perfil longitudinal del eje del tramo en estudio del río Chonta así como, la pendiente longitudinal de fondo del cauce (ver figura 24 del Anexo 01).

3.3.3 Caudales del río

- Medición de la sección de aforo del río a 100m aguas arriba de la captación El Chicche.
- Medición semanal de las velocidades del agua en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 en las secciones de aforo del río Chonta.
- Cálculo de los caudales aforados en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, mediante la fórmula 2.

3.3.4 Sedimentos del río

- Muestreo de sedimentos a lo largo de 288 m del río Chonta, en el tramo seleccionado para el estudio (captación El Chicche). En total se obtuvieron 10 puntos de muestreo de sedimentos (ver tabla 8), de los cuales se extrajeron 167,95 kg de muestra, para su posterior estudio de mecánica de suelos.
- Secado de la muestra extraída y tamizado por el método ASTM E-11, para el tamizado desde el tamiz de 2,5” hasta el tamiz N° 200 (ver tabla 9).
- Elaboración de la curva granulométrica de los sedimentos (ver figura 7).
- Determinación de la densidad relativa, densidad aparente y el peso específico de los sedimentos (ver tablas 10 y 11; ver figuras 20 y 21 del Anexo 01).
- Medida del volumen de sedimentos acumulados en el desarenador de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche en enero y febrero.

3.3.5 Gasto sólido del río

Se estimó el gasto sólido de fondo del río Chonta, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, mediante aplicación de las fórmulas de Schoklitsch, de Bagnold, de Parker, Klingeman y Mc Lean, de Mizuyama y Shimohigashi, de Bathurst, Graf y Cao (ver tabla 12).

3.3.6 Validación de fórmula empírica

Comparando las mediciones de sólidos y caudal realizadas en el desarenador de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche (ver figuras 22 y 23) y las fórmulas empíricas aplicadas se determinó que la fórmula cuyos resultados se aproximan a las mediciones realizadas.

3.3.7 Volumen de sedimentos

Posterior a la validación de la fórmula empírica se estimó el volumen de sedimentos debido al transporte de fondo del río Chonta, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, mediante aplicación de la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (ver tabla 19).

3.4 Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados

3.4.1 Tratamiento y análisis de datos

Características del río Chonta en el tramo de estudio.

El río Chonta en el tramo de estudio desde el punto de vista fluvial es recto, con una pendiente longitudinal de 2,34%, un ancho promedio de 11,25 m y profundidad media de 0,36 m, en el que se presentan flujos con velocidades de 0,46 m/s a 1,37 m/s, con

rugosidad hidráulica característico de un río de montaña, con sólidos que presentan una granulometría no uniforme (ver figuras 8, 12, 14, 17 y 18 del Anexo 01).

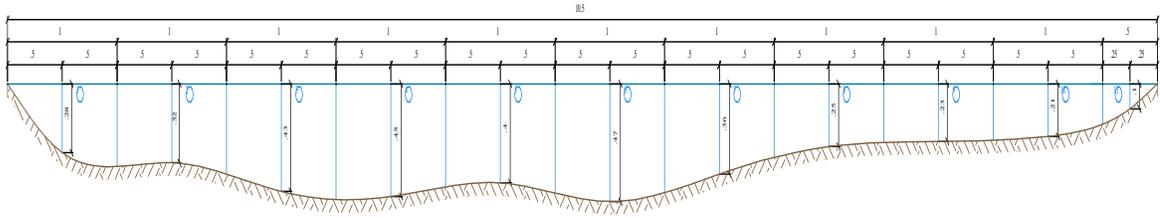
La morfología del río Chonta, en una longitud de 288m, ha sido obtenida mediante un levantamiento topográfico a curvas de nivel con equidistancia de 0,50m tal como se muestra en las figuras 24 y 25, entre las coordenadas mostradas en la tabla 8, Coordenadas UTM de ubicación del tramo en estudio del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche.

- **Ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos.** Los puntos de muestreo presentan una geología uniforme y similar, no están demasiado alejados del área de estudio, y han sido recolectados en un total de 10 zonas diferentes.
- **Ubicación de la sección de aforo.** Se ha ubicado una sección de aforo, teniendo en cuenta un tramo recto con caudal uniforme en toda la sección transversal, así como la inexistencia de rocas grandes a lo largo de la sección transversal a fin de que no interfieran en la medición del caudal, estas secciones está ubicada a 100m aguas arriba de la captación El Chicche.

Secciones de aforo

La sección del río en la cual se llevó a cabo los aforos en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 está ubicada a 100m aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche. La sección hidráulica muestra un ancho grande comparado con la profundidad del flujo, de forma aproximadamente rectangular, de 11,25m por 0,36 m, respectivamente. (Ver tabla 15)

Figura 6. Sección de aforo del río Chonta a 100m, aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche.



Fuente: Elaboración propia

Medida de velocidades del agua

La velocidad media del flujo en las secciones de aforo, medida en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 varían desde 0,46 m/s a 1,37 m/s. (Ver tabla 9)

Caudales de aforo

Los caudales determinados en las secciones de aforo, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 también varían desde 1,29 m³/s a 9,84 m³/s. (Ver tabla 7)

Tabla 7. Caudales de aforo del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche

FECHA	Área (m ²)	Velocidad media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
03/01/2016	2,92	0,61	2,09
10/01/2016	3,65	0,72	2,67
17/01/2016	4,61	0,87	3,36
24/01/2016	2,48	0,46	1,29
31/01/2016	7,67	1,37	9,84
07/02/2016	4,49	0,83	2,98
14/02/2016	4,90	0,92	3,96
21/02/2016	3,31	0,67	2,05
27/02/2016	5,02	0,93	4,73
04/03/2016	6,73	1,28	9,22
13/03/2016	2,53	0,56	1,59
20/03/2016	2,65	0,56	1,81
27/03/2016	2,52	0,55	1,61
03/04/2016	3,67	0,72	2,70
10/04/2016	6,06	1,04	5,02
17/04/2016	5,80	1,03	4,92
24/04/2016	3,41	0,69	2,46
30/04/2016	2,88	0,60	1,87

Fuente: Elaboración propia

Área promedio = 4,18 m²

Caudal dominante

El caudal dominante resultó de la aplicación fórmula 6, considerando al área promedio como el área correspondiente al cauce con caudal dominante:

Área promedio = 4,18 m² = 44,99 pie²

$$Q = 4,0 (44,99)^{1.21} 0,0234^{0.28}$$

$$Q = 139,877 \frac{pie^3}{s} = 3,96 m^3/s$$

Este valor indica que a partir de un caudal mayor o igual a 3,96 m³/s empieza a ocurrir un transporte de sedimentos considerable, observándose también turbiedad en el río.

