

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**



**ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DEL RÍO LA LECHE APLICANDO LOS
SOFTWARES ARCGIS Y HEC-RAS A SU PASO POR EL DISTRITO DE
PACORA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE-2019**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

**AUTOR
DILMER HERNANDEZ ASTOCHADO**

**ASESOR
ANÍBAL TEODORO DÍAZ ORREGO
<https://orcid.org/0000-0003-2861-4015>**

Chiclayo, 2021

**ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DEL RÍO LA LECHE
APLICANDO LOS SOFTWARES ARCGIS Y HEC-RAS A SU PASO
POR EL DISTRITO DE PACORA, PROVINCIA Y
DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE-2019**

PRESENTADA POR:

DILMER HERNANDEZ ASTOCHADO

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

APROBADA POR:

Wilmer Moises Zelada Zamora
PRESIDENTE

Carlos Rafael Tafur Jimenez
SECRETARIO

Aníbal Teodoro Díaz Orrego
VOCAL

DEDICATORIA

A DIOS por haberme permitido llegar a este punto, por darme la fortaleza, salud y la sabiduría para poder lograr mis objetivos.

A MIS PADRES Segundo y Lusmila por su apoyo constante en todo momento, sus consejos y la motivación constante que me condujeron todo el camino hasta llegar aquí. Gracias por su apoyo para cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

A MIS HERMANOS por el apoyo y confianza que siempre me brindaron en el transcurso de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo por darme la oportunidad de formarme como profesional, a los docentes de la escuela de Ingeniería Civil quienes me brindaron sus conocimientos.

Un sincero agradecimiento a mi asesor de tesis Ing. Aníbal Teodoro Díaz Orrego, quien me brindo sus conocimientos, paciencia, experiencia, motivación y orientación para poder culminar con éxito este estudio.

Y para concluir, también agradezco a todos mis amigos durante mi etapa en la universidad, ya que gracias a su amistad y compañerismo han aportado a mis ganas de seguir adelante.

RESUMEN

Esta tesis denominada “Estudio de inundabilidad del río La Leche aplicando los softwares ArcGIS y HEC-RAS a su paso por el distrito de Pacora, provincia y departamento de Lambayeque-2019”, cuyo objetivo fundamental es realizar un análisis hidrológico e hidráulico con el propósito de establecer el comportamiento del río La Leche en un tramo de 10 km aprox. a su paso por el distrito de Pacora, e identificar tramos críticos y de esta manera proponer alternativas de solución. Para el cumplimiento de dicho objetivo se tuvo que realizar una investigación minuciosa de la zona del proyecto, para lo cual fue indispensable cierta información topográfica actual del río La Leche, el cual se logró obtener mediante un levantamiento planimétrico y altimétrico.

Se obtuvo un cuadro con registros de caudales promedios mensuales entre los años 1963-2018 de la estación meteorológica PUCHACA para la cuenca del río La Leche y de esta manera obtener el caudal máximo para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años, asimismo el programa ArcGIS proporciona las siguientes características: área de la cuenca: 1569.78 km², perímetro de la cuenca 249.63 km y la longitud mayor del río objeto de estudio es de 10 + 066.59 km.

Luego se obtuvo las máximas avenidas con los métodos estadísticos y con la prueba de bondad de ajuste se opta por método de Gamma 3 parámetros y se ha llegado a un caudal máximo de diseño de 162.44 m³/s para un periodo de retorno de 100 años, 179.68 m³/s para un periodo de retorno de 200 años, 201.70 m³/s para un periodo de retorno de 500 años.

Palabras clave: *Periodo de retorno, Estudio, Fluviomorfológico, Inundabilidad, Máximas avenidas.*

ABSTRACT

This thesis called "Flood study of the La Leche river applying ArcGIS and HEC-RAS software as it passes through the district of Pacora, province and department of Lambayeque-2019", whose main objective is to carry out a hydrological and hydraulic analysis for the purpose to establish the behavior of the La Leche river in a section of 10 km approx. as it passes through the Pacora district, and identify critical sections and thus propose alternative solutions. For the fulfillment of said objective, a thorough investigation of the project area had to be carried out, for which certain current topographic information of the La Leche river was indispensable, which was obtained by means of a planimetric and altimetric survey.

A table was obtained with monthly average flow records between the years 1963-2018 from the PUCHACA meteorological station for the La Leche river basin and thus obtain the maximum flow for return periods of 100, 200 and 500 years, also the ArcGIS program. It provides the following characteristics: area of the basin: 1,569.78 km², perimeter of the basin 249.63 km and the longest length of the river under study is 10 + 066.59 km.

Then the maximum discharges were obtained with the statistical methods and with the goodness-of-fit test, the 3-parameter Gamma method was chosen and a maximum design flow of 162.44 m³ / s was reached for a return period of 100 years, 179.68 m³ / s for a return period of 200 years, 201.70 m³ / s for a return period of 500 years.

Keywords: *Return period, Study, Fluvimorphological, Flood, Maximum discharges.*

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	16
II. MARCO TEÓRICO	21
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	21
2.2 BASES TEÓRICO CIENTÍFICAS	23
2.3 MARCO CONCEPTUAL	25
2.3.1 HIDROLOGÍA	25
2.3.1.1 Río.....	25
2.3.1.2 El agua.....	27
2.3.1.3 Las cuencas hidrográficas	28
2.3.1.4 Principales anomalías	33
2.3.1.5 Precipitación.....	37
2.3.1.6 Información hidrológica.....	38
2.3.1.7 Área de estudio de las cuencas hidrográficas.....	38
2.3.1.8 Periodo de retorno	38
2.3.1.9 Análisis estadístico de datos hidrológicos.....	39
2.3.1.10 Estudio de tormenta.....	43
2.3.1.11 Tiempo de concentración	46
2.3.1.12 Hietograma de diseño.....	48
2.3.1.13 Estimación de caudales	49
2.3.2 HIDRÁULICA.....	50
2.3.2.1 Movilidad fluvial.....	50
2.3.2.2 Conductos abiertos	50
2.3.2.3 Propiedades geométricas de la sección transversal	51
2.3.2.4 Coeficientes de rugosidad de Manning	52
2.3.3 TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS.....	53
2.3.3.1 En función del enfoque físico del problema.....	53
2.3.3.2 Número de dimensiones	53
2.3.3.3 Variación temporal.....	55
2.3.3.4 Método matemático de resolución de las ecuaciones.....	55
2.3.4 SOFTWARE ARCGIS	60
2.3.5 SOFTWARE HEC-RAS.....	60
2.3.5.1 Metodología del cálculo del flujo gradualmente variado.....	61
2.3.5.2 Ecuaciones empleadas en el cálculo de perfiles hidráulicos.....	62
2.3.5.3 Cálculo del tirante crítico.	67
III. MATERIALES Y METODOS	69
3.1 Tipo y nivel de investigación.....	69

3.2	Diseño de investigación.....	69
3.3	Población, muestra de estudio	69
3.4	Criterios de selección.....	70
3.5	Operacionalización de variables.....	70
3.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	71
3.7	Procedimientos	72
3.8	Plan de procesamiento y análisis de datos.....	73
3.9	Matriz de consistencia	75
3.10	Consideraciones éticas	76
IV.	RESULTADOS.....	76
4.1	Descripción general del área de estudio	76
4.1.1	Ubicación política de la zona de estudio.....	76
4.1.2	Ubicación hidrográfica de la zona de estudio	77
4.1.3	Vías de acceso.....	78
4.1.4	Limites	79
4.1.5	Clima.....	79
4.1.6	Ecología	79
4.1.7	Vegetación	80
4.1.8	Drenaje.....	80
4.2	Estudio Topográfico	81
4.3	Estudio hidrológico.....	82
4.3.1	Delimitación de la cuenca	82
4.3.2	Análisis geomorfológico de la cuenca	82
4.3.3	Información meteorológica	96
4.3.4	Hietograma de diseño.....	112
4.3.5	Conclusiones del estudio hidrológico	118
4.4	Estudio hidráulico.....	119
4.4.1	Levantamiento topográfico del rio La Leche	119
4.4.2	Batimetría	120
4.4.3	Información para el modelo HEC-RAS	121
4.4.4	Calibración del modelo hidráulico	121
4.4.5	Resultados de la modelación hidráulica.....	123
4.4.6	Análisis del flujo con HEC-RAS	124
4.4.7	Secciones obtenidas de la simulación Hidráulica	124
4.4.8	Identificación de zonas críticas y propuestas como alternativas de solución ..	124
4.4.9	Conclusiones del estudio hidráulico.....	131
4.4.10	Caudal durante el fenómeno del niño.....	131

4.4.11	Mapas de inundación.....	131
4.4.12	Predimensionamiento y alternativas de estructuras de encauzamiento.....	132
4.5	Discusiones.....	140
V.	CONCLUSIONES.....	141
VI.	RECOMENDACIONES.....	142
VII.	REFERENCIAS.....	143
VIII.	ANEXOS, PLANOS Y MAPAS.....	145
8.1	ANEXOS.....	145
8.2	MAPAS.....	155
8.3	PLANOS.....	159

LISTA DE TABLAS

Tabla 1:Cuadro histórico de daños por eventos naturales en Pacora	21
Tabla 2:Valores críticos de para la prueba Kolmogorov-Smirnov	43
Tabla 3: Coeficientes de duración lluvias entre 48 horas y una hora.....	45
Tabla 4:Formulas para el cálculo del tiempo de concentración.....	47
Tabla 5: Valores del coeficiente de rugosidad	52
Tabla 6: Operacionalización de las variables.....	71
Tabla 7: Matriz de consistencia.....	75
Tabla 8:Área de subcuencas.....	84
Tabla 9:Coeficientes para la evaluación de la forma	85
Tabla 10:Coeficientes para la evaluación de la forma	86
Tabla 11:Cotas promedio Vs Área acumulada.....	87
Tabla 12:Elevación media.....	89
Tabla 13:Clasificación de pendientes medias	90
Tabla 14:Rangos de pendiente -ArcGIS.....	90
Tabla 15:Orden y longitud de la red hídrica	91
Tabla 16:Clasificación de la red de drenaje de las cuencas	92
Tabla 17:Valores medios del coeficiente de Manning (n)	95
Tabla 18:Características de la cuenca de rio La Leche	96
Tabla 19:Precipitaciones máximas en 24 Hrs.	100
Tabla 20:Datos mensuales de precipitación máxima en 24 hrs. (mm).....	102
Tabla 21:Resultado de ajuste de datos a distribución normal	104
Tabla 22:Resultado de ajuste de datos a distribución Lognormal 2 parámetros.....	105
Tabla 23:Resultado de ajuste de datos a distribución Lognormal 3 parámetros.....	106
Tabla 24:Resultado de ajuste de datos a distribución Gamma 2 parámetros.....	107
Tabla 25:Resultado de ajuste de datos a distribución Gamma 3 parámetros.....	108
Tabla 26:Resultado de ajuste de datos a distribución Gumbel.....	109
Tabla 27:Resultado de ajuste de datos a distribución LogGumbel	110
Tabla 28:Prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolgomorov	111
Tabla 29:Intensidades - Tiempo de duración	111
Tabla 30:Hietograma de diseño para $T_r = 100$ años	113
Tabla 31:Hietograma de diseño para $T_r = 200$ años	114

Tabla 32:Hietograma de diseño para $T_r = 500$ años	115
Tabla 33: Caudales de diseño hidrológico	121
Tabla 34:Coeficinte de Manning para canal principal y llanuras de inundación	122
Tabla 35: Coeficiente de Contracción y Expansión del HEC-RAS.	122
Tabla 36:Términos de tablas de resultados	124
Tabla 37: Tipo de protección para las zonas criticas	125
Tabla 38:Valores de factor de fondo y orilla de un cauce.....	132
Tabla 39: Coeficientes de rugosidad para cauces naturales	133
Tabla 40:Recomendaciones del borde libre	136
Tabla 41: Ancho de corona en función del caudal de diseño.....	137
Tabla 42:Dimensiones comerciales del gavión tipo caja	138
Tabla 43:Dimensiones comerciales del gavión tipo colchón.....	139

LISTA DE IMAGEN

Imagen 1: Partes de un río.....	27
Imagen 2:Reservas de agua dulce en el mundo por región.....	27
Imagen 3:Ciclo del agua.....	28
Imagen 4:Delimitación de una cuenca	29
Imagen 5:Partes de una cuenca hidrográfica.....	32
Imagen 6:Polígono de Thiessen	38
Imagen 7:Lecho natural y Lecho móvil	50
Imagen 8:Parámetros de la sección transversal de un canal.....	51
Imagen 9: Radio hidráulico en un canal muy ancho.	51
Imagen 10: Discretización de un dominio bidimensional.....	56
Imagen 11: Representación de los términos de la ecuación de la energía	62
Imagen 12:Consideraciones de distribución del flujo entre dos secciones	63
Imagen 13: División en franjas de la sección transversal	64
Imagen 14: Curva de la energía específica.....	68
Imagen 15:Esquema del levantamiento topográfico del río La Leche.....	119
Imagen 16:Distribución de las secciones transversales a lo largo del cauce del río La Leche	120
Imagen 17: Sección transversal Km 9+800 del río La Leche	120
Imagen 18: Calibración de la rugosidad para el modelo hidráulico.....	122
Imagen 19:Perfil de flujo del río La Leche en la zona de estudio.....	123
Imagen 20:Imagen de la llanura de inundación del río La Leche	123
Imagen 21:Gaviones tipo caja	138
Imagen 22: Gaviones tipo colchón.....	139

LISTA DE MAPAS

Mapa 1:Ubicación cartográfica de la cuenca del rio La Leche	77
Mapa 2:Ubicación hidrográfica de la zona de estudio	78
Mapa 3:Áreas de vida del Perú	80
Mapa 4:Área y Perímetro de la cuenca del rio La Leche	83
Mapa 5:Subcuencas del rio La Leche	84
Mapa 6:Red hídrica de la cuenca del rio La Leche	91
Mapa 7: Inundación para un periodo de retorno de 100 años	155
Mapa 8:Inundación para un periodo de retorno de 200 años	156
Mapa 9:Inundación para un periodo de retorno de 500 años	157
Mapa 10:Inundación durante el fenómeno del niño	158

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1:Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia	44
Gráfica 2:Hietograma de diseño	48
Gráfica 3:Curva Hipsométrica	87
Gráfica 4:Precipitaciones máximas en 24 Hr.	101
Gráfica 5:Curvas I-D-F de la cuenca del rio La Leche	112
Gráfica 6:Hietograma de diseño para $Tr = 100$ años	113
Gráfica 7:Hietograma de diseño para $Tr = 200$ años	114
Gráfica 8:Hietograma de diseño para $Tr = 500$ años	115

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1:Panel Fotográfico.....	145
Anexo 2:Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del rio La Leche para un periodo de retorno de 100 años	150
Anexo 3:Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del rio La Leche para un periodo de retorno de 200 años	151
Anexo 4:Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del rio La Leche para un periodo de retorno de 500 años	152

I. INTRODUCCIÓN

La investigación titulada “ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DEL RIO LA LECHE APLICANDO LOS SOFTWARES ARCGIS Y HEC-RAS A SU PASO POR EL DISTRITO DE PACORA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE-2019” nace con la necesidad de ejecutar un estudio hidrológico e hidráulico para establecer de qué manera se comporta el río La Leche y analizar las zonas que están susceptibles a inundarse. En Sudamérica y sobre todo en el Perú los fenómenos de inundación son considerados como uno de los problemas más importantes debido al difícil control de ríos que en épocas de avenidas logran inundar distintas zonas, los cuales impiden el libre desarrollo de la actividad agrícola y el desarrollo de las comunidades. Las intensas lluvias como el fenómeno El niño costero en la región Lambayeque dejaron en desolación y más de 50 mil damnificados por el derrumbe de sus viviendas y el desborde de los ríos.