Sedimentos del río

Los puntos de muestreo de los sedimentos del tramo de estudio del río Chonta, están ubicados tal como se indica en la tabla 8 y en la figura 25.

Tabla 8. Puntos de muestreo de sedimentos aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.

Puntos de muestreo de sedimentos			
Punto	Este	Norte	Cota
P1	787296,62	9216150,45	2916,75
P2	787288,86	9216135,18	2916,41
P3	787302,45	9216098,12	2914,78
P4	787287,62	9216072,19	2915,52
P5	787291,80	9216045,21	2914,51
P6	787280,54	9216024,25	2914,11
P7	787267,78	9216020,42	2913,52
P8	787240,60	9215977,95	2911,39
P9	787233,28	9216001,66	2914,26
P10	787189,77	9215999,42	2911,35

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el método volumétrico, obteniéndose una muestra de 167,95 Kg, constituida por arena, grava y guijarros.

Granulometría de sedimentos

La granulometría de los sedimentos se obtuvo mediante tamizado en seco hasta tamaño de partículas hasta 3", tal como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Granulometría de sedimentos del río Chonta aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.

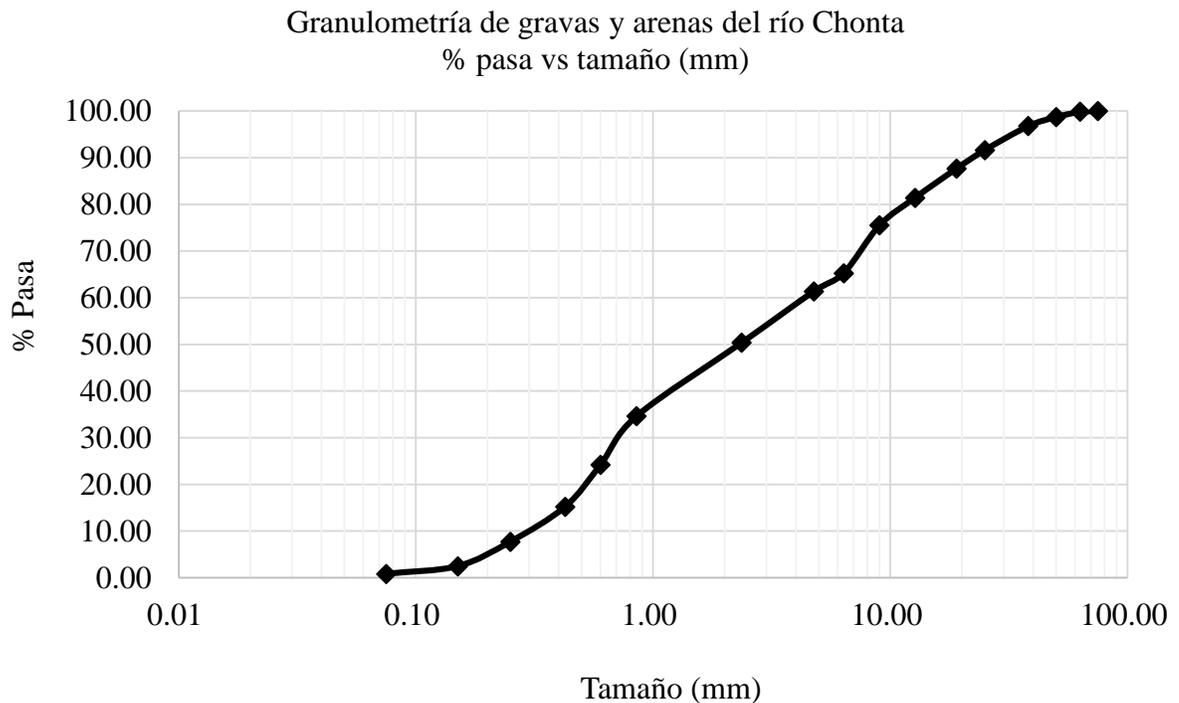
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido del material (g)	Porcentaje del peso retenido del material (%)	Porcentaje del peso retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3"	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2 ½"	63,00	192,00	0,11	0,11	99,88
2"	50,00	1913,00	1,14	1,25	98,75
1 ½"	38,10	3261,00	1,94	3,19	96,81
1"	25,00	8618,00	5,13	8,33	91,67
¾"	19,00	6660,00	3,97	12,29	87,71
½"	12,70	10528,00	6,27	18,56	81,44
⅜"	9,00	9913,00	5,90	24,46	75,54
¼"	6,35	17255,00	10,27	34,74	65,26
N° 4	4,75	6544,00	3,90	38,63	61,37
N° 8	2,36	18472,00	11,00	49,63	50,37
N° 20	0,85	26462,45	15,76	65,39	34,61
N° 30	0,60	17433,00	10,38	75,77	24,24
N° 40	0,43	15165,50	9,03	84,79	15,21
N° 60	0,25	12571,50	7,49	92,28	7,72
N° 100	0,15	8803,50	5,24	97,52	2,48
N° 200	0,08	2763,00	1,65	99,17	0,83
Cazoleta	-----	1400,00	0,83	100,00	0,00
Total (g) =			167954,95		

Fuente: Elaboración propia

La curva granulométrica de los sedimentos se muestra en la figura 7.

Esta curva muestra que las partículas sólidas que transporta el río Chonta aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche tiene una distribución de sólidos bien gradados y de grano grueso, con un coeficiente de uniformidad de $C_{UN}=14,68$.

Figura 7. Curva granulométrica de los sedimentos del río Chonta aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.



Fuente: Elaboración propia

La figura 7, indica que los sedimentos están bien gradados, de donde obtenemos:

$$D_{15.9} = 0,0004 \text{ m}$$

$$D_{16} = 0,0004 \text{ m}$$

$$D_{30} = 0,0007 \text{ m}$$

$$D_{35} = 0,0009 \text{ m}$$

$$D_{40} = 0,0014 \text{ m}$$

$$D_{50} = 0,0023 \text{ m}$$

$$D_{60} = 0,0045 \text{ m}$$

$$D_{84} = 0,0153 \text{ m}$$

$$D_{84.1} = 0,0154 \text{ m}$$

$$D_{90} = 0,0225 \text{ m}$$

$$D_m = 0,0067 \text{ m}$$

$$n' = 0,020 \text{ m}^{1/6}$$

Densidad aparente de los sedimentos

La densidad aparente de los sedimentos, se obtuvo tomando en cuenta la porosidad y la humedad de las muestras tal como se encontraron en el lecho del río. Ver tabla 10.