La presente investigación tiene como objetivo identificar las características topográficas de la zona y luego con los datos obtenidos en campo realizar los diferentes cálculos y de esta manera obtener las características hidráulicas y determinar las zonas posibles a inundarse considerando ocurrencia de eventos de inundación para 100,200 y 500 años. La realización de este proyecto de investigación es de gran importancia porque favorecerá a 8060 pobladores del distrito de Pacora,(Censo 2017), ya que busca estudiar y analizar mediante un modelamiento hidráulico haciendo uso de los softwares ARCGIS y HEC-RAS el comportamiento del río La Leche, y mediante su desarrollo daremos a conocer los potenciales efectos que puedan ocurrir ante un suceso de desborde del mencionado río, con los resultados se propondrán soluciones que ayuden a reducir los daños y pérdidas económicas.

Para la realización de este estudio los datos que necesitaremos son pluviométricos e hidrométricos que serán proporcionadas por distintas instituciones tales como PEOT (Proyecto Especial Olmos Tinajones), SENAMHI, Defensa Civil Pacora, Administración Local de Agua Motupe Olmos y la Autoridad Nacional del Agua-Pacora. La investigación beneficiara al sector vivienda, educación, salud y agricultura previniendo inundaciones en zonas vulnerables.

El fin del proyecto es facilitar conocimientos técnicos que permitan determinar el riesgo de desbordamiento del río La Leche y de esta manera facilitar la toma decisiones para disminuir las vulnerabilidades de las actividades de desarrollo en este lugar.

SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Las inundaciones son un fenómeno meteorológico más común que puede consistir de solo unos centímetros de agua o puede cubrir toda una vivienda hasta el techo, y esto provoca en gran cantidad pérdidas económicas y humanas.

Según este artículo periodístico moradores del distrito de Jayanca, en Lambayeque, informaron sobre el desborde del río La Leche a la altura de la huaca Chilili, donde el dique que impedía que las aguas llegaran hasta la zona poblada finalmente cedió ante el aumento del caudal y esto terminó por afectar a los moradores de los caseríos cercanos. [3]

La actividad de los seres humanos y los medios de estabilidad llevan a los habitantes a localizarse en áreas urbanas y rurales que son proclives a inundaciones y la cantidad de personas vulnerables se incrementa a medida que la población se desarrolla y la falta de más lugares de asentamientos lleva que mucha gente viva en terrenos aluviales.

(FRANCE 24,2019). El 28 de abril la ruptura de un dique complicó más la situación en la provincia de Quebec, donde unas 8.000 personas debieron ser evacuadas. Regiones de Ontario y Nuevo Brunswick también están afectadas por los anegamientos. Más de 5.000 personas se vieron en la necesidad de renunciar a sus viviendas cerca de Montreal luego de la rotura de un dique comenzando en la noche del sábado 27 de abril y las primeras horas de la mañana del domingo 28 a raíz de las fuertes inundaciones que afectan al este del país.

(MONGABAY,2018). El 28 de agosto las intensas lluvias causadas por 33 de las 60 ondas tropicales esperadas para este año en Venezuela, han ocasionado la crecida más grande registrada desde 1976. El río ha crecido hasta los 18,34 m.s.n.m. hasta el sábado 25 de agosto en Bolívar y hasta los 54,28 metros en el Amazonas. Ambas superando las marcas anteriores de 1976, mientras los pronósticos meteorológicos estiman que las lluvias continuarán. Las inundaciones en Venezuela han afectado hasta el momento a más de 60 000 personas, cientos de familias que lo han perdido todo.

(EL PAIS, 2018). El 29 de agosto, el embalse de la represa Swar Chaung colapsó debido a la presión de fuertes precipitaciones, generando un caudaloso flujo de agua que inundó las llanuras rurales de la región de Bago, a 70 kilómetros al noreste de Rangún. Alrededor de 63.000 personas se han visto afectadas. La rotura de la represa ha tenido lugar semanas después de que

las fuertes lluvias monzónicas obligaran a 150.000 birmanos a huir de sus hogares. En la imagen, un puente que une a Yangon con la capital Naypyidaw se ve dañado por las inundaciones.

En la región Lambayeque uno de los ríos que ocasiona directamente la destrucción de muchos centros poblados es el río “La Leche”, cuyo comportamiento hídrico afecta a Túcume, Mórrope, Illimo, Pacora, etc. Al río “La Leche” también se le denomina como río Loco producto de sus esporádicos desbordes que ha ocasionado través del tiempo.

En la actualidad le Perú ha atravesado otro capítulo de este suceso conocido como “El niño costero”, un hecho que ha causado numerosos desastres por el norte, centro y sur del país. El distrito de Pacora, es uno de los distritos de Lambayeque más afectados en la región de Lambayeque, esto es debido a que el río “La Leche”, que estuvo seco por un largo tiempo, se volvió a activar por las lluvias intensas lo que ocasionó un grande y rápido aumento del flujo teniendo como consecuencia su desborde.

Según la ONU en el 2018 se obtuvo como consecuencia debido a inundaciones la cifra de 200000 muertos y 1500000 perdidas afectadas, siendo una de las poblaciones más afectadas SOMALIA.

El periódico global EL PAÍS menciona en una sus páginas los daños que ocasionó el desborde de un río en la ciudad de Maryland en el año 2018 que tuvo como consecuencia 15 muertos, 600 viviendas destruidas y más de 2 millones de personas afectadas.

Según MINAGRI.2018, Piura perdió 800 hectáreas de algodón debido a las inundaciones. Según el centro de operaciones de emergencia nacional (COEN),2017 hubo 101104 damnificados, 643216 afectados, 78 fallecidos, 263 heridos, 20 desaparecidos y viviendas, carreteras, puentes destruidos.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a la situación problemática descrita se ha realizado la siguiente interrogante:
¿Cuál es el comportamiento hidrológico e hidráulico del río La Leche a su paso por el distrito de Pacora, aplicando los softwares ARCGIS y HEC-RAS?

JUSTIFICACIÓN

A continuación, se mencionan lo provechoso por cada sector social a tener en cuenta al finalizar el presente estudio:

- Vivienda:

Se tomaría acciones de reubicación de la población cuyas viviendas sean vulnerables ante una inundación, ya que significa un gran peligro para los habitantes debido a la precariedad de los materiales con la que realizan sus construcciones. Según datos de órganos técnicos como INDECI y COER el 2017 se identificó 76 viviendas colapsadas y 160 inhabilitadas y 441 afectadas. 582 damnificados y 215 afectados. INDECI menciona que las cifras preliminares señalan que el mencionado fenómeno en Lambayeque dejó 71 756 damnificados y 14500 viviendas destruidas. [4]

- Educación

Se podría proyectar medidas para el reforzamiento y preservación de las infraestructuras de los centros educativos ante inundaciones, de esta manera evitar el interrumpimiento y retraso del desarrollo del cronograma escolar.

- Salud

Permitiría tomar medidas para evitar que el agua de las inundaciones quede atrapada en las partes hondonadas y de esta manera evitar la contribución a la aparición insectos que desencadenen epidemias (diarreas, dengue, malaria, etc.) perjudicando a la población.

- Agricultura

Permitirá la determinación de áreas vulnerables a inundación y de esta manera minimizar los daños que ocasionaría a la agricultura, siendo esta la actividad económica más importante de este sector.

FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El modelamiento hidráulico e hidrológico del río La Leche con los softwares ARCGIS y HEC-RAS nos permitirá conocer sus características hidráulicas el cual ayudará prevenir, disminuir el riesgo de daños y pérdidas económicas en áreas inundables en el distrito de Pacora.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis hidrológico e hidráulico para determinar el comportamiento del perfil del río La Leche en un tramo de 10 km aprox. a su paso por el distrito de Pacora con diferentes periodos de retorno para analizar las llanuras de inundaciones usando los softwares ArcGIS y HEC-RAS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el levantamiento topográfico para determinar la geometría del tramo en estudio y elaborar los planos de topografía.
- Calcular y analizar los perfiles hidráulicos para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años del río La Leche a su paso por el distrito de Pacora.
- Simular hidráulicamente el tramo de río La Leche en estudio aplicando el software ARCGIS y HEC-RAS.
- Identificar las zonas con riesgo a inundación para máximas avenidas probables del río La Leche a su paso por el distrito de Pacora en un tramo de aprox. 10 km.
- Elaborar mapas de inundación del distrito de Pacora, provincia y departamento de Lambayeque.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En los años 1997-1998, el Perú vivió uno de los eventos más intensos del siglo XX que llegó a impactar notablemente en la población y sobre todo en el principal sector económico del país por los severos daños que ocasionó el fenómeno “El Niño”, este problema fue debido a las intensas lluvias entre diciembre de 1997 y abril del año 1998, el cual generó una elevación considerable de caudales en los principales ríos costeros generando inundaciones en la zona norte del país, conociendo que cualquier lugar con precipitaciones es propenso a sufrir inundaciones.

A continuación, se muestra un cuadro histórico de daños originados por eventos naturales (inundaciones) en el distrito de Pacora:

Tabla 1: Cuadro histórico de daños por eventos naturales en Pacora

AÑO 1972	<ul style="list-style-type: none"> - Con la intensidad de las lluvias - Cambió su curso natural el río la Leche, desviándose y ensanchándose. - Ocasionaron Inundaciones - Derrumbe de varias viviendas zona urbana - El desborde de las Aguas del río la Leche cruzó la carretera Panamericana, interrumpiendo el tráfico.
1983	<ul style="list-style-type: none"> - Colapso de viviendas por intensas lluvias y desborde de los ríos La Leche y Motupe ocasionando inundaciones en los Caseríos Las Juntas, Sector El Álamo, Cerro Escute, La Cirila.
1997 - 1998	<ul style="list-style-type: none"> - El río Motupe fue desviado hacia el lado Oeste por Jayanca y Pacora (Pampa de Lino, Casa Embarrada y Huaca Bandera) - derrumbe de viviendas rústicas en zona urbana - Inundaciones en caseríos: Las Juntas, Casa Embarrada, Santa Isabel, San Luis, Cerro Escute
2008	<ul style="list-style-type: none"> - Inundaciones en la zona urbana: 1° de Mayo, Sr. De los Milagros - Las Juntas – Zona Rural - La Cirila – Terrenos de Cultivo
2012	<ul style="list-style-type: none"> - Inundaciones ocasionados por el río La Leche afectando a los Caseríos La Cirila, Cerro Escute, Las Juntas
2015	<ul style="list-style-type: none"> - Desborde del río La Leche, ocasionando inundaciones a los Caseríos Señor de Luren y parte de Santa Isabel.
2017	<ul style="list-style-type: none"> - derrumbe de viviendas rústicas en zona urbana - Inundaciones en caseríos: Las Juntas, Casa Embarrada, Santa Isabel, San Luis, Cerro Escute - El desborde de las Aguas del río la Leche cruzó la carretera Panamericana, interrumpiendo el tráfico. - Inundación de zona agrícolas.

Fuente: Defensa Civil del distrito de Pacora

De esta manera se ven los daños de grandes hectáreas de terrenos agrícolas y ganaderas como consecuencia de las inundaciones y erosión de los suelos, el cual conlleva a tener pérdidas en ganadería y agricultura siendo este factor el que obliga a los agricultores abandonar las partes cultivables de sus terrenos que están localizados en zonas de la ribera.

La cuenca del río La Leche es de gran importancia y necesario para varios sectores del departamento, el cual se caracteriza por su aporte en el desarrollo de la actividad agrícola y ganadera de manera tradicional, ya que carecen de un sistema con el cual puedan tener un mejor aprovechamiento del comportamiento del recurso hídrico del río La Leche.

Francisco valles y Beatriz Nácher, Realizó el “Estudio de inundabilidad por el río Magro y el Barranc de la Creueta, para la regularización de la cooperativa agrícola y la ampliación del suelo industrial en el T.M. de ALFARP (valencia)” cuyo objetivo fue analizar la peligrosidad de inundación del río Magro y el Barranc de la Creueta, en la universidad politécnica de Valencia.

Palmer G. (2017), realizó el presente estudio: “Determinación de las áreas inundables en los sectores San Pablo y Niño Pobre, según caudales máximos estimados del río Utcubamba, aplicando modelo HEC-RAS y software ArcGIS”. tiene como finalidad determinar las áreas inundables en el distrito El Milagro, de la provincia Utcubamba, región Amazonas. En la Universidad Nacional de Trujillo.

“Análisis de la vulnerabilidad y el riesgo a inundaciones en la cuenca baja del río Gaira, en el distrito de santa marta”, Esta investigación está abocado a analizar la vulnerabilidad al riesgo de inundación que se presenta en la cuenca baja del río Gaira (Santa Marta), el cual está dividido territorialmente en tres sectores, lo cual le permite realizar comparaciones con otras instituciones dentro y fuera del sector.

De la misma, establecer el sector que tendría el mayor nivel de riesgo en presencia cualquier tipo de inundaciones. Para medir la vulnerabilidad global se acogió el método establecido por Wilches-Chaux (1989) y las investigaciones realizadas por Cáceres (2001), Gómez (2003), Parra (2003), Reyes (2003) y Jiménez (2005) sobre vulnerabilidad en valles hidrográficos. de los resultados obtenidos, se observó que la cuenca baja del río Gaira periódicamente sufrió en los últimos cinco años inundaciones, producto de acciones del hombre.

Las aceleradas y negligentes construcciones civiles en zonas inadecuadas, la defectuosa planificación de zonas urbanas, el poco conocimiento de planes de emergencia y la poca o casi nula capacitación muestral, son factores que incurrieron en la vulnerabilidad excesiva de la cuenca baja, según datos alcanzó un 69.5% y un valor promedio de 2.78.

Morris H. (2006), realizó la investigación: “Modelación hidráulica e hidrológica del río Guapiles para determinar la vulnerabilidad a inundaciones en un tramo comprendido entre los poblados Guapiles y la Rita”, en la Universidad de Costa Rica.

“La presente tesis aplica el Sistema de Información Geográfica como herramienta para el análisis hidráulico y modelamiento de simulación para analizar el impacto que tendría las inundaciones en un tramo del Río Ramis 10+00 Km aguas arriba del puente Ramis. Para lo cual se incorporó el software de análisis hidráulico HEC-RAS conjuntamente con el software SIG ARCGIS dando como resultado mapas de riesgos debido a las inundaciones, para diversos perfiles de flujo con períodos de retorno de 2, 10, 50, 100, 200 y 500 años, dando facilidad para su cuantificación y visualización de la magnitud de la inundación”.

2.2 BASES TEÓRICO CIENTÍFICAS

LEY DE RECURSOS HÍDRICOS

Sabiendo que el agua es uno de los recursos más preciados se crea la ley N° 28339 para una adecuada gestión moderna y uso de manera eficaz. [8] Esta ley nombra al ANA como la autoridad máxima encargada de diseñar estrategias, políticas y un plan nacional del uso del agua y tiene la capacidad de sancionar y coaccionar.

Artículo 34

Establece las condiciones para la utilización adecuada de los recursos hídricos. Los recursos hídricos se encuentran condicionado a su disponibilidad. El uso debe hacerse de manera eficiente y respetando los derechos de terceros, de acuerdo con lo establecido” [8]

Artículo 175

Las personas o usuarios que hagan uso de los recursos hídricos están en la obligación de aportar económicamente mediante tarifas que están establecidas mediante ley y de esta manera lograr sostenibilidad en el uso del agua. [8]

Artículo 177

El ANA como máxima autoridad del recurso hídrico está encargado de fijar un valor monetario anualmente, esta información se difundirá por los medios correspondientes y órganos de apoyo. Lo más importante es que contempla un aumento progresivo de los costos dependiendo el uso que se esté dando en la producción en las diversas zonas de producción como en la zona de producción de autoconsumo, intensiva y semi intensiva.

La implementación de este sistema es importante si se realiza en coordinación con los órganos respectivos y de esta manera generar responsabilidad en el uso racional este recurso natural tanpreciado y necesario. [8]

DEFENSA CIVIL

Defensa civil es un conjunto de acciones organizadas cuya función es proteger y brindar apoyo a la población en la circunstancia de una de emergencias generada por catástrofes naturales u otros desastre de cualquier origen. Esta entidad cuenta con el respaldo de los diferentes niveles políticos y del gobierno para su funcionamiento.

Los que integran la defensa civil, también son conocidos como protección civil, trabajan para avalar la seguridad y la supervivencia de los población y de su patrimonio ante las consecuencias de algún fenómeno. El surgimiento de este tipo de organizaciones se crea en 1949 mediante un protocolo añadido al Tratado de Ginebra para asistir a las víctimas de los enfrentamientos bélicos.

LA AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (A.N.A)

El (ANA), es la máxima autoridad nacional del sistema de gestión de recursos hídricos del Perú. Está unido al Ministerio de Agricultura el cual se encarga de efectuar las gestiones necesarias para la correcta utilización de manera sostenible de los recursos hídricos. ANA tiene presencia en a nivel local y nacional.

Mediante las Administraciones Locales de Agua se administra los recursos hídricos en forma territorial y se encargan de capacitar, sensibilizar y de realizar campañas para orientar la cultura del correcto uso del agua.

2.3 MARCO CONCEPTUAL

2.3.1 HIDROLOGÍA

2.3.1.1 Río

El río es un curso de agua que en su mayoría es dulce y transcurre con mucha continuidad por canales con un caudal establecido, en ocasiones es periódico durante el año y llega a finalizar en el océano o en otro lugar que es conocido como desembocadura. En muy pocas ocasiones los ríos no conectan con otro curso de agua de mayor caudal para desaparecer en el medio de la tierra. No obstante, en gran parte de los casos los ríos atraviesan grandes o cortas regiones para unirse finalmente con mares, lagos u océanos. [9]

Los diferentes tipos de ríos que existen son clasificados de acuerdo a su caudal, actividad, geometría, forma o su composición. Tenemos los siguientes tipos de ríos:

- Ríos perennes:

Son aquellos ríos que tienen flujo constante de agua durante todo el año, se encuentran en lugares con grandes precipitaciones, no es algo común que muestren considerables cambios de flujo en todo el año, debido a que el aporte de agua es constante. Estos ríos se también se generan de corrientes subterráneas y no es imprescindible que esté en una zona donde exista precipitaciones regulares. Este río es importante para los humanos, animales y plantas.

- Ríos estacionales:

Este tipo de ríos se encuentran en zonas donde estacionalmente son muy distinto. Donde existen épocas de sequía y de lluvias de manera diferenciada. Se caracterizan porque muestran grandes variaciones de caudal dependiendo de la estacionalidad. Suelen hallarse en lugares montañosos, excepto en zonas de llanura que puedan darse con menor frecuencia.

- Ríos alóctonos:

Son ríos que cruzan lugares muy secas o áridas. Sin embargo, su nacimiento se encuentra en una zona de gran humedad y lluviosas. Como es el caso del río Colorado en USA o Okavango.

- Ríos transitorios:

Se encuentran en zonas donde las precipitaciones de lluvia es escasa y la zona es desértico o muy seco. Este tipo de río es muy peligroso, debido que cuando llueve de manera fuerte, reaparecen violentamente durante un corto tiempo.

- Ríos meandriiformes:

Se caracteriza por constar de un único canal de escurrimiento, pero en su recorrido genera un número considerable de meandros siendo de forma muy sinuosos. Los ríos meandriiformes debido a la velocidad de sus aguas tienen capacidad erosiva y afecta al terreno y llega a crear zonas sedimentarias.

- Ríos anatómosados:

Se diferencia del resto de ríos porque cuenta con diferentes canales y a pesar de tener menos erosividad, estos ríos tienen la capacidad de transportar material sedimentario en gran cantidad. Al toparse con un obstáculo lo rodean si es posible debido a que tienen poca energía erosiva.

Las principales partes en la que están dividido los ríos son 3 principalmente y son los siguientes:

- Curso superior:

Se encuentra en lo más alto del relieve de pendiente muy pronunciada, se considera como la parte donde nacen los ríos, aquí la capacidad erosiva es mayor y los ríos suelen pasar a través de los valles encajándose con el relieve.

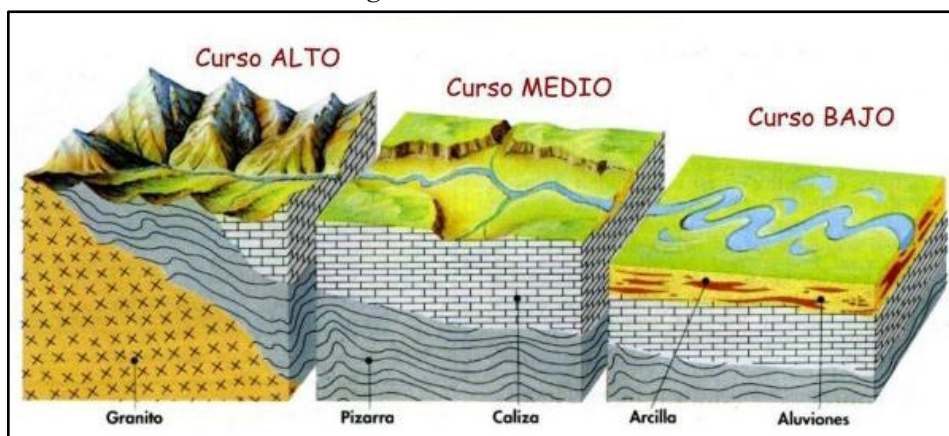
- Curso medio:

En el recorrido del río al llegar a esta parte el agua disminuye su velocidad, adoptando forma de palangana de manera seccionada en lugar de la forma en V que ira ensanchando el valle debido a la erosión horizontal de las vertientes.

- Curso inferior:

Esta zona está situada en superficies con áreas relativamente planas más bajas de la cuenca, debido a su velocidad pueden llegar a formar lagos. Al transcurrir el río arrastra cantidades considerables de material sedimentario, los cuales dan origen a la formación de islas sedimentarias o también denominadas deltas, etc.

Imagen 1: Partes de un río

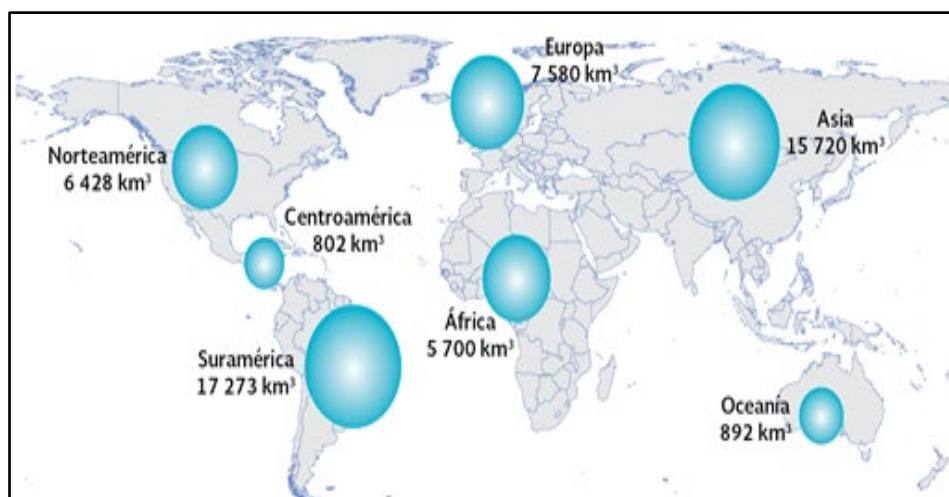


Fuente: EducAnimando

2.3.1.2 El agua

El agua es un líquido transparente que se encuentra en la naturaleza, es considerado como recurso natural necesario y renovable usado en el mundo, en su estado líquido habitualmente es obtenida de las precipitaciones, lagos, riachuelos, ríos y manantiales. Inclusive el agua en su estado de vapor se encuentra en la atmosfera logrando condensarse y generando nubes. [10]

Imagen 2: Reservas de agua dulce en el mundo por región



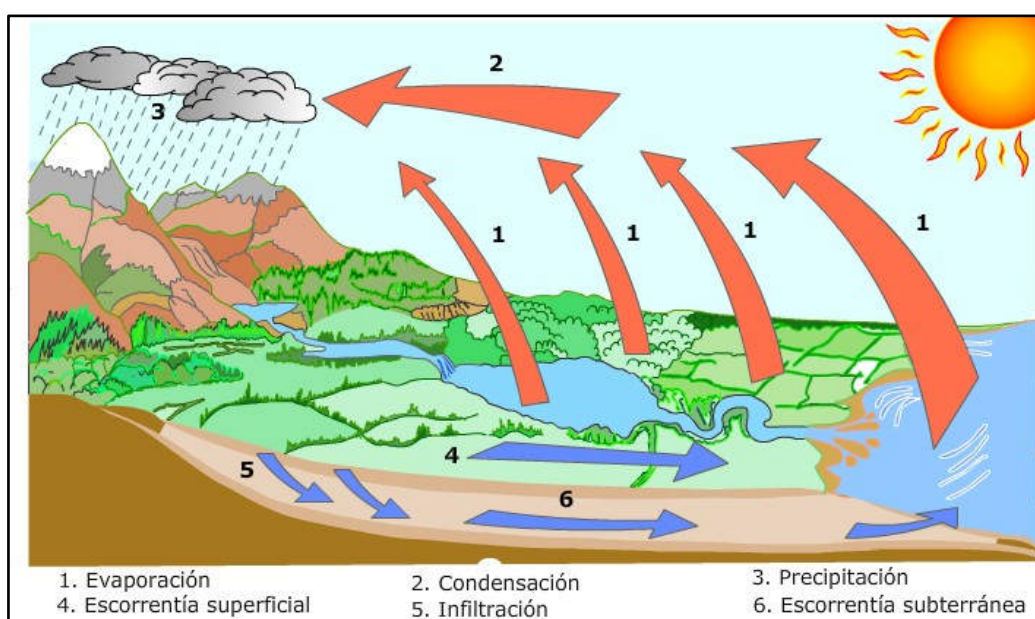
Fuente: Semarnat.gob.mx

Además, el agua aporta beneficios importantes para el desarrollo de actividades realizadas por personas y animales, incluso para el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas, minería, etc. Que se realizan diariamente, asimismo el agua puede lograr gran destrucción si no se logra controlar y cuidar nuestro entorno.

Ciclo del agua

Es el proceso hidrológico continuo más conocido debido a su proceso de circulación en diferentes estados en la esfera terrestre. “El ciclo hidrológico sirve para entender el funcionamiento bioquímico del sistema hídrico atmosférico, donde el agua experimenta una serie de cambios y se transforma sufriendo cambios a los tres estados de la materia. Por lo tanto el proceso del agua es de vital consideración para la estabilidad del planeta, mediante la circulación y transformación del agua a través de la atmosfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera” [11]

Imagen 3: Ciclo del agua



Fuente: Circuito productivo.com

2.3.1.3 Las cuencas hidrográficas

Definición:

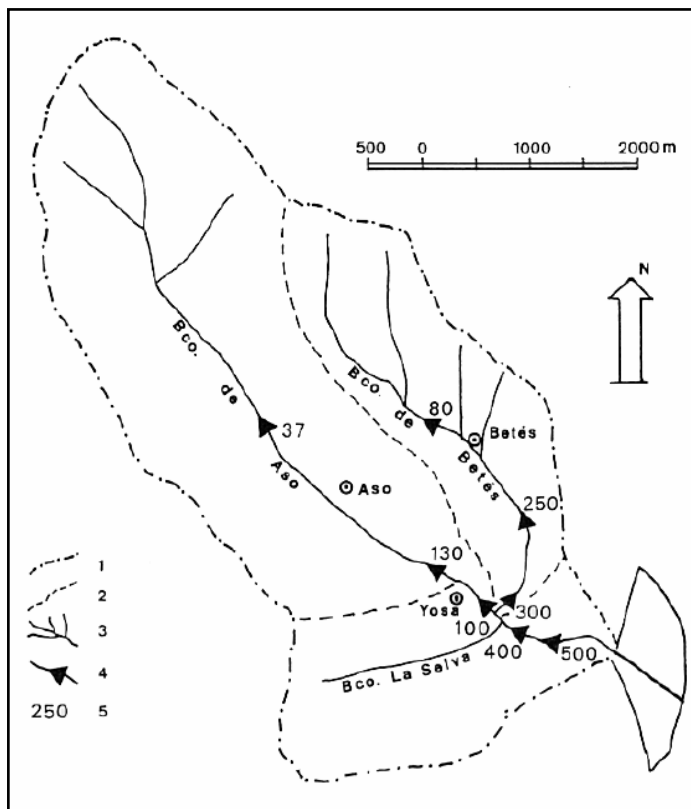
Es el área de terreno que está delimitado por único sistema de drenaje natural. Las cuencas hidrográficas permiten que se entienda el ciclo hidrológico de forma espacial y también identificar y cuantificar los impactos que generan las actividades del ser humano o las que causan los sedimentos, contaminaciones, etc.

“las cuencas hidrográficas son unidades funcionales y presentan confines bien marcados y salidas ya definidas, están organizadas de manera jerárquica, ya que estos suelen tener subdivisiones en subcuencas, limitadas por un parteaguas y donde se logran juntar los flujos que desembocan en el caudal principal de río”. [12]

Delimitación:

La delimitación de una cuenca se elabora con líneas imaginarias en un plano o mapas que cuenta con curvas de nivel que se definen altitudes siguiendo las líneas de las cumbres.

Imagen 4: Delimitación de una cuenca



Fuente: Researchgate.net – Aldo Prieto.

Superficie de la cuenca:

Es el territorio hidrográfico de la cuenca que se proyecta de forma no regular sobre un mapa en forma horizontal.

“Teniendo conocimiento de la forma irregular de la cuenca es muy irregular, los cálculos de la superficie o área, perímetro de la cuenca no se puede determinar por ecuaciones y formulas conocidas de geometría, no obstante, se usan métodos de cálculo como el planímetro y la balanza analítica” [13]

Longitud de cauce principal:

La longitud principal del cauce está definida por el intervalo en la que escurre el flujo del río entre la desembocadura aguas abajo y el lugar de su nacimiento ubicado a mayor distancia aguas arriba. Se puede medir considerando toda la sinuosidad.

Longitud máxima o recorrido principal de la cuenca:

Se considera como la longitud que existe desde el sitio de aforo hasta el sitio más distanciado de la cuenca hidrográfica siguiendo el sentido del escurrimiento, es la máxima longitud que recorre el caudal de agua en una cuenca.

Perímetro de una cuenca:

(Máximo Villón,2002), menciona que el perímetro del valle o cuenca hace referencia al contorno de la cuenca que al ser proyectada de forma horizontal en un plano adopta una forma no regular. Debido a irregular de su forma el perímetro se calculara haciendo uso de los siguientes procedimientos o métodos para su desarrollo: Uso de un hilo y uso del curvómetro. [13]

Longitud de cuenca:

Se determina como la longitud horizontal equivalente que recorre el agua a lo largo del lecho principal, iniciando desde en la parte más alta hasta su desembocadura.

Elementos de una cuenca hidrográfica:

Las cuencas hidrográficas de caracterizan por tener los siguientes elementos:

a) Recursos naturales

Se denomina recurso natural a los elemento que son propios de la naturaleza y que son aprovechables por el hombre para su satisfacer sus necesidades y que estas posean un valor considerable actualmente o un valor potencial al ser negociable [14], los recursos naturales se pueden asociar como recursos naturales no renovables (Petróleo, Carbón, Minerales, Gas, Etc.), recursos renovables como el agua, suelos, etc. y recursos inagotables (Luz solar, Vientos, Endotérmica, Oleaje, Etc.).

b) Elementos antropogénicos

Agrupar a todos los elementos desarrollados, construido o realizados por el hombre, dentro de los cuales se destacan los siguientes: Canales de riego, relaves contaminantes, reservorios, piscigranjas, actividades mineras, industriales, centrales hidroeléctricas y nucleares, etc. Además, algunos de estos elementos importantes que se debe tener en consideración son los restos arqueológicos, detalles culturales y por último la tecnología que se utilizará. [14]

c) Elementos institucionales

Al ser consideraciones dentro de las cuales sobresale la coordinación institucional, organización institucional, marco normativo y legal en relación al procedimiento para el estudio de las cuencas.

d) Aspectos gubernamentales

“El elemento de gran importancia que últimamente ha dejado de ser considerado pero que gravita ciertamente en el correcto manejo y adecuado aprovechamiento de los espacios físicos y de los recursos naturales que existen en una cuenca hídrica es la decisión de los políticos y la buena decisión de los gobiernos. Las decisiones que se llevan a cabo para aplicar y supervisar la adecuada ejecución del marco legal y normativo el cual permita un manejo adecuado y optima gestión de la cuenca, aplicando de forma plena dichas normativa y evitando la corrupción debido a favorecimientos de funcionarios a algunas empresas o individuos de manera ilegal con la finalidad de depredar, contaminar o evadiendo impuestos que afectan la sostenibilidad de los recursos y la cobranza de impuestos.” [14]

Partes de una cuenca hidrográfica

✓ Cuenca alta

También denominada como cabecera o de nacimiento se encarga de recoger y almacenar gran parte de los aportes de la precipitación, la sección alta cuenta habitualmente con grandes zonas montañosas que en su parte superior cuentan con líneas divisorias de aguas.