Tabla 10. Densidad aparente de los sedimentos (in situ) del río Chonta aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche

Muestra	Peso in situ (kg)	Volumen in situ (m^3)	Peso seco (kg)	Densidad aparente (kg/m^3)	Densidad aparente promedio -pa (kg/m^3)
M1	5,35	0,00245	3,95	1612,24	
M2	4,75	0,00240	3,35	1395,83	1514,89
M3	3,65	0,00205	3,15	1536,59	

Fuente: Elaboración propia

Densidad relativa o peso específico de sedimentos

Tabla 11. Densidad relativa o peso específico de sedimentos (kg/m^3), del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.

Muestra	Peso de la muestra seca- W_s (kgf)	Volumen inicial- V_i (m^3)	Volumen final- V_f (m^3)	Peso específico- γ_s (kgf/m^3)	Peso específico promedio- γ_{prom} (kgf/m^3)
M ₁	0,52	0,0005	0,0007	2490,48	
M ₂	0,58	0,0005	0,0007	2618,18	2636,22
M ₃	0,56	0,0005	0,0007	2800,00	

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la fórmula 10, obtenemos la densidad relativa de la arena gruesa y grava:

$$\Delta = 1,64$$

Porosidad

La porosidad de los sedimentos la hallamos aplicando la fórmula 9, tenemos:

$$\eta = 1 - \frac{1514,89}{2553,16}$$

$$\eta = 0,41$$

Validación de fórmula empírica

Para comparar las mediciones de sólidos y caudal en el desarenador de la captación El Chicche, primero se realizaron mediciones en el cauce y se estimaron el gasto sólido de fondo y el volumen generado, aplicando diferentes fórmulas empíricas.

Tabla 12. Gasto sólido de fondo del río Chonta (kg/s), aguas arriba de la captación El Chicche, aplicando diferentes fórmulas.

Año 2018	Caudal aforado del río Chonta (m ³ /s)	Schoklitsch	Bagnold	Parker, Klingeman y Mc Lean	Mizuyama y Shimohigashi	Bathurst, Graf y Cao
Enero	3,98	35,59	31,54	14,98	36,27	35,58
Febrero	4,55	40,71	37,33	16,09	41,48	40,70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Volumen de sólidos de fondo del río Chonta durante el tiempo de concentración de la cuenca (m³), aplicando diferentes fórmulas.

Año 2018	Tiempo de concentración de la cuenca (s)	Caudal aforado del río Chonta (m ³ /s)	Schoklitsch	Bagnold	Parker, Klingeman y Mc Lean	Mizuyama y Shimohigashi	Bathurst, Graf y Cao
Enero	12024	3,98	273,59	242,44	115,13	278,79	273,52
Febrero	12024	4,55	312,93	286,99	123,72	318,84	312,86

Fuente: Elaboración propia

Se aforó el caudal derivado de la central hidroeléctrica El Chicche y se estimó la proporción de volumen de sedimentos que acumula en el desarenador de dicha captación.

Tabla 14. Caudal derivado a la C.H. y volumen de sólidos medido en el desarenador de la captación El Chicche (m³).

Año 2018	Caudal aforado, derivado a la CH El Chicche (m ³ /s)	Volúmen de sólidos medido en el desarenador de la captación El Chicche (m ³)
Enero	1,20	1,03
Febrero	1,24	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Presentación de resultados

Gasto sólido de fondo del río Chonta, con caudales aforados de enero a abril de 2016

El gasto sólido de fondo del río Chonta en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aguas arriba de la captación El Chicche, se calculó mediante las fórmulas de Schoklitsch, de Bagnold, de Parker, Klingeman y Mc Lean, de Mizuyama y Shimohigashi, de Bathurst, Graf y Cao, utilizando los caudales aforados.

Los datos obtenidos en campo, son el área, la velocidad media; los datos obtenidos en gabinete son el caudal, perímetro mojado, radio hidráulico, el coeficiente de rugosidad de Manning "n", el ancho medio del cauce y el tirante medio, los cuales han sido ordenados ascendentemente, identificando claramente el caudal dominante de 3,96 m³/s, como se puede apreciar en las siguiente tablas.

Tabla 15. Características de las secciones de aforo aguas arriba de la captación El Chicche

Caudal (m ³ /s)	Perímetro Mojado (m)	Ancho medio (m)	Radio Hidráulico (m)	Coefficiente de rugosidad de Manning "n"	Tirante medio (m)
1,29	12,25	10,75	0,20	0,11	0,26
1,59	10,64	10,45	0,24	0,11	0,27
1,61	10,81	10,63	0,23	0,11	0,28
1,81	10,83	10,75	0,24	0,11	0,30
1,87	10,85	10,75	0,27	0,11	0,29
2,05	10,87	10,84	0,30	0,10	0,28
2,09	10,95	10,87	0,27	0,10	0,31
2,46	10,95	11,00	0,31	0,10	0,32
2,67	10,96	11,00	0,33	0,10	0,34
2,70	11,07	11,00	0,33	0,10	0,34
2,98	11,10	11,25	0,40	0,10	0,32
3,36	11,16	11,65	0,41	0,10	0,33
3,96	11,24	11,65	0,44	0,10	0,37
4,73	11,30	11,87	0,44	0,10	0,43
4,92	11,35	11,87	0,51	0,09	0,40
5,02	11,69	11,93	0,52	0,09	0,40
9,22	12,22	12,06	0,55	0,08	0,60
9,84	13,24	12,12	0,58	0,08	0,59

Fuente: Elaboración propia

Para el caudal aforado inmediato superior al caudal dominante se tiene:

Tabla 16. Datos obtenidos en campo para el caudal 3,96 m³/s

Caudal (m ³ /s)	Perímetro Mojado (m)	Ancho medio (m)	Radio Hidráulico (m)	Coefficiente de rugosidad de Manning "n"	Tirante medio (m)
3,96	11,24	11,65	0,44	0,10	0,37