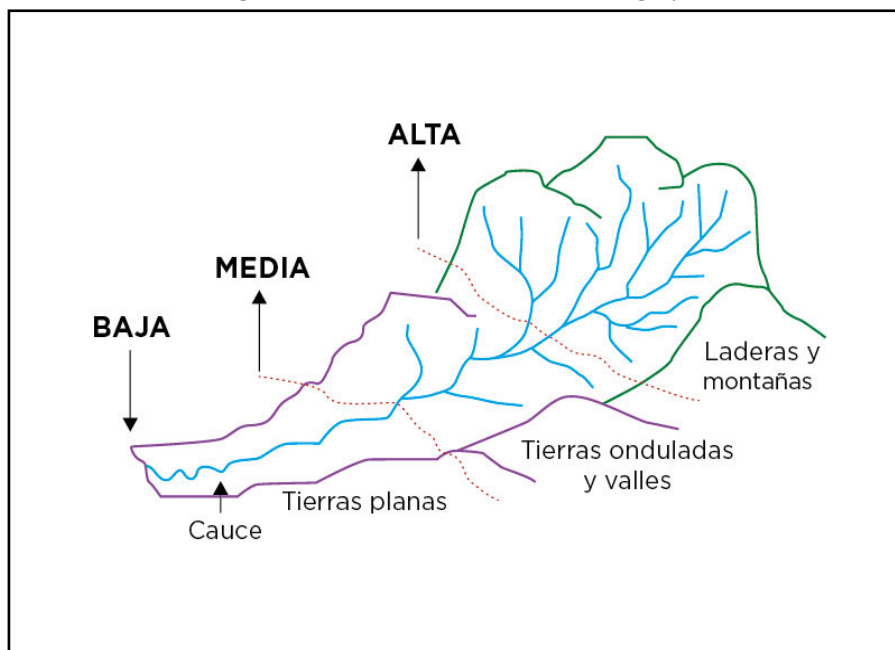
✓ Cuenca media

Denominada como la parte media de la cuenca, y está comprendida por las zonas de piedemonte y llanuras. En esta parte el cauce principal se mantiene definido. Esta parte de la cuenca de mayor pendiente relativa que tiene caudales caracterizados por descargas turbulentas, también es denominada como la zona transportadora de materiales sedimentarios.

✓ Cuenca baja

La cuenca baja conocida como zonas transicionales, cono de deposición o zona de depósito es la parte donde se genera un cambio drástico de pendiente, el cauce desemboca su flujo en las llanuras.

Imagen 5: Partes de una cuenca hidrográfica



Fuente: Aquabook.

Tipos de cuenca

Existen los siguientes tipos de cuencas:

- Endorreicas

Este término corresponde a los ríos en que cuyo flujo no tiene salida hacia el océano y suelen acabar en la parte continental, en lagunas o mares, tierras pantanosas o desaparecen de infiltración hacia acuíferos subterráneos.

- Exorreicas

denominadas a las aguas que tienen salida en los océanos es decir fuera del territorio, estas cuencas tienen muchas características complejas a lo largo del ciclo de agua de todo su sistema.

- Arreicas

Este tipo de cuenca corresponde a las cuencas que carecen de cursos de agua y suelen presentarse en zonas desérticas o en zonas donde es muy difícil observar la divisoria de aguas debido a su lento escurrimiento. Estas aguas tienden a evaporarse o se infiltran en el suelo.

Clasificación de las cuencas hidrográficas en el Perú.

Se cuenta grandes agrupaciones de cuencas hidrográficas según de donde deriven las aguas de los numerosos ríos en el Perú:

a) La cuenca del pacifico.

Es un espacio geográfico y está conformada por 62 cuencas que se singularizan por tener una forma accidentada, no muy ancha y angosta en las partes altas, está compuesta por cañones muy empinados que facilitan las descargas y por una corta amplitud en sus partes bajas debido la existencia de desiertos.

Se denomina cuenca del pacifico a todas las regiones que son tocadas por las aguas del océano pacifico, y esta es la principal región donde se realizan la cooperación económica e integración con respeto y de beneficio mutuo.

b) La cuenca del Atlántico.

Consta con 84 cuencas, cuya característica principal es por tener una gran precipitación en las zonas más elevadas con valles andinos más amplios y un escurrimiento más extenso, en varias zonas de estas cuencas de la vertiente del atlántico presentan un gran aprovechamiento para la generación de energía eléctrica producto de la fuerza hidráulica que son utilizadas correctamente.

c) La cuenca del Titicaca.

Cuenta con 13 cuencas que se identifican por estar junto al lago navegable considerado el más alto del mundo, con una altura promedio de 3809 msnm; por la eventualidad de las descargas de agua que ocurren en las partes más altas de la cordillera occidental que terminan su recorrido en el lago, contando con estacionalidades de escasez total de agua y varían alternadamente con inundaciones, logrando que las zonas aledañas del lago sean utilizadas más para la actividad ganadera que para la actividad agrícola.

2.3.1.4 Principales anomalías

a. Sequia

La sequía es un fenómeno climatológico que se da en una etapa prologado en el que una región no percibe suficiente agua para cubrir las necesidades de las plantas y de los

animales que viven en esa zona, incluyendo a los seres humanos. La sequía compromete un desequilibrio hidrológico y los lugares donde se almacena agua presentan niveles inferiores a los normales.

Las consecuencias pueden ser aún más fuerte que los generados por las tormentas, puesto que son más difíciles de definir y de prever. En 2007 la Convención de las naciones unidas sobre el cambio climático definido por primera vez el concepto de “migrante ambiental” que refiere a una persona que por obligación abandona su lugar habitual donde reside cuando se ve afectado por cambios repentinos en el medio ambiente.

Sin embargo, la tarea de examinar su gravedad con objetividad suele ser compleja ya que se desarrollan de manera gradual y de formas muy variables en cada región.

b. Inundación

Se determina como el cubrimiento de agua a llanuras o áreas que normalmente están secas, debido a la abundancia de agua esto genera catástrofes naturales con mayor número de víctimas en el mundo. Se producen debido a que los suelos no pueden absorber toda el agua esto genera que se incremente el nivel de las aguas de un río, lago a causa de fuertes precipitaciones o lluvias de larga duración. En algunos casos, las inundaciones son acontecimientos que el hombre puede controlar, esto dependerá de la utilización de material cercano a la ribera de los ríos.

Causas de inundaciones:

Los motivos que causan las inundaciones suelen ser de tipo parcial o totalmente debido al clima y generados por el ser humano. En función de las causas se observarán diferentes tipos de inundación.

Las lluvias muy prolongadas son las más comunes, la fusión de nieve. Luego tenemos a los factores que genera el clima como motivo principal de las avenidas, como claro ejemplo los estuarios, el embalse pueden ocasionar desbordes a causa de las máximas avenidas en momentos de incremento del nivel del agua. [15]

- Inundaciones producidas por las precipitaciones

Esta forma de inundación es el resultado de la circulación de agua por los bordes de manera superficial o no superficial dependiendo de las particularidades físicas y geomorfológicas de la cuenca que está cubierta por vegetación, suelos, pendiente, etc. El aumento de caudal no se genera en toda la cuenca de manera uniforme. Dependiendo de los motivos de las crecidas y de las circunstancias que las generan, pueden describirse de la siguiente manera:

- ***Crecidas relámpago o flash floods***, son las consecuencias generadas por las tormentas de gran violencia que duran un corto periodo de tiempo (horas, minutos). Estas formas lluviosas afectan a pequeñas superficies generando crecidas en algunas zonas de la cuenca. Muchas de estas se producen a causa de los huracanes, ciclones tropicales, tormentas de verano, etc.
- ***Crecidas simples***, la duración de esta crecida es mayor que en el flash floods. Este tipo de aumento de caudal es usual en varios lugares y son provocadas por precipitaciones que duran muchos días (lluvias generadas por bajas ciclónicas).
- ***Crecidas múltiples***, ocurren cuando se generan varios picos continuos de crecida. Es una situación meteorológicamente muy difícil, que suele compararse a lluvias que tienen una duración de muchas semanas o meses.
- ***Crecidas estacionales***, se observa cada año durante estaciones húmedas, con un periodo de aguas altas que se alarga varios meses y afectando áreas de inundación que tienen miles de km². Claro ejemplo es el río Nilo que presenta el mínimo caudal en el mes de mayo, con 570 m³/s, y un máximo de 8.440 m³/s en el mes de septiembre. Esto también sucede con la cuenca del Amazonas, donde todos los años tiende a inundarse una parte del bosque.

- Provocadas por la fusión la nieve

Estas causas de inundación se crean por la fusión de grandes capas de nieve y una fuerte ratio de fusión. Las grandes avenidas de caudal son resultado únicamente del a llegada al río de una cantidad considerable de agua de manera muy brusca. El aumento de caudal en los ríos se produce en zonas donde están cubiertas por nieve donde la temperatura varia de manera inesperada y se prolonga durante días o semanas.

- Provocadas por la fusión de hielo

Las inundaciones por fusión del hielo se generan en dos partes: el hielo que se forman en los glaciares y el hielo formado en los ríos de manera estacional en el invierno. En ciertos casos el deshielo es el motivo del aumento de caudal, la unión de estos procesos con otros factores es la que generan las crecidas.

- Inundaciones no producidas por precipitaciones

Se generan fuera del entorno por donde escurre el flujo, a consecuencia de otros factores unidos o independientes, etc. y estos factores son:

▪ Inundaciones de estuarios

Son producto de la acción de las mareas y al asentamiento de las riberas que filtra el agua del mar en el terreno lleno de agua (estuario) con el reflujo, llega a mantenerse un tiempo entre 12 horas o más. En eventos desfavorables, en los estuarios se logra generar inundaciones debido a la acción fuerte de una ola que impide el desagüe normal de un río.

▪ Inundaciones en las costas bajas (storm sorgo)

En la parte baja de la costa se producen inundaciones con cada ciclo de marea, también producen inundaciones debido al incremento del nivel del mar y este suceso está relacionado a las bajas presiones que existen acompañado de vientos fuertes.

▪ Inundaciones por tsunamis

Es provocado por los movimientos de placas tectónicas bajo el mar, erupciones volcánicas marinas o deslizamientos de placas. En mar abierto, las aguas no sobrepasan los 0.5m, no obstante, cuando llegan a la costa las aguas frenan de manera repentina generando olas inmensas superior a lo 6m de altura.

▪ Inundaciones por rotura o avería de embalses

Se da por aumento de agua muy violentas que generan grandes pérdidas humanas y bienes. Esta inundación puede generarse de forma natural. Ciertos de los ríos que tienen valles estrechos, tienden a obstruirse con la maleza de la zona o

por el deslizamiento de sus laderas. Una de las causas se debe por el desagüe irregular de los caudales de agua y por los daños del embalse.

2.3.1.5 Precipitación

(Máximo Villón,2002). Menciona que la precipitación es la caída de agua que se produce en las nubes y llegan hasta el suelo en forma de lluvias, granizadas, garuas. La precipitación se tiende a medir con un pluviómetro en términos de la altura de la lámina de agua (hp), y se representa en milímetros(mm). El nivel de lámina de agua señala el nivel del agua que se reuniría en el suelo.

Cálculo de precipitación media

Generalmente la altura de precipitación dependerá del sitio donde cae el agua y difiere de los sitios de su alrededor. Para muchos contratiempos hidrológicos se necesita conocer la lámina de agua de la precipitación diaria, mensual, anual. [13]

Polígono de Thiessen

Para el método del polígono de Thiessen es primordial conocer la localización de las estaciones en el área de análisis, Para su correcta aplicación es necesario delimitar el área de estudio de cada sección, dentro del grupo de puntos de las estaciones. Este método consiste en otorgar un factor r de peso al conjunto de precipitaciones en cada equipo o aparato, suministrar al área que influye en cada uno. Pero sin considerar las influencias orográficas.

Las zonas de influencia se representan en planos de la cuenca que contengan la ubicación de las estaciones, conectando los puntos de ubicación con líneas rectas y en enseguida trazando mediatrices logrando formar polígonos. Cada lado de los polígonos son los límites de las áreas que influye cada estación.

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i P_i$$

Donde:

P_{med} = Precipitación media

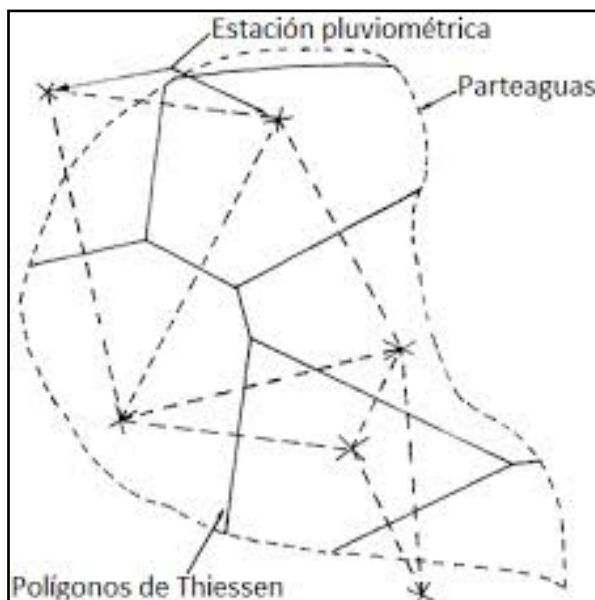
A_T = Área total de la cuenca

A_i = Área de influencia parcial del polígono de Thiessen correspondiente a la estación.

P_i = Precipitación de la estación.

n = Número de estaciones tomadas en cuenta

Imagen 6: Polígono de Thiessen



Fuente: Hidrología-Máximo Villón

2.3.1.6 Información hidrológica

El Perú es un país con limitaciones en la disposición de información hidrométricos como pluviométricos y gran cantidad de los valles hidrográficos no cuentan con adecuados instrumentos para la toma de datos. [16]

2.3.1.7 Área de estudio de las cuencas hidrográficas

El estudio y análisis de las cuencas hidrográficas en el País está abocado a establecer sus cualidades hidrológicas y morfológicas en función de lo que aporta y la manera de comportarse hídricamente. [16]

2.3.1.8 Periodo de retorno

Es el tiempo de recurrencia promedio que se espera calcular el valor del caudal máximo de una creciente determinada entre sucesos poco probables en diferentes años.

2.3.1.9 Análisis estadístico de datos hidrológicos

- Modelos de distribución:

El objetivo de analizar las frecuencias es valorar las precipitaciones, intensidades o flujos máximos, dependiendo del caso para diversos periodos de recurrencia, haciendo uso aplicativo de los modelos probabilísticos, estos suelen ser discretos o continuos. [16]

Según el (MTC,2008), la estadística presenta diferentes funciones de distribución de probabilidad teóricas; el cual recomienda usar las funciones que se detallan a continuación:

- Distribución Normal

La función está representada con la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2(\pi)}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2}$$

Donde:

$f(x)$ = función densidad normal de la variable X.

X = Variable independiente

μ = Parámetro de localización, igual a la media aritmética de XS.

S = Parámetro de escala, igual a la desviación estándar de X.

- Distribución Log Normal 2 parámetros

La distribución está representada con la siguiente ecuación:

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{2(\pi)}} \int_{-\infty}^{x_i} \left(\frac{-(x - X)^2}{2S^2} \right) dx$$

Conociendo:

S = Parámetros de distribución.

X= Parámetros de distribución

- Distribución Log Normal 3 parámetros

La función de densidad de x se representa de la manera siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{(x-x_0)\sqrt{2(\pi)S_y}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-x_0)-u_y}{S_y}\right)^2}$$

Para $x > x_0$

Donde:

X_0 = Parámetro de posición.

U_y = Parámetro de escala o media.

S_y^2 = Parámetro de forma o Varianza.

- Distribución Log Pearson tipo III

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$$

Valido para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < x_0 < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

Donde:

X_0 = Parámetro de posición.

γ = Parámetro de forma.

β = Parámetro de escala

- Distribución Gamma 2 parámetros

La función de densidad se expresa en la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$$

Válido para:

$$0 \leq x < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Donde:

γ = Parámetro de forma.

β = Parámetro de escala

- Distribución Gamma 3 parámetros

La función de densidad se expresa en la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$$

Válido para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty \leq x_0 < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Donde:

X_0 = Origen de la variable x, parámetro de posición.

γ = Parámetro de forma.

β = Parámetro de escala

- Distribución Gumbel

La distribución de valores de tipo I al igual que la distribución de Gumbel o también conocido como doble exponencial, se expresa en la siguiente ecuación:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Usando el método de valoración de parámetros(momentos), se despejan después de relacionar las expresiones siguientes:

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma}$$

$$\beta = \mu - 0.45\sigma$$

Donde:

α = Parámetro de concentración.

β = Parámetro de localización.

- Distribución Log Gumbel

La variable aleatoria reducida log Gumbel, se define como:

$$y = \frac{\ln x - \mu}{\alpha}$$

Reduciendo la variable aleatoria de Gumbel obtenemos la función acumulada:

$$G(y) = e^{-e^{-y}}$$

▪ Pruebas de bondad de ajuste:

“Son pruebas de hipótesis consideradas no paramétricas que se utilizan para evaluar si existe diferencias entre un conjunto de datos observados y una muestra teórica. En la teoría estadística, las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son la χ^2 y la Kolmogorov – Smirnov” [16]

Prueba Kolmogorov-Smirnov

El (MTC. 2008), menciona que es el método que cerciora la bondad de ajustes de las distribuciones, del mismo modo facilita la selección más representativa, considerada la de mejor ajuste. La prueba en mención compara el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad que se observa F_0 y la que se estima $F(xm)$:

$$D = \text{máx}|F_0(xm) - F(xm)|$$

Contando con valores críticos d que dependan del número de datos y el nivel de significancia optado. Si $D < D_c$, se considera que la hipótesis es nula. esta prueba tiene superioridad sobre la prueba de X^2 ya que realiza comparaciones de los datos con el modelo estadístico sin necesidad de juntarlos. La función de distribución de probabilidad mostrada se calcula como: [16]

$$F_0(xm) = 1 - m/(n + 1)$$

Donde:

m = Número de orden de dato xm en una lista de mayor a menor

n = Número total de datos.

Tabla 2: Valores críticos de para la prueba Kolmogorov-Smirnov

TAMAÑO DE LA MUESTRA	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
35	0.20	0.22	0.27
40	0.19	0.21	0.25

Fuente: Aparicio,1999.

2.3.1.10 Estudio de tormenta

Es la agrupación de lluvias que tienen una misma alteración meteorológica y de peculiaridades bien definidas. El estudio de las tormentas tiene relación con los cálculos o estudios que se realizan previamente al diseño de infraestructuras de ingeniería hidráulica como estudio de drenaje, determinación de flujos máximos, conservación de suelos, cálculo de diámetros de alcantarillas. [13]

Determinación de la tormenta de diseño

El principal paso en varios proyectos de diseño es determinar el evento de precipitación que se va a usar. Una tormenta de diseño es un modelo de precipitación ya establecido para ser utilizado al diseñar sistemas hidrológicos. eventualmente la tormenta de diseño está

conformado por la entrada al sistema, y los caudales que resulta a través de éste, se calculan mediante el uso de procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. [16]

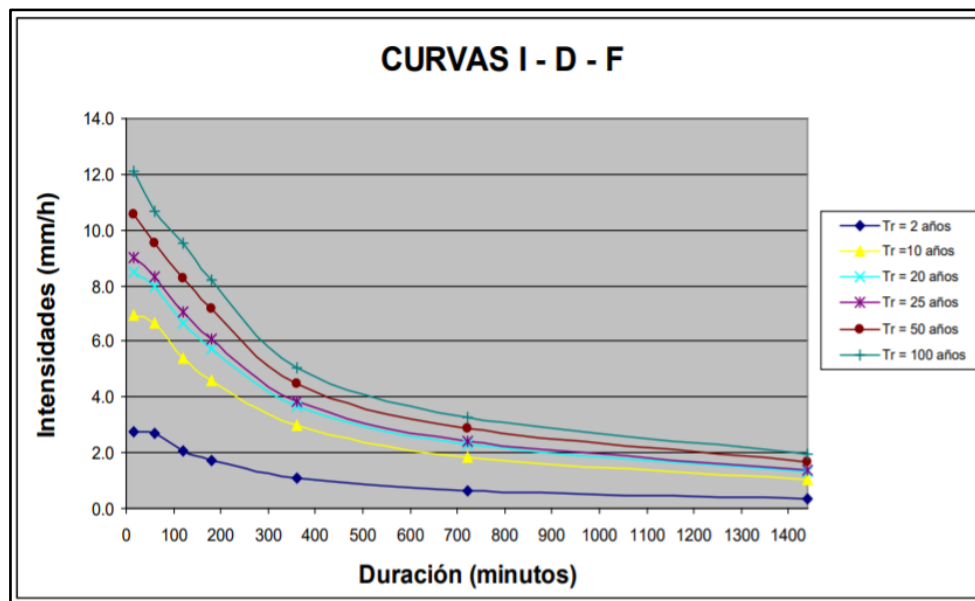
Curvas Intensidad - Duración – Frecuencia

“La intensidad es el grado de fuerza de las precipitaciones, es decir, la altura por unidad de tiempo (mm/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia” [16]

Las curvas intensidad – duración – frecuencia son fundamentales para el diseño porque asocian la fuerza de la lluvia, su duración y la frecuencia con la que pueda ocurrir o su periodo de recurrencia.

Para resolver estas curvas IDF se tiene que contar con una base de datos pluviográficos de lluvia en la zona objeto de estudio y elegir la lluvia con mayor intensidad con duraciones diferentes en cada año, con la finalidad de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas. En conclusión, se deben analizar los hietogramas de las tormentas que ocurren en un año y de estos hietogramas seleccionar la lluvia correspondiente a la hora con mayor precipitación, a las dos, tres, cuatro horas más lluviosas y así sucesivamente, con los valores que se eligen se forman series anuales para cada una de las duraciones seleccionadas. [16]

Gráfica 1: Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia



Fuente: Ministerio de Transportes y comunicaciones (MTC),2008.

Las curvas de intensidad – duración – frecuencia suelen representarse mediante ecuaciones con la finalidad de evitar el análisis de intensidad de lluvia de diseño en una gráfica. Y se representa de la siguiente manera:

$$I = \frac{a}{(D + b)^m}$$

Donde:

I = Intensidad de lluvia de diseño

D = Duración

a y b = Coeficientes que varían con el lugar y el periodo de retorno.

Tabla 3: Coeficientes de duración lluvias entre 48 horas y una hora

DURACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN HORAS	COEFICIENTE
1	0.25
2	0.31
3	0.38
4	0.44
5	0.50
6	0.56
8	0.64
10	0.73
12	0.79
14	0.83
16	0.87
18	0.90
20	0.93
22	0.97
24	1.00
48	1.32

Fuente: Ministerio de Transportes y comunicaciones (MTC),2008.

“En el Perú, a causa de la poca cantidad de información pluviográficos que se tiene, complica la elaboración de estas curvas. Regularmente solo contamos con datos de precipitaciones máximas en 24 horas, debido a esto el valor de la fuerza de la precipitación máxima, se calcula a partir de la precipitación máxima en 24 horas, y luego se multiplica por un coeficiente de duración.

En la Tabla N° 03 se presentan coeficientes de duración de una hora hasta 48 horas, estos coeficientes deben usarse, con criterio y mucho cuidado para realizar el cálculo de la intensidad, cuando no se tenga una mejor información” [16]

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia, se han calculado de manera indirecta, usando la siguiente relación:

$$I = \frac{KT^m}{t^n}$$

Donde:

I = Intensidad máxima (mm/h)

K, m, n = Factores característicos de la zona de estudio

T = Periodo de retorno en años

t = Duración de la precipitación equivalente al tiempo de concentración (min)

2.3.1.11 Tiempo de concentración

Es el tiempo que requiere una gota de agua para ir desde su nacimiento hasta su desembocadura en la llanura. Pasado el tiempo de concentración se entiende que todo el cauce de la cuenca contribuye a la salida. Debido a la existencia de una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad, es decir si hay mayor duración disminuiría la intensidad de flujo, asumimos que la duración crítica llega a igualar al tiempo de concentración t_c . El tiempo de concentración va a depender de diversas circunstancias, al igual que de la geometría en planta de la cuenca, es decir que una cuenca alargada contará con un mayor tiempo de concentración y dependerá de que tan pronunciada sea su pendiente ya que si es mayor producirá caudales más veloces en poco tiempo de concentración, dependerá del área, las propiedades del suelo, cobertura vegetal, etc. [16]

La ecuación para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$t_c = t_0 + t_f$$

Donde:

t_0 = Tiempo de entrada.

t_f = Tiempo de flujo en los alcantarillados hasta el punto de interés $= \sum \frac{L_i}{V_i}$

Tabla 4: Formulas para el cálculo del tiempo de concentración

MÉTODO Y FECHA	FÓRMULA PARA t_c (minutos)	OBSERVACIONES
Kirpich (1940)	$t_c = 0.01947.L^{0.77}.S^{-0.385}$ <p>L = longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m. S = pendiente promedio de la cuenca, m/m</p>	Desarrollada a partir de información del SCS en siete cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%); para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar t_c por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas.
California Culverts Practice (1942)	$t_c = 0.0195\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$ <p>L = longitud del curso de agua más largo, m. H = diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.</p>	Esencialmente es la ecuación de Kirpich; desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California.
Izzard (1946)	$t_c = \frac{525.(0.0000276.i + c).L^{0.33}}{S^{0.333}.i^{0.667}}$ <p>i = intensidad de lluvia, mm/h c = coeficiente de retardo L = longitud de la trayectoria de flujo, m. S = pendiente de la trayectoria de flujo, m/m.</p>	Desarrollada experimentalmente en laboratorio por el Bureau of Public Roads para flujo superficial en caminos y Áreas de céspedes; los valores del coeficiente de retardo varían desde 0.0070 para pavimentos muy lisos hasta 0.012 para pavimentos de concreto y 0.06 para superficies densamente cubiertas de pasto; la solución requiere de procesos iterativos; el producto de i por L debe ser ≤ 3800 .
Federal Aviation Administration (1970)	$t_c = 0.7035\frac{(1.1 - C).L^{0.50}}{S^{0.333}}$ <p>C = coeficiente de escorrentía del método racional. L = longitud del flujo superficial, m. S = pendiente de la superficie, m/m</p>	Desarrollada de información sobre el drenaje de aeropuertos recopilada por el Corps of Engineers; el método tiene como finalidad el ser usado en problemas de drenaje de aeropuertos pero ha sido frecuentemente usado para flujo superficial en cuencas urbanas.
Ecuación de retardo SCS (1973)	$t_c = \frac{0.0136.L^{0.8}\left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{S^{0.5}}$ <p>L = longitud hidráulica de la cuenca mayor trayectoria de flujo), m. CN = Número de curva SCS S = pendiente promedio de la cuenca, m/m.</p>	Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 800 Ha; se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra completamente pavimentada; para áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación; se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización de superficies; la ecuación supone que $t_c = 1.67$ x retardo de la cuenca.
Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley (1965) Aron y Erborge (1973)	$t_c = \frac{7.L^{0.6}.n^{0.6}}{I^{0.4}.S^{0.3}}$ <p>L = longitud del flujo superficial, m. n = coeficiente de rugosidad de Manning. I = intensidad de lluvia, mm/h. S = pendiente promedio del terreno-m/m.</p>	Ecuación para flujo superficial desarrollada a partir de análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial desde superficies desarrolladas; el método requiere iteraciones debido a que tanto I (Intensidad de lluvia) como t_c son desconocidos, la superposición de una curva de intensidad - duración - frecuencia da una solución gráfica directa para t_c .

Fuente: Soil Conservation Service (SCS).

2.3.1.12 Hietograma de diseño

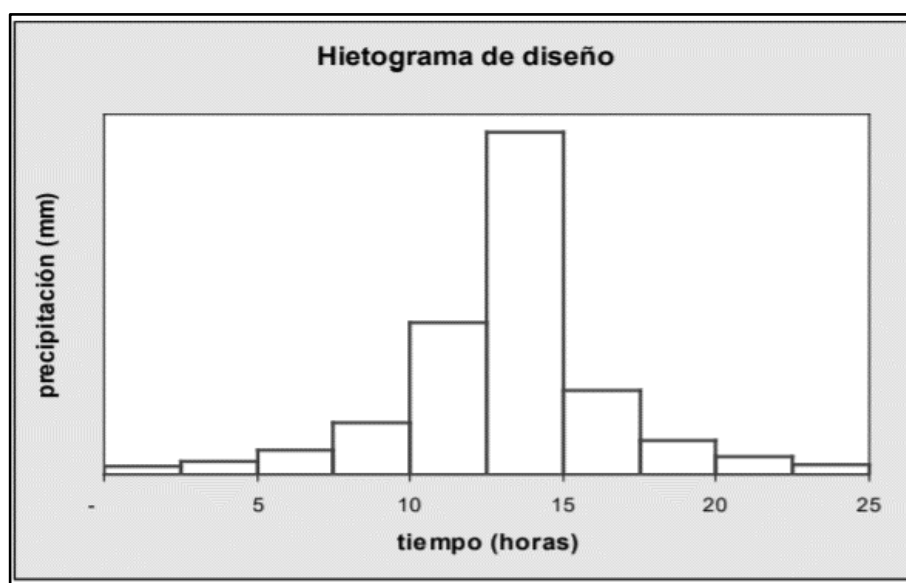
Los procedimientos hidrológicos más actuales no sólo necesitan conocer el valor de lluvia o la intensidad de diseño, sino necesita del método que estudia la distribución de las tormentas que se observan en el tiempo. Sin embargo, se puede obtener a partir de las curvas IDF, siendo una forma sencilla de obtener usando el Método del Bloque Alterno.

Método del Bloque Alterno

El procedimiento de este método es menos complejo para resolver un hietograma de diseño. El hietograma desarrollado por este método señala la altura de precipitación en n intervalos de una serie de tiempos sucesivos de duración Δt , sobre una duración final o total de $T_d = n \cdot \Delta t$.

Logo de haber elegido el periodo de recurrencia o de retorno para el diseño, la fuerza o intensidad es observada en una curva IDF para los diferentes tiempos de duración Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, $4\Delta t$, y la altura o profundidad se halla del producto de la intensidad y la duración. Tomando el resultado de las diferencias sucesivas que hallamos entre valores profundidad de precipitación, se halla la cantidad de precipitación que debe agregarse por cada unidad de tiempo Δt que se adiciona. Estos aumentos o bloques se reacomodan en una secuencia de tiempo de modo que la intensidad máxima suceda en el centro de la duración que se requiere T_d y que las demás barras queden de manera descendente alternativamente en ambos lados derecha e izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño. [16]

Gráfica 2: Hietograma de diseño



Fuente: Ministerio de Transportes y comunicaciones (MTC), 2008.