Fuente: Elaboración propia

Fórmula de Schoklitsch

Determinamos el tirante crítico para el inicio de arrastre:

$$D = D_{40} = 0,0014\text{m}$$

Como $0,0001\text{m} \leq D \leq 0,003\text{m}$, aplicamos la fórmula 22 para hallar el diámetro crítico y la fórmula 21 para hallar el gasto sólido:

$$d_c = 0,000285 \frac{(1,64)0,0014^{1/3}}{0,0234}$$

$$d_c = 0,0022$$

Determinamos el parámetro adimensional de Shields:

$$S = 0,0234 \text{ m/m}$$

$$\tau_{*c} = \frac{(0,0022)(0,0234)}{(1,64)(0,0014)}$$

$$\tau_{*c} = 0,023$$

Reemplazando los valores obtenidos del diámetro crítico y el parámetro adimensional de Shields en la fórmula 21, tenemos:

$$G_x = 2500(11,65)(0,0234)^{\frac{1}{3}} \left[\left(\frac{3,96}{11,65} \right) (0,0234)^{\frac{7}{6}} - 19,05(0,023)^{5/3} 1,64^{5/3} 0,0014^{1/3} \right]$$

$$G_x = 35,38 \text{ kg/s}$$

Fórmula de Bagnold

Para la aplicación de esta fórmula debemos considerar los valores de referencia que Bagnold extrajo de Williams (1970), estos son:

$$i_{br} = 0,1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} ;$$

$$(\omega - \omega_c)_r = 0,5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} ;$$

$$d_r = 0,1 \text{ m};$$

$$D_r = 0,0011 \text{ m}$$

También debemos calcular la potencia del caudal por unidad de área, aplicando la fórmula 24, tenemos:

$$\omega = 1000(0,37)(0,0234)(0,92)$$

$$\omega = 7,95 \text{ kg/m/s}$$

Calculamos el umbral de potencia unitaria, aplicando la fórmula 25, tenemos:

$$\omega_c = 290(0,00232^{\frac{3}{2}}) \log \frac{12(0,37)}{0,00232}$$

$$\omega_c = 0,11 \text{ kg/m/s}$$

Aplicando la fórmula 23, calculamos la descarga total del arrastre de fondo:

$$G_x = \frac{2636,22}{2636,22 - 1000} (0,1)(11,87) \left[\frac{13,93 - 0,114}{0,5} \right]^{\frac{3}{2}} \left[\frac{0,44}{0,1} \right]^{-\frac{2}{3}} \left[\frac{0,00232}{0,0011} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$G_x = 33,51 \text{ kg/s}$$

Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean.

Para esta fórmula, calcularemos primero el esfuerzo hidráulico adimensional para $D_{50\text{sub}}$, aplicando la fórmula 31, tenemos:

$$\tau_{50}^* = \frac{(0,606)(0,44)(0,0234)}{(0,00232)}$$

$$\tau_{50}^* = 2,66$$

Ahora, calcularemos el esfuerzo hidráulico normalizado para el tamaño de partícula $D_{50\text{sub}}$, aplicando la fórmula 30 y reemplazando el valor del esfuerzo hidráulico adimensional, tenemos:

$$\phi_{50} = \frac{2,69}{0,0876}$$

$$\phi_{50} = 30,35$$

$$W^* = 11,2 \left[1 - \frac{0,822}{30,35} \right]^{4,5}$$

$$W^* = 9,90$$

Aplicando la fórmula 26, tenemos:

$$G_x = 1400 \left(\frac{(9,90)9,81^{1/2}(0,37(0,0234))^{3/2}}{2,65} \right)$$

$$G_x = 13,21 \text{ kg/s}$$

Fórmula de Mizuyama y Shimohigashi.

Aplicando la fórmula 32, tenemos:

$$G_x = 20 (11,65) \frac{0,0234^2}{1,64^2} \frac{(3,96/11,65)}{\sqrt{9,81(1,64)0,00232^3}}$$

$$G_x = 36,05 \text{ kg/s}$$

Fórmula de Bathurst, Graf y Cao.

Como la pendiente de fondo del área en estudio es 2,34%, aplicando la fórmula 35, tenemos:

$$D_{16} = 0,00044 \text{ m}$$

$$q_c = 0,21 (0,0234)^{-1,12} \sqrt{(9,81)0,00044^3}$$

$$q_c = 0,00041 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Reemplazando el valor de q_c en la fórmula 36, tenemos:

$$q_x = \frac{2,5 (0,0234)^{3/2}}{\left(\frac{2636,22}{1000}\right)} \left(\frac{3,96}{11,65} - 0,00041 \right)$$

$$q_x = 0,0012 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Aplicando la fórmula 15, obtenemos el gasto sólido total, cuyo valor es el mismo que se aplica la fórmula 33:

$$G_x = (0,0012)(11,65)(2636,22)$$

$$G_x = 35,37 \text{ kg/s}$$

Tabla 17. Cuadro resumen de los valores obtenidos para el gasto sólido de fondo (kg/s) del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, para los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aplicando diferentes fórmulas.

Caudal (m ³ /s)	Schoklitsch	Bagnold	Parker, Klingeman y Mc Lean	Mizuyama y Shimohigashi	Bathurst, Graf y Cao
1,29	11,50	7,90	6,75	11,74	11,49
1,59	14,23	10,82	7,53	14,52	14,22
1,61	14,39	10,84	7,60	14,68	14,39
1,81	16,13	12,19	8,63	16,45	16,12
1,87	16,72	13,12	8,44	17,05	16,71
2,05	18,28	15,20	8,39	18,65	18,28
2,09	18,70	14,64	9,56	19,07	18,69
2,46	22,01	18,33	10,28	22,44	22,01
2,67	23,86	20,13	11,11	24,32	23,85
2,70	24,15	20,43	11,19	24,62	24,14
2,98	26,67	24,49	10,51	27,19	26,66
3,36	30,05	28,17	11,09	30,62	30,04
3,96	35,38	33,51	13,21	36,05	35,37
4,73	42,32	39,53	16,46	43,12	42,32
4,92	44,01	43,75	15,21	44,84	44,00
5,02	44,87	44,83	15,32	45,72	44,87
9,22	82,50	86,20	27,72	84,02	82,49
9,84	88,01	95,22	27,57	89,63	88,00

Fuente: Elaboración propia

Volumen de sedimentos del río chonta

Calculamos el tiempo de concentración, aplicando la fórmula 1.