2.3.1.13 Estimación de caudales

Cuando se cuenta con una cantidad de datos suficientes de aforo, se ejecuta un análisis estadístico de los flujos máximos instantáneos de todo el año para el aparato de medición más cercano al lugar objeto de estudio. Se miden los flujos para los siguientes períodos de recurrencia de interés (2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años) haciendo uso de la distribución log normal, log Pearson III, Gammas y Valor Extremo Tipo I (Gumbel), etc.

En caso de contar con datos y valores de capacidad de aforo, se hace uso de los valores de precipitación considerándolo como datos de entrada a una cuenca y que generan un flujo Q . cuando acontece la precipitación, la cuenca tiende a humedecerse de forma progresiva y logra infiltrarse una gran parte en el subsuelo, por lo tanto, el flujo se transforma en flujo superficial.

Hidrograma unitario

El hidrograma es un método que se usa para determinar el caudal que produce las lluvias en una cuenca y se muestra en un gráfico la alteración de información hidrológica obtenida durante un tiempo; el hidrograma unitario interviene en la predicción de crecientes dando como datos estimados los caudales de ríos luego de una precipitación.

- **Hidrograma sintético**

Al igual que los hidrogramas naturales, se cuentan con hidrogramas considerados sintéticos ya que son simulados, artificiales o datos teóricos que son obtenidos al usar las características fisiográficas y parámetros de la cuenca objeto de estudio. El objetivo del hidrograma sintético es mostrar con simulaciones un hidrograma representativo del fenómeno hidrológico que ocurra en la cuenca, y así fijar el caudal máximo para diseñar.

- **Sistema de modelamiento hidrológico (HEC-HMS)**

El sistema de modelo hidrológico que tiene como característica realizar simulaciones de todo proceso hidrológicos que ocurre en una cuenca. El programa contempla varios procesos habituales de análisis hidrológico y da libertad de realizar una representación al usuario, el modelo HEC-HMS solo representa las redes hidrológicas en forma de árbol considerando un tronco principal y las ramas que se consideran como redes tributarias.

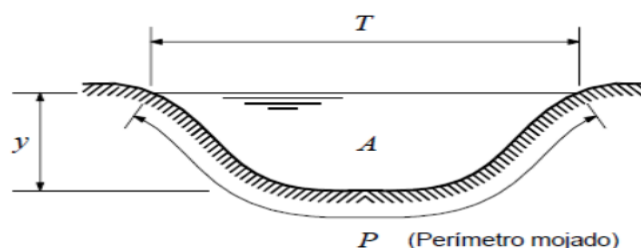
2.3.2 HIDRÁULICA

2.3.2.1 Movilidad fluvial

Hidráulicamente, es el proceso en la que un río modifica su superficie transformándose en un canal natural. Sin embargo, la forma de comportarse de un río difiere bastante de la representación que generalmente realizamos al analizar el flujo en canales. En un cauce prácticamente no hay movimiento permanente, debido a que el flujo varía constantemente de manera lenta y en otras de forma rápida.

En los canales construidos por el ser humano, la superficie del borde tiende a ser rígida e invariable. Sin embargo, en un canal o río de fondo móvil la superficie del contorno está modificándose frecuentemente.

Imagen 7: Lecho natural y Lecho móvil



Fuente: Hidráulica de tuberías y canales-Arturo Rocha Felices.

2.3.2.2 Conductos abiertos

Los conductos hidráulicos abiertos tienen una característica singular por contar con superficies despejadas que están en contacto con el aire. El flujo es producido debido al producto del peso del fluido. Por tal motivo teniendo en cuenta el punto de vista hidráulico, un canal tiene un comportamiento similar a un río.

finalmente conjeturamos que el flujo del cauce es constante y uniforme. Teniendo un canal podemos obtener un cierto grado de estabilidad manteniendo firme el caudal. En los ríos sólo de manera inusual se puede lograr la permanencia como es el caso del flujo regulado aguas debajo de una represa o embalse. [17]

2.3.2.3 Propiedades geométricas de la sección transversal

- Radio hidráulico (R):

Es un parámetro importante que resulta de relacionar el área mojada entre el perímetro mojado, es importante para el dimensionamiento de un conducto hidráulico.

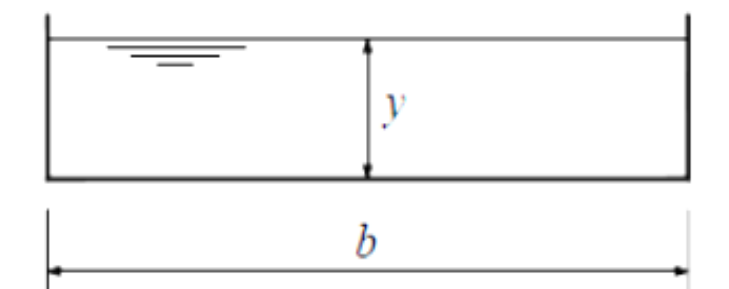
- Tirante hidráulico (d):

Es la distancia vertical que hay en un río, obtenida a partir de relacionar el área de la sección A entre el espejo de agua T .

- Tirante (y):

Es la longitud de profundidad del flujo desde el lecho del canal hasta la superficie que está en contacto con la atmósfera.

Imagen 8: Parámetros de la sección transversal de un canal

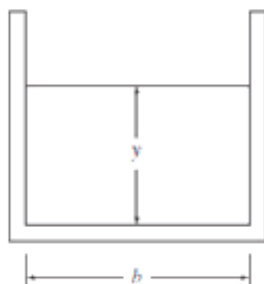


Fuente: Hidráulica de tuberías y canales-Arturo Rocha Felices.

- Radio hidráulico en un canal muy ancho:

Cuando la longitud de ancho b del cauce o río es bastante mayor que su profundidad o tirante y , se interpreta que es un canal de ancho considerable. Esto facilita realizar cálculos más rápidos y sencillo.

Imagen 9: Radio hidráulico en un canal muy ancho.



Fuente: Hidráulica de tuberías y canales-Arturo Rocha Felices.

$$A = by$$

$$P = b + 2y$$

$$R = \frac{by}{b + 2y} = \frac{y}{1 + 2\frac{y}{b}}$$

En canales con dimensiones anchas y/b es pequeño y se considerara como $R = y$
Es decir, que en canales anchos el radio hidráulico sería igual al tirante.

2.3.2.4 Coeficientes de rugosidad de Manning

Se presenta un cuadro con valores de n para diferentes tipos de canales, cada uno de los tipos de canales muestran valores mínimo, normal y máximo de n .

Tabla 5: Valores del coeficiente de rugosidad

TIPO DE CANAL		MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO	
D. CORRIENTES NATURALES	D.1. CORRIENTES MENORES (ANCHO SUPERF. < 30 m)	a. Ríos en planicies rectos, sin zonas muertas	0.025	0.030	0.033
		rectos sin zonas muertas con piedras y malezas	0.030	0.036	0.040
		Sinuoso, vegetación y piedras	0.035	0.045	0.050
		Sinuoso, vegetación y bastante pedregoso	0.045	0.050	0.060
		Abundante vegetación, sinuoso.	0.075	0.100	0.150
		b. Torrentes de montaña, sin vegetación, bordes abruptos.	0.030	0.040	0.050
		Árboles y arbustos sumergidos	0.040	0.050	0.070
		Parcialmente en crecidas con piedras y Pocas rocas grandes rocas y piedras en el fondo.			
D.2 PLANICIES DE INUNDACION	a. con pasto sin arbusto	0.025	0.030	0.035	
	pastizales bajos	0.030	0.035	0.050	
	pastizales altos				
	b. áreas cultivadas sin cultivo	0.020	0.030	0.040	
	con cultivos	0.030	0.040	0.050	
	c. Arbustos y Malezas escasos	0.040	0.060	0.080	
	densos	0.070	0.100	0.160	
	d. Arboles sauces	0.110	0.150	0.200	
	tierra despejada con troncos	0.030	0.040	0.050	
D3 Ríos Principales (ancho superior a 30 m)	Secciones Regulares	0.025	-	0.060	
	Secciones Irregulares	0.035	-	0.100	

Fuente: Ministerio de Transportes y comunicaciones (MTC),2008.

2.3.3 TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS

Existen los modelos físicos y modelos matemáticos, dentro de los modelos matemáticos se pueden clasificar desde distintos puntos de vista:

2.3.3.1 En función del enfoque físico del problema

✓ Modelo Euleriano

En este modelo se fija en un punto (x, y, z) en el espacio, aquí es importante tener conocimiento de las características del flujo como la densidad de temperatura del flujo, su velocidad, de todas las partículas que crucen por el punto como función del tiempo. Si hacemos lo mismo para los puntos que se encuentren en el espacio que ocupa el flujo se obtendría una mejor descripción detallada del flujo. Este modelo otorga a cada coordenada del espacio y en un instante determinado un valor a las propiedades o magnitudes del fluido sin tomar en cuenta la importancia de la porción de flujo que en ese momento ocupa esa coordenada, pero que no está unida a la porción de flujo sino a las coordenadas del espacio ocupados por el fluido.

✓ Modelo Lagrangianos

En este modelo se encarga de seguir a cada partícula o conjunto de partículas fluidas en su movimiento, de tal modo este método busca funciones o ecuaciones que den la ubicación, así como las características y propiedades de la partícula fluida en todos instantes posibles. Capta una partícula de fluido que está en movimiento y se encarga de seguirla.

El modelo Euleriano difiere del langragiano ya que este no sigue el rastro de la ubicación y la velocidad de un grupo de partículas fijas, a cambio definen variables de campo, funciones del espacio y el tiempo dentro de un volumen de control.

2.3.3.2 Número de dimensiones

✓ Unidimensionales

En los métodos que consta con una sola dimensión es común representar el río en forma de línea, que consta de un conjunto puntos de cálculo que conocemos como secciones transversales, de modo que la característica geometría del rio es que cuenta con un conjunto de puntos que se calculan. Para usar este método debe

cumplir condiciones fundamentales que afecten los resultados del diseño, cabe mencionar que el flujo de agua se desarrolla en dirección del eje del cauce y perpendicular a cada una de las secciones transversales siendo la cota y la velocidad constantes en cada sección. El programa HEC-RAS es muy práctico para ser usado en métodos unidimensionales.

El modelo o diseño unidimensional es capaz de resolver las ecuaciones de Saint Venant para los flujos permanentes y no permanentes. La herramienta numérica desarrolla las ecuaciones en sentido del cauce del río dentro teniendo dominio de la región a estudiar.

✓ Bidimensionales

Considerando dos dimensiones el cauce ya no se divide o discretiza como una línea con una sucesión de secciones transversales, más bien como un diagrama en forma de malla compuesta por varias celdas en forma de polígono que muestran la topográficamente el cauce y las zonas de inundación. Esta malla o diagrama puede ser de forma regular o irregular, estructurada o no estructurada. Para una correcta representación de la geometría y contornos se recomienda que la malla sea irregular.

✓ Tridimensionales

El empleo de modelos tridimensionales para el desarrollo y estudio de zonas inundables no es muy común a diferencia de los modelos 1D y 2D, debido a que la extensión espacial del modelo requiere el uso de mallas de cálculo de bastantes millones de elementos, con un elevado coste computacional. Los modelos 3D que son utilizados para la hidráulica fluvial suelen tener limitaciones para el estudio del flujo local en meandros o en estructuras hidráulicas como pilas de puentes, vertederos o compuertas.

Los modelos 3D emplean diversos tipos de discretización espacial que suelen estar relacionado con el método que se utiliza para el procedimiento de la lámina libre. Una alternativa muy empleada son las capas sigma que sirven para generar la discretización vertical el cual consiste en una malla 2D horizontal de donde se crean una cantidad determinado de capas en la dirección vertical teniendo un espesor

variable que se distribuyen entre el fondo y la lámina libre. Sin embargo, existen algunos softwares para modelamiento 3D, tales como Flow3D, el cual es usado en una gran variedad de softwares de ingeniería hidráulica, fluvial y medioambiental, incluso ayuda a calcular áreas inundables.

2.3.3.3 Variación temporal

✓ Régimen permanente

Se distingue porque las condiciones de las velocidades de escurrimiento en diferentes puntos que no varían en el transcurso del tiempo, es decir se mantiene firme en el tiempo o si las variaciones en régimen permanente son muy pequeñas en relación a los valores medios.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 ; \quad \frac{\partial P}{\partial t} = 0 ; \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$

✓ Régimen no permanente

Las propiedades de un flujo tienen lugar cuando se comienza a operar bombas de instalación y las características mecánicas del flujo serán distintas en todos los puntos de su campo de estudio, sin embargo, las propiedades de un punto difieren en un instante y se interpretará que es un flujo estacionario.

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 ; \quad \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0$$

2.3.3.4 Método matemático de resolución de las ecuaciones

Ecuaciones diferenciales, son aquellas que enlazan de manera no superficial a una función no conocida y una o más derivadas de esta función desconocida con respecto a una o más variables independientes.

Si la función desconocida obedece a una sola variable la ecuación diferencial se le conoce como ordinaria, por lo opuesto, si depende de varias variables, se le denomina parcial.

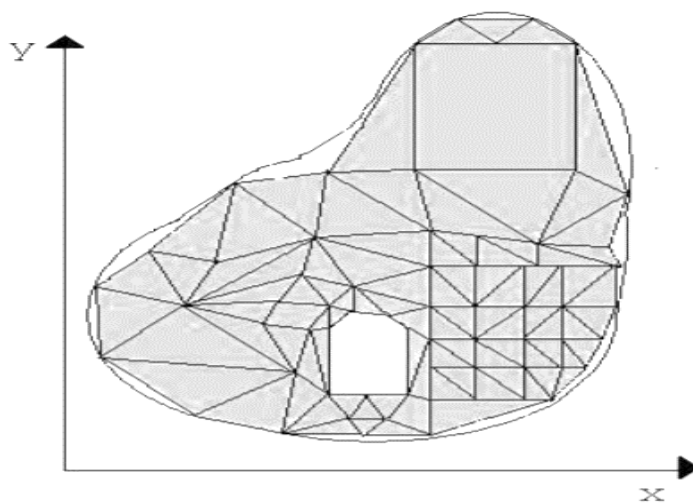
✓ Diferencias finitas

Este método consiste en técnicas para resolver problemas de ingeniería convirtiendo derivadas parciales a expresiones algebraica de carácter general que facilita las soluciones en recintos finitos. Es de una gran simplicidad conceptual y lo conforma un método procedimental bastante adecuado para la solución de una ecuación bidimensional.

✓ Elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) ha conseguido gracias al uso de las computadoras una gran consideración en el desarrollo de preguntas de ingeniería, física, etc. Este método ayuda a resolver casos que en os últimos años eran difíciles de dar solución por métodos matemáticos habituales. Años atrás los problemas obligaban a ejecutar diseños para poner a ensayar e ir realizando las mejoras necesarias de manera iterativa, lo que conlleva un incremento de costo económico e inversión de tiempo de desarrollo. El MEF nos facilita con el uso de un modelo matemático de cálculo de una manera más real, más fácil y sobre todo más económico de modificar a diferencia de un prototipo. No obstante, no deja de ser un método con resultados aproximados de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. En conclusión, los prototipos seguirán siendo importantes y necesarios, pero en menores cantidades.

Imagen 10: Discretización de un dominio bidimensional



Fuente: Simulación numérica de flujo de fluidos en 2D utilizando el método de elementos finitos mínimo cuadrado, (Valencia 2004).

El concepto del método de los elementos finitos es la fragmentación de un de un grupo de elementos pequeños que están unidos por un grupo de puntos o nodos. Las ecuaciones que gobiernan la forma de comportarse del continuo también lo harán para el elemento. De esta manera se logra cambiar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es gobernado por una ecuación diferencial o un conjunto de ecuaciones diferenciales, a un sistema donde su comportamiento se diseña por un conjunto de ecuaciones lineales o no lineales.

Sin importar el tipo de sistema a analizar se logra distinguir entre:

- **Dominio.** – Es el espacio geométrico a ser evaluado por el sistema.
- **Condiciones de contorno.** – Son valores conocidas que suelen limitar el cambio del sistema como cargas, desplazamientos, temperaturas, etc.
- **Incógnitas.** – Son variables que deseamos conocer del sistema luego de que las condiciones de contorno han actuado sobre el desplazamientos, tensiones y temperaturas.