Datos:

$$L = 25,1 \text{ km} = 25100 \text{ m (Fuente: SISA 2010)}$$

$$S = 0,0234 \text{ m/m}$$

$$t_c = 0,000325 \frac{25,100^{0,77}}{0,0234^{0,385}}$$

$$t_c = 3,34 \text{ horas}$$

El valor de la porosidad ha sido hallado en la sección 3.4.1 de este documento, mediante la aplicación de la fórmula 9.

Posterior a la comparación de mediciones de sólidos y caudal en el desarenador de la captación El Chicche se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 18. Volumen de sólidos de fondo del caudal derivado a la C.H. El Chicche, durante el tiempo de concentración de la cuenca (m^3), aplicando diferentes fórmulas

Año 2018	Tiempo de concentración de la cuenca (s)	Caudal aforado, derivado a la C.H. El Chicche (m^3/s)	Schoklitsch	Bagnold	Parker, Klingeman y Mc Lean	Mizuyama y Shimohigashi	Bathurst, Graf y Cao
Enero	12024	1,20	82,46	73,07	34,70	84,02	82,44
Febrero	12024	1,24	94,31	86,49	37,29	96,10	94,29

Fuente: Elaboración propia

Los volúmenes medidos para los caudales aforados, derivados a la C.H. El Chicche comparados con los volúmenes calculados para las diferentes fórmulas empíricas son muy distantes, se identifica que el resultado que arroja la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean es el más aceptable en comparación de las otras fórmulas estudiadas.

En la tabla 19 se presentan los valores del volumen de sedimentos transportados en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, con la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean.

Tabla 19. Gasto sólido de fondo y volumen de sedimentos transportados durante el tiempo de concentración, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, con la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean.

Caudal (m ³ /s)	Gasto sólido de fondo (Kg/s)	Volumen de sólidos de fondo (m ³)
1.29	6,75	51,88
1.59	7,53	57,86
1.61	7,60	58,45
1.81	8,63	66,37
1.87	8,44	64,86
2.05	8,39	64,52
2.09	9,56	73,51
2.46	10,28	79,01
2.67	11,11	85,39
2.70	11,19	86,05
2.98	10,51	80,76
3.36	11,09	85,25
3.96	13,21	101,54
4.73	16,46	126,50
4.92	15,21	116,92
5.02	15,32	117,76
9.22	27,72	213,08
9.84	27,57	211,92

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Caudal del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche

En los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 se realizaron una serie de aforos que arrojan la siguiente tabla:

Tabla 20. Caudales mínimos y máximos aforados de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aguas arriba de la captación El Chicche.

Mes	Caudal Mín. (m ³ /s)	Caudal Máx. (m ³ /s)
Enero	1,29	9,84
Febrero	2,05	4,73
Marzo	1,59	9,22
Abril	1,87	5,02

Fuente: Elaboración propia

Los valores mínimos de los caudales aforados indican que hay poco o nulo transporte de sedimentos de fondo, ya que de acuerdo al valor estimado para el caudal dominante, $Q=3,96 \text{ m}^3/\text{s}$, indica que a partir de dicho caudal empieza a ocurrir un transporte de sedimentos considerable, que puede afectar la morfología del cauce.

4.2 Gasto sólido de fondo que transporta el río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche

En la tabla 17 se presenta el cuadro resumen de los valores obtenidos para el gasto sólido de fondo (kg/s) del río Chonta, aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica El

Chicche, para los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aplicando las fórmulas de Schoklitsch, de Bagnold, de Parker, Klingeman y Mc Lean, de Mizuyama y Shimohigashi, de Bathurst, Graf y Cao; donde se visualiza que las fórmulas de Schoklitsch, de Bagnold, de Mizuyama y Shimohigashi, de Bathurst, Graf, estiman valores cercanos entre sí, todas estas ecuaciones fueron obtenidas de forma empírica y a pesar de que tienen su fundamento en diferentes enfoques, las ecuaciones poseen principios generales comunes. Estos son: el modo de circulación del agua y sedimento que corresponden a un régimen continuo y uniforme; la disponibilidad de sedimento para su transporte debe ser menor o igual a la capacidad de transporte de la corriente natural; y existe una relación única entre la tasa de transporte de los sedimentos y los parámetros hidráulicos y sedimentológicos que se analiza en cada fórmula en particular.

La fórmula de Bathurst, Graf y Cao se basa en la ecuación previa de Schoklitsch y considera el exceso de caudal sobre el caudal crítico requerido para iniciar el movimiento de las partículas, también ofrece la facilidad de no incorporar el tirante como parámetro constitutivo de su ecuación.

Sin embargo, la ecuación de Parker, Klingeman y Mc Lean, es la única fórmula aplicada en esta investigación, que ha sido desarrollada a partir de mediciones hechas en corrientes naturales con lecho de grava, por lo que consideramos que son recomendables para la predicción del gasto sólido de fondo en ríos de montaña, como es el caso del río Chonta en el tramo de estudio.

4.3 Volumen de sedimentos que transporta el río Chonta

Para el volumen de sedimentos de fondo (m^3) del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, en los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 es recomendable considerar el valor estimado mediante la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean ya que como se ha explicado esta fórmula ha sido desarrollada a partir de mediciones hechas en corrientes naturales con lecho de grava, como es el caso del río Chonta en el tramo en estudio. Estos resultados se presentan en la tabla 19.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.4 Conclusiones

- Los caudales aforados en el río Chonta en el año 2016, 100 m aguas arriba de la captación El Chicche, fueron variados en los meses de enero, febrero, marzo y abril, con un mínimo de $1,29 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo de $9,84 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La capacidad de transporte de sólidos de fondo del río Chonta, de los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016, aguas arriba de la captación El Chicche, según las fórmulas de Schoklitsch, de Bagnold, de Parker, Klingeman y Mc Lean, de Mizuyama y Shimohigashi, de Bathurst, Graf y Cao, resultó variado; obteniéndose valores desde $6,75 \text{ kg/s}$ según la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean hasta $95,22 \text{ kg/s}$ según la fórmula de Bagnold.
- En los meses de enero y febrero de 2018 los sedimentos, medidos en volumen, que ingresaron al desarenador de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche, resultaron ser $1,03 \text{ m}^3$ para un caudal de $1,20 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,05 \text{ m}^3$ para un caudal de $1,24 \text{ m}^3/\text{s}$, que comparados con los resultados de la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean, los cuales fueron $34,70$ y $37,29 \text{ m}^3$, se concluye que dicha fórmula es la más aceptable para estimar el gasto sólido de fondo del río Chonta, en comparación de las otras fórmulas estudiadas.
- El volumen de sedimentos debido al transporte de fondo del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, para los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2016 resultó ser $1741,62 \text{ m}^3$.