✓ Volúmenes finitos

Este método nos permite discretizar y dar solución matemáticamente a las ecuaciones diferenciales. Este método es opcional respecto a los métodos de diferencias finitas y elementos finitos. Se considera una red o malla de discretización del espacio fluido. Respecto a cada punto o coordenada de esta malla se desarrolla un volumen de control que no se superpone con puntos de los alrededores.

De esta manera toda la capacidad del fluido da como resultado la igualdad a la suma de los volúmenes de control que se han considerado. La ecuación diferencial a desarrollar se integra sobre cada volumen de control, y este da como solución una versión discretizada de la ecuación. Para resolver la integración es necesario detallar perfiles de variación de la variable dependiente entre puntos de la malla, de tal manera luego poder evaluar las integrales que dan como resultado. La propiedad más importante del sistema de ecuaciones es que el resultado obtenido cumple exactamente con las ecuaciones de conservación que se consideraran de manera independiente del tamaño de la red o malla.

Una propiedad fundamental del FVM es que los principios de conservación de masa, momentum y conservación de energía son valorados por las ecuaciones discretas que resulta de la evaluación por el método de volúmenes finitos que conforman los fundamentos de la modelación matemática.

El método no sólo aplica a problemas hidráulicos, de forma genérica engloba los pasos que se mencionan a continuación:

- Primero el dominio se debe descomponer en volúmenes de control.
- Proponer ecuaciones con integrales de conservación dado a cada uno de los volúmenes de control.
- Aproximar matemáticamente las integrales.
- Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales.
- Unir y dar solución a la ecuación algebraico que se obtiene.

El método de volúmenes finitos parte con la separación de espacios geométricos en reducidos volúmenes de control (VCs) obteniendo como resultado el almacenamiento de las variables en los nodos.

Una vez definido los VCs, las ecuaciones de conservación son definidos por cada volumen en su forma integral para cada una. En esta etapa el teorema de la divergencia de Gauss es utilizado para transformar integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de superficie.

La siguiente ecuación de transporte se escribe así:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi$$

Entonces queda:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho V \phi \cdot dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV$$

Donde:

ϕ = Variable transportada.

ρ = Densidad.

Γ = Constante de difusión.

V = Velocidad.

S_ϕ = Término fuente.

✓ Lagrangianos (SPH)

Este método es denominado “Hidrodinámica Suavizada de Partículas”, (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) tiene ciertas propiedades particulares sustancialmente distintas a las de otros modelos actualmente en uso. Una mayoría de las aplicaciones Lagrangianos (SPH) se han desarrollado para problemas de mecánica de fluidos, el principio sobre el que se sustenta el método puede ser considerado una técnica común para la solución numérica de modelos matemáticos de medios continuos, alternativa a otras como los métodos de diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos, etc. SPH es el exponente más maduro de los conocidos “Métodos sin Malla” (meshless methods), algunos autores determinan como la próxima generación de métodos numéricos.

Como consecuencia, el método puede tratar de forma restrictiva caudales con grandes deformaciones de las áreas libres, incluyendo grandes deformaciones, rotura y fragmentación, incorporando también de manera natural y sencilla la dinámica de sólidos y contornos interactuando con el fluido. En particular y en relación con el objeto del presente proyecto, resulta particularmente adecuado para simular los complicados flujos que se producen en el campo cercano entre fluidos de diferente densidad y salinidad.

En segundo lugar, el planteamiento del método es de tipo lagrangiano, siguiendo el flujo, en vez del más habitual euleriano en el que se computan las propiedades del fluido en puntos fijos del espacio que generalmente son los nodos de una malla. En este método lagrangiano el fluido se discretiza en forma de partículas que se mueven simulando el movimiento del fluido, transportando con ellas sus propiedades. Una característica de la aproximación lagrangiana de especial utilidad

es la eliminación de los problemas de difusión numérica que se producen en mayor o menor medida en las técnicas eulerianas.

Conviene señalar que existe una diferencia importante entre el método SPH y los denominados modelos lagrangianos para el estudio de la difusión. En estos lo que se discretiza es el trazador que se difunde, pero el cálculo del campo de velocidades del fluido se hace por un método convencional basado en mallas. Como consecuencia, con estos modelos se puede evitar el problema de la difusión numérica del trazador, pero no la difusión numérica de la cantidad de movimiento, lo que significa que el campo de velocidades obtenido corresponde a un fluido más viscoso que el real. Esto no ocurre con el método SPH porque el campo de velocidades se obtiene también a partir de las partículas discretas.

2.3.4 SOFTWARE ARCGIS

ArcGIS es un programa de computadora muy completo que nos facilita la recopilación, el analizar y compartir información geográfica y es uno de los principales productos utilizados por personas en el mundo, este programa interactúa de manera eficiente con HEC-RAS. Como ArcGIS es la plataforma líder en el mundo en sistemas de información geográfica (SIG) que está al servicio de sectores gubernamentales, empresas, ciencia, tecnología y la educación. ArcGIS permite planificar, resolver problemas, anticipar cambios para la toma de mejores decisiones.

2.3.5 SOFTWARE HEC-RAS

El software HEC-RAS, es un software de fácil acceso al público que sirve para la modelización hidráulica y es desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), es una versión ampliamente mejorado y utilizado HEC-2, con muchas mejoras que permite la simulación de diversos caudales obteniendo un gran número de resultados de las cuales destaca la interfase gráfica de usuario que facilita las labores de pre proceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambiar de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante la extensión HEC-GeoRAS. El modelo numérico de este programa nos permite hacer análisis del flujo permanente gradualmente variado en lámina libre.

[18]

- Características técnicas:
 - ✓ Cálculo hidráulico de estructuras como puentes, aliviaderos, etc.
 - ✓ Visualización gráfica de datos y resultados.
 - ✓ Edición gráfica de sección.
 - ✓ Fácil de ejecutar en Microsoft Windows.

- Aplicaciones:

Una de las esenciales aplicaciones de la herramienta HEC-RAS en la realización de modelos hidráulicos en cauces que ayuda a determinar la influencia en el régimen de flujos, es decir, teniendo conocimiento del comportamiento del flujo en un cauce, deseamos conocer los acontecimientos posibles tras la construcción de una infraestructura o luego de la restauración forestal del lecho del cauce.

Otras aplicaciones están relacionadas directamente a la organización del territorio, definiendo que áreas muestran riesgos probables de inundación en una determinada zona, el cual facilitara en la toma de decisiones que conlleva a cabo una ordenación territorial. Incluso para estudiar el impacto que sufre el suelo en una cuenca debido a su uso, debido a que puede generar infiltración en el suelo (extensible a la cuenca) y el origen de un incremento de caudal (protagonista de la inundación). [18]

Con el software HEC- RAS y conociendo las características geométricas del cauce a evaluar y el caudal que se obtiene en HEC HMS, lograríamos obtener el incremento de la lámina de agua y la altura de la misma en el cauce. Asimismo, con la extensión de HEC-RAS para ARCGIS (GeoRAS), se puede obtener mapas de detalle de la extensión de la inundación y de la distribución de las velocidades de flujo.

2.3.5.1 Metodología del cálculo del flujo gradualmente variado.

El manual del HEC-RAS menciona que para poder realizar una modelación de un flujo gradualmente variado en régimen permanente y unidimensional se deben utilizar los siguientes métodos y criterios mencionados en el ítem (2.3.5.2).

2.3.5.2 Ecuaciones empleadas en el cálculo de perfiles hidráulicos.

▪ Ecuación de la energía

Los cálculos de perfiles hidráulicos están basados en el equilibrio de la ecuación de la energía, luego de calcular la superficie libre del agua de una sección a otra, se emplea iteración o un paso llamado estándar.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde:

Z_1 y Z_2 : Puntos de presión de energía.

Y_1 y Y_2 : Carga de presión de energía

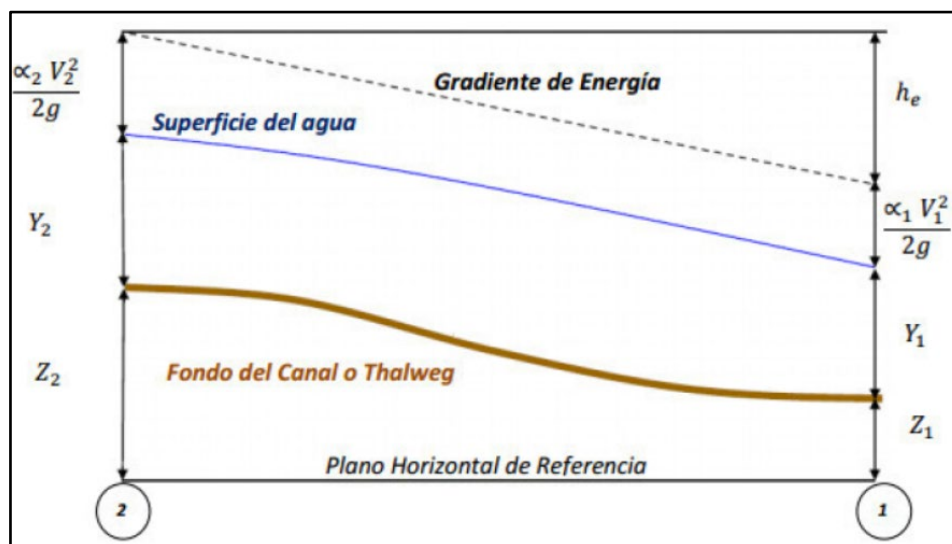
V_1 y V_2 : Velocidad media en las secciones.

α_1 y α_2 : Coeficiente de Coriolis.

g : Aceleración gravitacional.

h_e : Pérdida de energía.

Imagen 11: Representación de los términos de la ecuación de la energía



Fuente: Manual del usuario del programa HEC-RAS.

La pérdida de carga (h_e), que sucede en los puntos 1 y 2, es el resultado de las pérdidas que ocurre por la fricción y debido al fenómeno de contracción o expansión del flujo; la fórmula usada para desarrollar la pérdida de carga o energía es:

$$h_e = LS_f + C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right)$$

Donde:

L = Longitud ponderada.

S_f = Pendiente de fricción.

C = Coeficiente de pérdidas.

La longitud (L), es analizada con la siguiente formula:

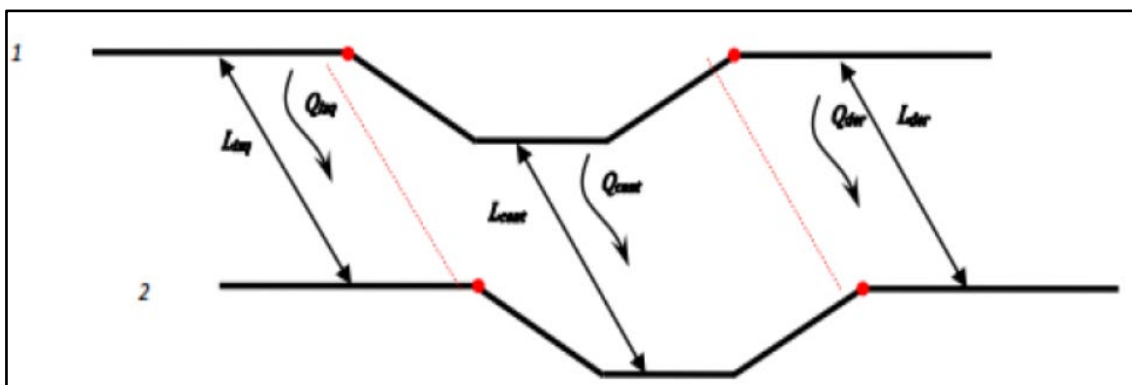
$$L = \frac{L_{izq} Q_{izq} + L_{cent} Q_{cent} + L_{der} Q_{der}}{Q_{izq} + Q_{cent} + Q_{der}}$$

Donde:

L_{izq}, L_{cent}, L_{der} = longitud de separación entre las secciones 1 y 2.

Q_{izq}, Q_{cent}, Q_{der} = Es la sumatoria aritmética de los caudales que escurren entre las secciones 1 y 2.

Imagen 12: Consideraciones de distribución del flujo entre dos secciones



Fuente: Manual del usuario del programa HEC-RAS.

▪ Subdivisión de la sección transversal para el cálculo del caudal

Para definir el caudal y la velocidad promedio que pasa por una sección transversal, el software HEC-RAS, por defecto, divide la sección en segmentos o franjas, en relación del número de coeficientes de Manning (n) que está establecido a lo largo de ésta sección; para cada una de las franjas se calcula el factor de conducción. El caudal total que recorre por la sección transversal es la sumatoria de los caudales en todos los márgenes.

$$Q = K_{izq} S_f^{1/2} + K_{cent} S_f^{1/2} + K_{der} S_f^{1/2}$$

$$K_i = \frac{1}{n_i} A_i R_i^{2/3}$$

Donde:

K_i = Factor de conducción.

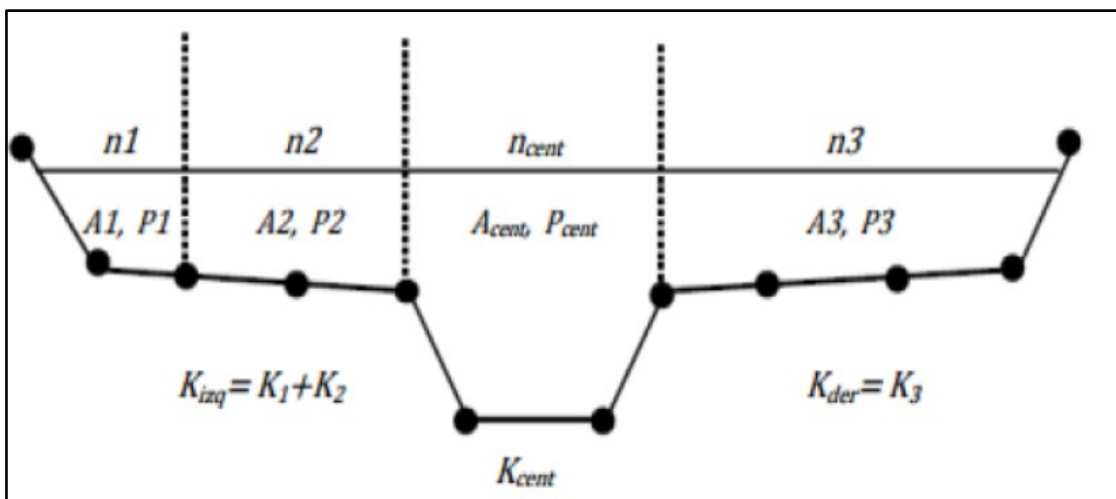
A_i = Área hidráulica.

R_i = Radio hidráulico.

S_f = Pendiente de la línea de energía.

Es adecuado en este punto precisar que el software tiene la capacidad de considerar las zonas posibles de inundación, caso contrario de que el tirante máximo del agua sobrepase los límites característicos por el canal principal, y es por eso que en las expresiones mencionadas anteriormente se realizan los cálculos de longitud y los gastos asociadas a dichas planicies.

Imagen 13: División en franjas de la sección transversal



Fuente: Manual del usuario del programa HEC-RAS.

▪ Evaluación de n en HEC-RAS

Para establecer el factor de conducción del cauce del tramo principal (K_{cent}), se toman en cuenta los siguientes criterios; uno de los criterios lo divide en secciones, así como sucede en las planicies de inundación; no obstante, si en la sección del cauce principal se dan variaciones mayores a 5H:1V, y están definidas diversos valores de la rugosidad de Manning, el software realiza cálculos de coeficientes de rugosidad semejante a la ecuación que se muestra.

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3}$$

Donde:

N_c = Rugosidad.

P = Perímetro mojado.

P_i = Perímetro mojado de la subdivisión.

n = Rugosidad de Manning.