- Se determinó que para enero de 2018, el máximo volumen de sedimentos que ingresa al desarenador de la captación El Chicche es de 34,70 m³ y para el mes de febrero es de 37,29 m³.

4.5 Recomendaciones

- En cuanto a las fórmulas empíricas aplicadas, se recomienda hacer uso de otras fórmulas similares a los criterios y rangos de aplicación de la fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean.
- Es importante realizar investigación de transporte de sedimentos con tamaño de sólidos superiores a 3”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APACLLA NALVARTE, Ricardo. *Hidráulica Fluvial*. Lima : Fondo Editorial - UNALM, 2014.

BRAVO ESPINOZA, Miguel, R. OSTERKAMP, Waite y L. LOPES, Vicente. *Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo*. Michoacán : Tierra Latinoamericana, 2004.

BRICEÑO BRICEÑO, Edison Wilson. *Evaluación de la capacidad hidráulica para la evacuación de caudales y sedimentos del drenaje transversal de carreteras*. Loja : Universidad Católica de Loja, 2017.

CORUÑA, A. Introducción a la Ingeniería Fluvial. *Obras Hidráulicas*. Córdoba : s.n., 2002.

HOYOS SAUCEDO, Marco. *Mecánica de Suelos I*. Cajamarca : Universidad Nacional de Cajamarca, 2000.

HUAMAN GUTIERREZ, Hector Alfredo. *Modelización del transporte de sedimentos en el río Ramis*. LIMA : Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.

LÓPEZ ALONSO, Raúl. *Problemas resueltos de ingeniería hidráulica forestal*. Lleida : Universidad de Lleida, 2004.

MARTINEZ MARÍN, Eduardo. *Hidráulica fluvial principios y práctica*. Madrid : Bellisco, 2001.

MAZA ÁLVAREZ, José Antonio y GARCÍA FLORES, Manuel. *Cap.10 del Manual de Ingeniería de Ríos - Transporte de Sedimentos*. México : Comisión Nacional del Agua, 2007.

MENDOZA LÓPEZ, Francisco Alonso. *Modelación del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente, aplicación al río Las Cruces, Calimaya Estado de México*. Toluca : Universidad Autónoma del Estado de México, 2014.

MEULEN SILVA, José. *Movilidad del sedimento de fondo y le material leñoso en dos cuencas del sur de Chile*. Valdivia : Universidad Austral de Chile, 2014.

NAVA HERNÁNDEZ, Alejandra y CORTES BOW, Darío. *Hidráulica de Ríos - Morfología, técnicas de medición y muestreo en ríos*. Ciudad de México : Instituto Politécnico Nacional, 2012.

NIÑO CAMPOS, Yarko. *Hidráulica fluvial y transporte de sedimentos - Transporte hidráulico de sólidos*. Santiago : Universidad de Chile, 2004.

NIPPON KOEI. *Plan de Gestión en las cuencas de los Ríos Mashcón y Chonta, con énfasis en el Afianzamiento Hídrico en las Subcuencas Azufre, Paccha y Río Grande de Chonta, Cajamarca, Perú*. Cajamarca : Nippon Koei, 2010.

OCHOA RUBIO, Tomás. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Bogotá : Ecoe Ediciones, 2011.

ORTÍZ FLÓREZ, RAMIRO. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá : Mc Graw Hill, 2001.

PEÑALOSA OLARTE, Astrid Julieth y ARIAS ALDANA, Diana Cristina. *Estudio de las teorías de arrastre de fondo sobre el río negro, en un tramo de 100 m aguas arriba del puente Tobia-La Montaña, mediante un modelo físico*. Bogotá D.C. : s.n., 2010.

ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción a la hidráulica fluvial*. Lima : W H Editores, 1998.

ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción teórica al estudio de bocatomas*. Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, 1978.

RUFINO HINOJOSA, Javier. *Obras Hidráulicas I*. Cochabamba : Universidad Mayor de San Simón, 2006.

RUIZ VILLANUEVA, Virginia. *Nuevas metodologías en la evaluación de la peligrosidad y el riesgo por avenidas en cuencas de montaña*. Madrid : Universidad Complutense de Madrid, 2012.

SALZGITTER-SISA. *Estudio de factibilidad–Presa Chonta, Proyecto de regulación de las aguas del río Chonta mediante la Presa Chonta - Hidrología*. Cajamarca : s.n., 2010.

SALZGITTER-SISA, CONSORCIO. *Estudio de factibilidad–Presa Chonta, proyecto de regulación de las aguas del río Chonta mediante la presa Chonta - Sedimentología*. Cajamarca : s.n., 2010.

SARANGO CALVA, Cinthya Stefannya. *Calibración de una ecuación para el transporte de sedimentos en la cuenca El Limon, en el río Zamora*. Loja-Ecuador : Universidad Técnica Particular de Loja, 2013.

SILVA MEULEN, José. *Movilidad del sedimento de fondo y le material leñoso en dos cuencas del sur de Chile*. Valdivia : Universidad Austral de Chile, 2014.

ANEXO 1

**FIGURAS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS DURANTE LA
INVESTIGACIÓN**

Figura 8. Barraje de la captación El Chicche



Figura 9. Sección de aforo del río Chonta aguas arriba de la captación El Chicche

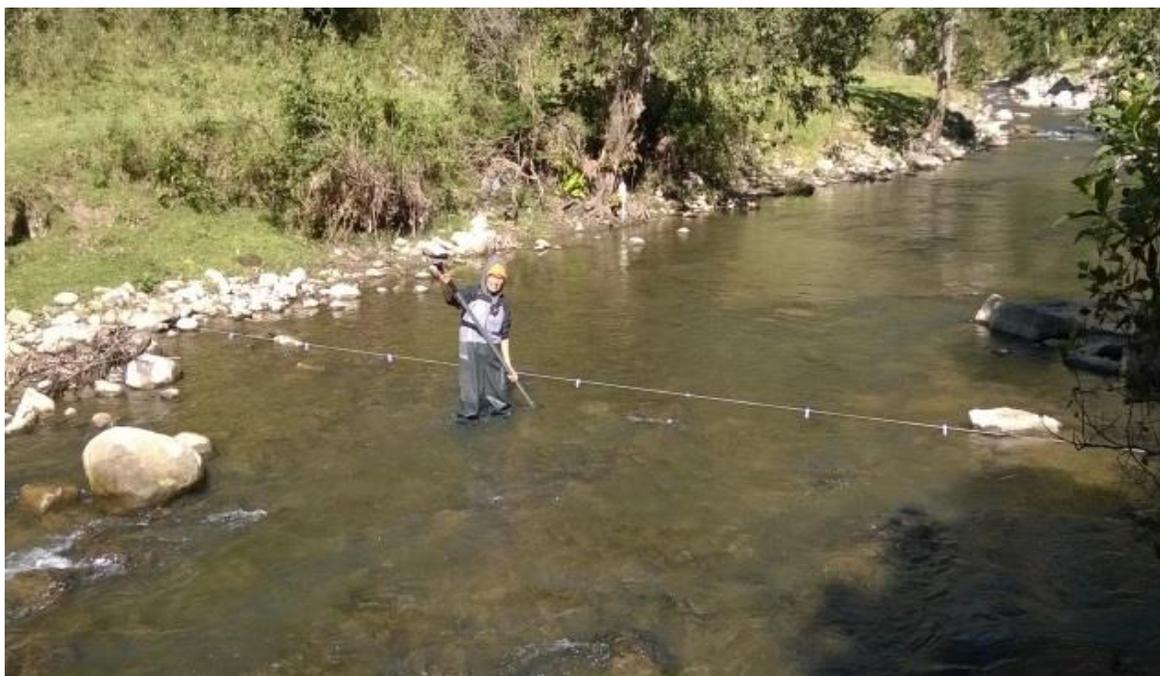


Figura 10. Calibración del tubo de Pitot utilizado durante la investigación.



Figura 11. Aforo realizado en el mes de enero de 2016



Figura 12. Tramo recto del río Chonta aguas arriba de la sección de aforo



Figura 13. Tramo recto del río Chonta aguas abajo de la sección de aforo



Figura 14. Tramo del río Chonta donde se observa la coloración del flujo debido al transporte de sedimentos.



Figura 15. Medición de la velocidad del flujo por el método del flotador.



Figura 16. Aforo del día 31.01.2016 (caudal=9.84 m³/s)



Figura 17. Extracción de muestras de suelos aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.



Figura 18. Muestras de sólidos extraídas aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.



Figura 19. Secado de la muestra extraída del río Chonta, extraídas aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.



Figura 20. Tamizado de la muestra extraída del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.



Figura 21. Determinación de los pesos específicos de los sedimentos extraídos aguas arriba y aguas abajo de la captación El Chicche.



Figura 22. Relación Caudal (m^3/s) - Gasto sólido de fondo (kg/s) del río Chonta, aguas arriba de la captación El Chicche, para el año 2016, aplicando diferentes fórmulas.

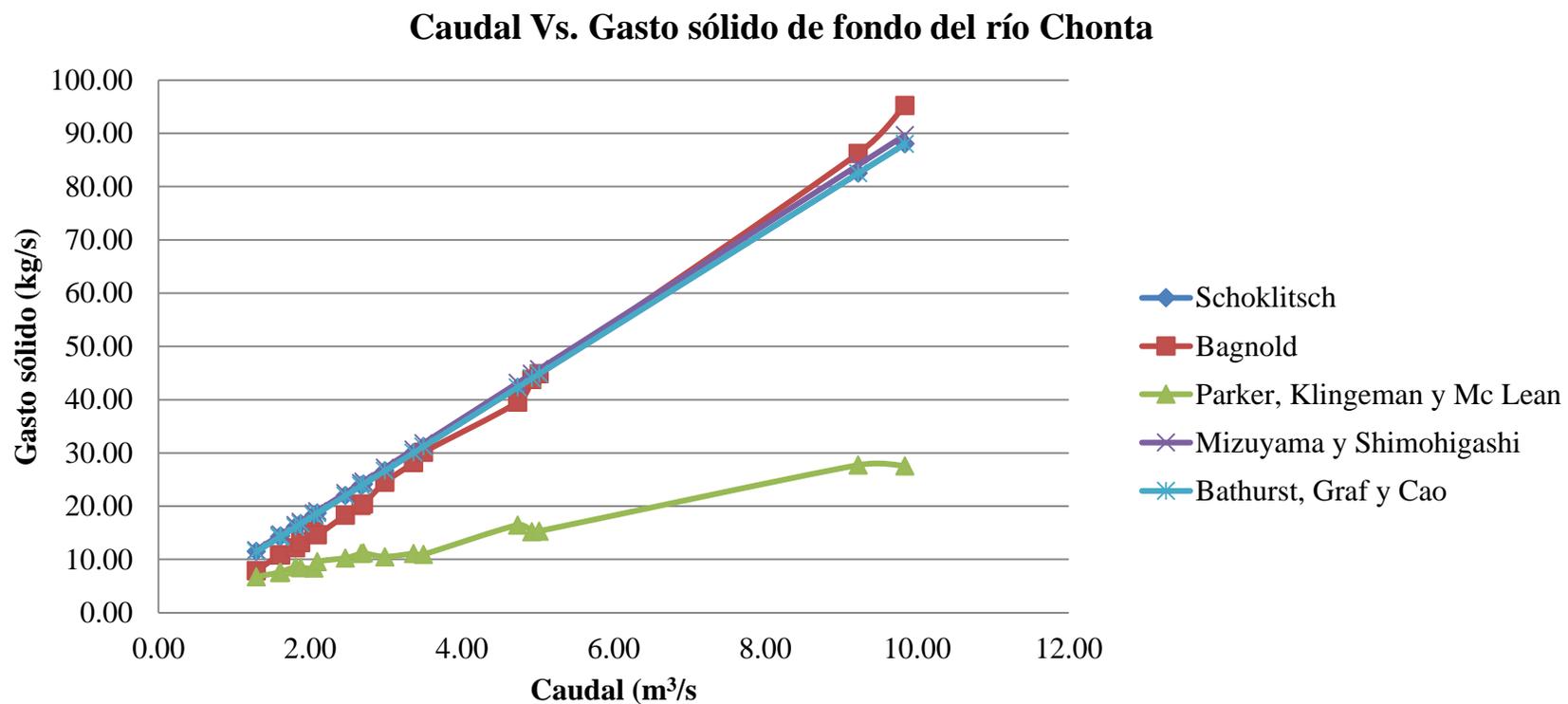
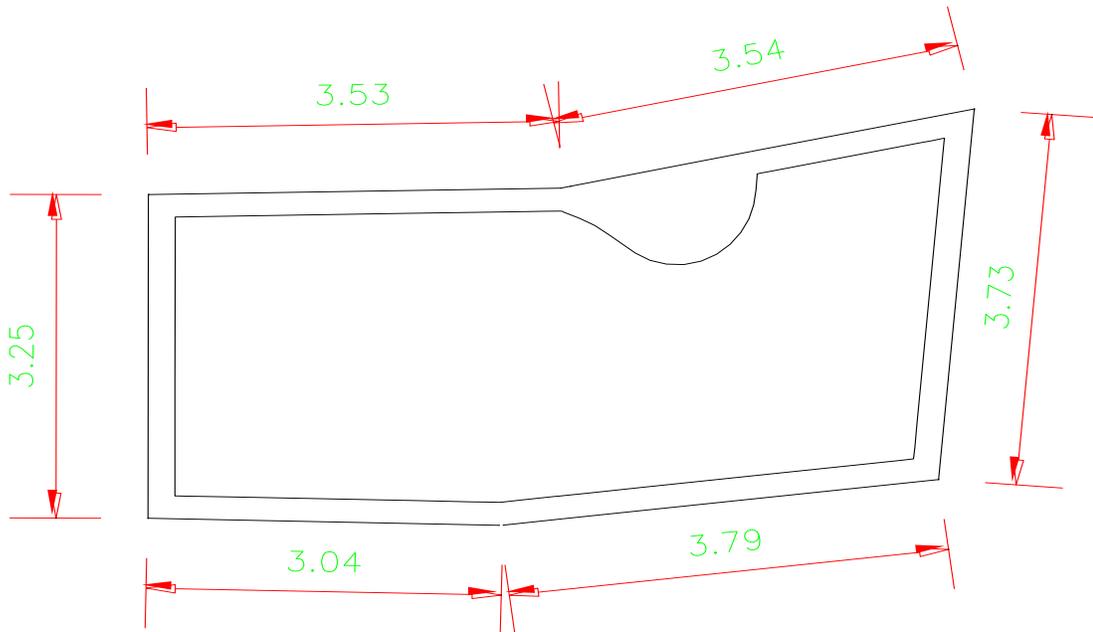


Figura 23. Vista en planta del desarenador de la captación de la central hidroeléctrica El Chicche

Desarenador-Vista de planta



Área=18,06 m²

Figura 24. Morfología del tramo de estudio del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la bocatoma El Chicche

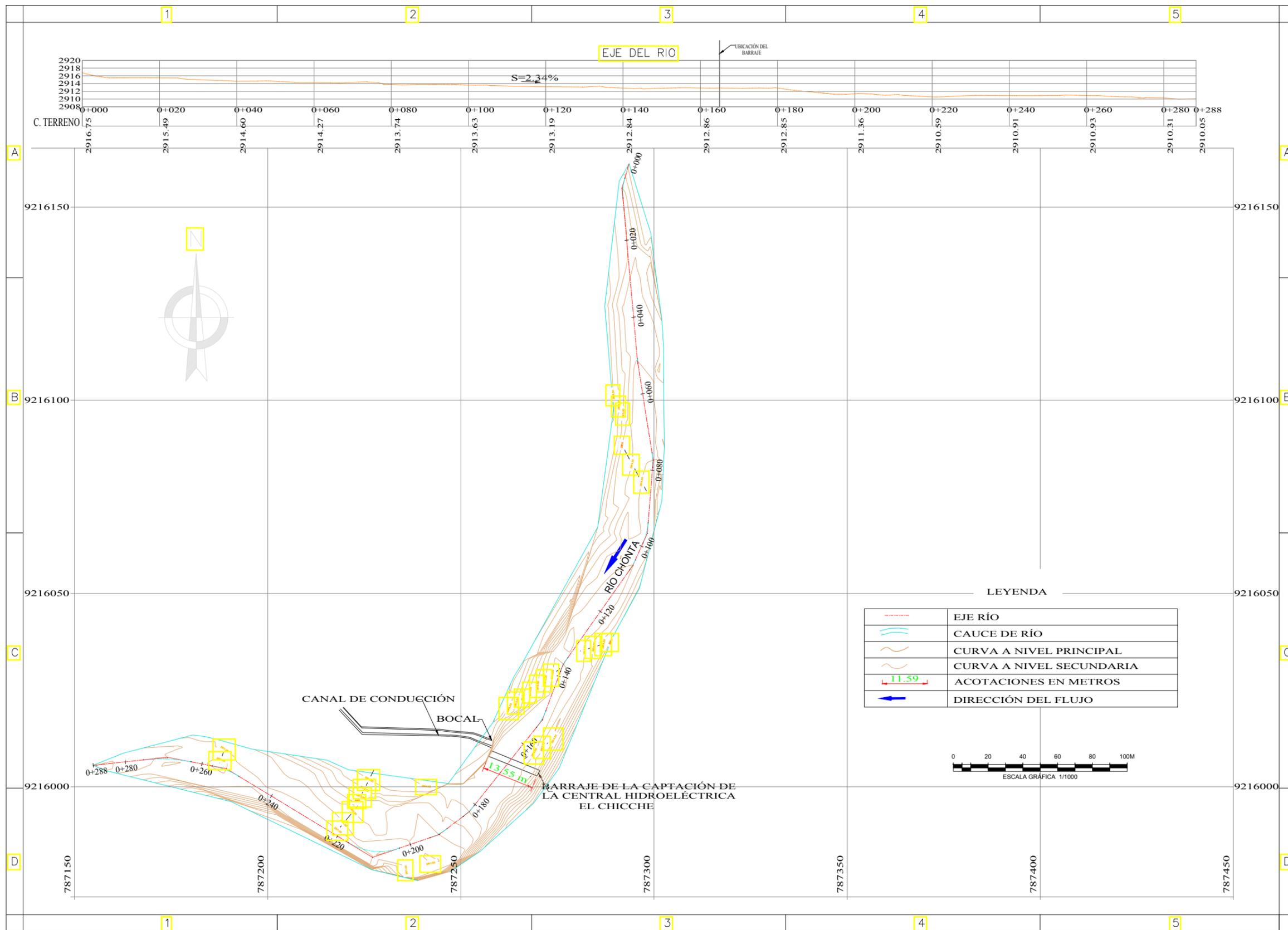


Figura 25. Puntos de muestreo de sedimentos y ubicación de sección de aforo en el tramo de estudio del río Chonta, aguas arriba y aguas abajo de la bocatoma El Chicche