▪ Cálculo de la energía cinética

El coeficiente de Coriolis (α), se analiza con la ecuación siguiente:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{izq}^3}{A_{izq}^3} + \frac{K_{cent}^3}{A_{cent}^3} + \frac{K_{der}^3}{A_{der}^3} \right]}{K_t^3}$$

Donde:

A_t : Área total.

K_t : Factor de conducción.

A_{izq} , A_{cent} , A_{der} : Área hidráulica del lado izquierda, centro del cauce, lado derecho, respectivamente.

K_{izq} , K_{cent} , K_{der} : Factor de conducción del lado izquierdo, centro del cauce, lado derecho.

▪ Evaluación de la pérdida por fricción

La fórmula utilizada por el programa por defecto para realizar el cálculo de la pendiente de fricción (S_f) que existe entre dos secciones transversales es:

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

▪ **Perdidas por expansiones y contracciones**

Para analizar las pérdidas generadas por contracción y la expansión del fluido, la contracción se da cuando la velocidad en el punto aguas abajo es superior a la fuerza de velocidad en el punto más alto aguas arriba, del mismo modo si la fuerza de velocidad en la sección transversal aguas arriba es superior que la carga de velocidad en la sección aguas abajo, el software toma por consideración que ocurre una expansión y por este motivo el coeficiente “C” tanto para el caso de contracción como la de expansión, es dado por el profesional, el HEC-RAS considera los valores de 0.1 para contracción y 0.3 para expansión).

$$h_{ce} = C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right)$$

Donde:

C = Coeficiente de contracción o expansión.

▪ **Método de cálculo del programa HEC-RAS**

El proceso que utiliza el software HEC-RAS para conseguir los perfiles hidráulicos es el siguiente:

Presumiendo régimen del flujo subcritico

1. Conjetura un valor de la superficie del flujo, en un perfil aguas arriba.
2. Dependiendo del nivel del agua se calcula el caudal y la carga o fuerza de velocidad.
3. Se calcula la pendiente de fricción (S_f).
4. Contando con los datos numéricos de la fuerza de velocidad (paso 2) y la perdida de carga o energía (paso 3).
5. Se hace una comparación de los valores del agua en su parte superficial tomado en el primer punto y el que se obtiene al desarrollar la ecuación en el (paso 4); el proceso de iteración se da únicamente si la diferencia entre estos valores es mayor que la tolerancia de 0.003 m.

El proceso que se sigue para establecer el valor superficial del agua en el ítem 1 es el siguiente: se comienza asumiendo que el la altura o nivel del agua en la sección aguas arriba es igual a la proyectada por la superficie de agua de la sección aguas abajo, si la diferencia es mayor que la tolerancia, el nuevo valor en el punto 1 es igual al del proceso anterior más el 70% del error del primer cálculo, si aun así, la diferencia obtenido es mayor a la tolerancia, el método numérico utilizado para obtener el valor de la superficie del agua es la secante (Burden, 2002).

2.3.5.3 Cálculo del tirante crítico.

El calcula el tirante se realiza únicamente en las circunstancias que se mencionan:

- Cuando se especifica que el régimen de flujo es supercrítico.
- Cuando se pide que el programa lo analice en alguna sección.
- Cuando se establece condiciones de frontera.
- Cuando se ha implantado un régimen del flujo subcritico y el número de Froude, señala que el régimen del flujo es supercrítico.
- En el caso que el software no logre equilibrar la ecuación de energía.

El tirante crítico se calcula con la siguiente expresión:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T}$$

El tirante crítico se despeja con la siguiente expresión:

$$E_{min} = y_c + \frac{\alpha V_c^2}{2g}$$

Tenemos:

y_c = Tirante crítico.

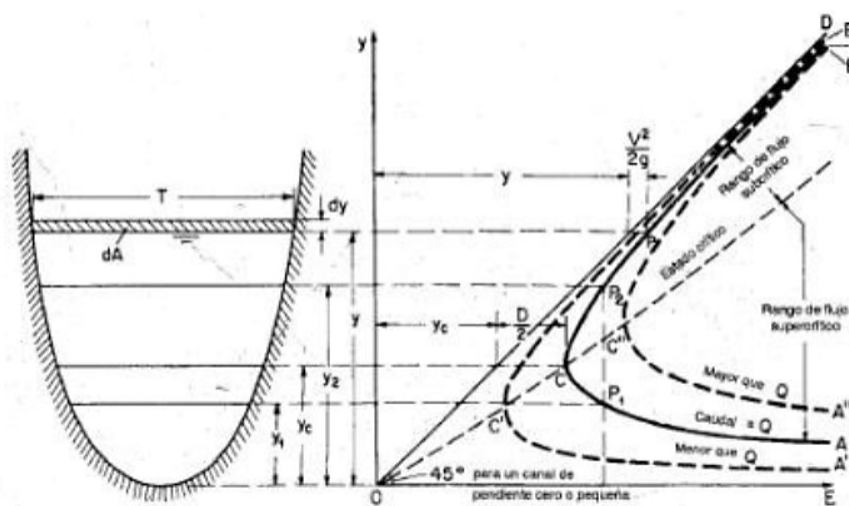
α = Coeficiente de Coriolis.

V_c = Velocidad critica.

g = Aceleración de la gravedad.

HEC-RAS utiliza dos métodos numéricos para realizar el cálculo del tirante crítico, el primer método es el parabólico y el otro es conocido como el método de la secante. El primer método mencionado es usado para realizar el cálculo del tirante crítico, este método suele a ser rápido y práctico, sin embargo, si durante el cálculo no converge, inmediatamente el método numérico cambia al de secante.

Imagen 14: Curva de la energía específica



Fuente: Manual del usuario del programa HEC-RAS.

El método parabólico que se emplea, radica en hallar la energía (E) mínima partiendo de tres puntos del tirante del agua (y) con igual espaciamiento. El valor de la profundidad del agua (y) al que corresponde la energía específica menor (E), es el punto de donde se inicia para realizar otra iteración; el tirante crítico (y_c) es analizado hasta que la diferencia entre los dos últimos procesos, sea menor que 0.003m.

El método de la secante radica en la construcción de una tabla donde relaciona los valores de la profundidad del agua (y) con la energía específica (E); para ello la sección transversal es dividida en 30 secciones, el software ubica el valor del tirante con menor energía específica, y partiendo de ese tirante, toma como nuevo intervalo a las profundidades inmediatas superior e inferior, para dividir nuevamente en 30 intervalos, hasta que el tirante crítico (y_c) sea establecido con una mejor precisión.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Tipo y nivel de investigación

La tesis en mención: “ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DEL RIO LA LECHE APLICANDO LOS SOFTWARES ARCGIS y HEC-RAS A SU PASO POR EL DISTRITO DE PACORA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE - 2019”, realizará los tipos de investigación que se mencionan a continuación:

Es DESCRIPTIVA ya que su finalidad es comprender y detallar las circunstancias actuales, características que más resalten y peculiaridades haciendo uso de la toma de datos y la recolección de información.

Es CUANTITATIVA porque se utilizará valores numéricos y estadísticos para lograr cuantificar las opiniones, comportamientos o cualquier otra variable que se haya establecido para ser objeto de estudio.

3.2 Diseño de investigación

La compleja diversidad de los hechos y fenómenos reales tanto social y natural han influenciado para diseñar, crear variadas estrategias, con el objetivo de analizar y dar solución a los problemas de investigación según su propia naturaleza y características. como ejemplo, tenemos: los diseños experimentales y los no experimentales, siendo los dos sumamente importantes y trascendentes en el plano científico. [19]

Diseño: No experimental transversal descriptivo

3.3 Población, muestra de estudio

Población

El presente proyecto cuenta con población ya que él proyecto de investigación se desarrollará dentro de un espacio. la población es la longitud del rio de 59.03 km, comprendido entre las coordenadas:

✓ Tramo de inicio:

- Latitud: 6°28'12.51" S
- Longitud: 79°48'30.62" O

✓ Tramo final:

- Latitud: 6°26'27.62" S
- Longitud: 79°54'17.07" O

Muestra

La muestra es un fragmento de 10 + 066.59 km que representa parte de la población de estudio y tiene la característica de ser fiel y objetiva, en base a eso se considera a la muestra como equivalente a la población.

3.4 Criterios de selección

Se seleccionó esta muestra de estudio considerando los diferentes puntos que han sido inundados durante el recorrido del río y teniendo en cuenta los últimos fenómenos del niño, y también los problemas observados durante las visitas al área de estudio. Por consiguiente, consideró a estudiar un tramo del río de 10.066 kilómetros que tiene varios puntos susceptibles a inundación.

3.5 Operacionalización de variables

- Variables

La modelación del río La Leche con el software ARCGIS y HEC-RAS, considerando diversos flujos para tiempos de retorno diferentes.

- DEPENDIENTES:

- Modelación Hidráulica
- Modelación Hidrológica

- INDEPENDIENTES:

- Topografía
- Hidrología
- Cartografía.
- Diseño.

- Operacionalización

Tabla 6: Operacionalización de las variables

Variable Independiente	Dimensión	Indicador	Instrumento	índice
Topografía	Estudios de Topografía	Perfil Longitudinal	Estación Total	m
		Secciones Transversales	Estación Total	m ²
Hidráulica	Software HEC-RAS	Caudal Máximo	SENAMHI	m ³ /s
		Precipitación	SENAMHI	mm
Hidrología	Estudio Hidrológico	Caudal Máximo	SENAMHI	m ³ /s
		Precipitación	SENAMHI	mm
		Tiempo de Retorno	SENAMHI	años
Cartografía	Software ArcGIS	Mapas Cartográficos	Instituto Geográfico Nacional	GLB
Diseño	Propuestas de alternativas de solución	Tipos de Alternativas de Solución	Libro Especializado	m

Fuente: Elaboración Propia

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- **Técnicas**

Levantamiento Topográfico

Se realizará el levantamiento para encontrar las curvas de nivel, el cual proporciona el relieve de la superficie mediante cotas con puntos altimétricos y planimétrico. También se realizará el perfil longitudinal para representar gráficamente el corte que reproduce el terreno.

- **Instrumentos**

Levantamiento Topográfico:

- ✓ Estacional total
- ✓ Brújula
- ✓ Primas para la estación total
- ✓ GPS
- ✓ Wincha
- ✓ Libreta de campo, comba, estacas, pinturas, etc.

Programas de cómputo:

- ✓ ArcGIS
- ✓ HEC-RAS
- ✓ Civil 3D.
- ✓ Office: Word, Excel, Power Point.

3.7 Procedimientos

- Recopilación de información

La obtención de datos de información se realizó con la visita a la zona objeto de estudio y la recopilación de información de las precipitaciones últimas que afectó al distrito de Pacora de las diferentes instituciones encargadas como el ANA, Defensa Civil de Pacora, SHENAMI y la Municipalidad distrital de Pacora.

- Levantamiento topográfico

Se procedió a realizar el levantamiento con la medición de distancias, ángulos horizontales, ángulos verticales. Se miden distancias inclinadas y ángulos de inclinación entre la Estación establecida y los puntos donde va a ser posesionados, así mismo también se miden las coordenadas UTM de cada punto, haciendo uso de una Estación Total Topcom ES-105. seguidamente se apuntan las lecturas de información meteorológica tanto temperatura y presión las que se utilizarán con el objetivo de efectuar correcciones por refracción, estos pasos se repiten en cada punto de estación para que posteriormente calcular las líneas acimutales requeridas.

- Análisis de solución

Teniendo la información necesaria del lugar de estudio, se procede a la delimitación de la cuenca, subcuencas, red hídrica y posteriormente la caracterización de la cuenca, con la ayuda del Software ArcGIS. Luego realizó el análisis de precipitación, la cual se inició de los datos obtenidos pluviométricos y se procedió con las indicaciones que nos da el MTC, (2008) para un mejor análisis, seguidamente se realizó el cálculo para obtener el gráfico curvas IDF y hietogramas. Finalizando con el uso de los softwares HEC-RAS Y Hidroesta, para el modelamiento hidrológico.

De los resultados obtenidos en los estudios realizados para una presentación final. se obtiene un mapa de inundación a partir de eso poder realizar la propuesta de prevención, y con ella se determinará a llegar a una conclusión y recomendación.

3.8 Plan de procesamiento y análisis de datos

PRIMERO: La obtención de la información

- Visita a la zona (río) donde va a realizar el estudio.
- Visita a la zona urbanizada y no urbanizada del distrito de Pacora.
- Recolección de información bibliográfica.
- Recolección de información hidrológicos y meteorológicos.
- Interpretación de los datos de precipitación.

SEGUNDO: Trabajos de campo y laboratorio

- Levantamiento topográfico.
- Perfil Longitudinal.
- Sección Transversal.
- Análisis e interpretación de resultados.
- Planos topográficos.

TERCERO: Análisis de solución

- Información geográfica.
- Modelamiento de la cuenca mediante uso de ArcGIS.
- Estudio hidrológico.
- Datos de caracterización hidráulica del río a estudiar.
- Definición geométrica del ámbito de estudio.
- Modelación Hidráulica mediante HEC-RAS.
- Calibración del modelo hidráulico.
- Análisis del comportamiento del modelo hidráulico.
- Ajustar los resultados a las características concretas del tramo a estudiar.
- Comparar cotas e identificar zonas inundables.
- Exportar resultados de HEC-RAS hasta ArcGIS.
- Propuestas de alternativas de solución.

CUARTO: Análisis de resultados

- Resultados de la evaluación.

- Discusión de los datos obtenidos.
- Conclusiones y Recomendaciones.
- Elaboración del Mapa de inundación.

QUINTO: Presentación y sustentación final de tesis

3.9 Matriz de consistencia

Tabla 7: Matriz de consistencia

TÍTULO	PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DEL RIO LA LECHE APLICANDO LOS SOFTWARES ARCGIS Y HEC-RAS A SU PASO POR EL DISTRITO DE PACORA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE-2019	¿Cuál es el comportamiento hidrológico e hidráulico del río La Leche a su paso por el distrito de Pacora, aplicando los softwares ARCGIS y HEC-RAS?	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Realizar un análisis hidrológico e hidráulico para determinar el comportamiento del perfil del río La Leche en un tramo de 10 km aprox. a su paso por el distrito de Pacora con diferentes periodos de retorno para analizar las llanuras de inundaciones usando los softwares ArcGIS y HEC-RAS.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Realizar el levantamiento topográfico para determinar la geometría del tramo en estudio y elaborar los planos de topografía. - Calcular y analizar los perfiles hidráulicos para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años del río La Leche a su paso por el distrito de Pacora. - Simular hidráulicamente el tramo de río La Leche en estudio aplicando el software ARCGIS y HEC-RAS. - Identificar las zonas con riesgo a inundación para máximas avenidas probables del río La Leche a su paso por el distrito de Pacora en un tramo de aprox. 10 km. - Elaborar mapas de inundación del distrito de Pacora, provincia y departamento de Lambayeque. 	<p>El modelamiento hidráulico e hidrológico del río La Leche con los softwares ARCGIS y HEC-RAS nos permitirá conocer sus características hidráulicas el cual ayudará prevenir, disminuir el riesgo de daños y pérdidas económicas en áreas inundables en el distrito de Pacora.</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Topografía Hidrología Cartografía Diseño</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> *Perfil Longitudinal *Secciones Transversales *Caudal máximo *Precipitación *Mapas cartograficos *Alternativas de solución <p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> *Modelacion hidrológica *Modelación Hidraulica 	<p>Tipo de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiene por finalidad comprender y detallar las condiciones actuales, características que mas resalten.: Es una investigación Descriptiva • De acuerdo a los datos analizados: Es una investigación cuantitativa <p>Diseño de la Investigación</p> <p>Esta investigación tendrá un diseño investigativo, en la demostración de la hipótesis</p>	<p>El proyecto en mencion cuenta con poblacion y muestra de estudio, presenta un area de estudio para el proyecto comprendido entre las provincias de Lambayeque y Cajamarca.</p>

Fuente: Elaboración Propia

3.10 Consideraciones éticas

Este proyecto de investigación ha tomado en cuenta los más importantes principios de la ética como la transparencia, objetividad, honestidad y beneficencia proporcionando nuevos resultados al conocimiento que se tiene del tema de estudio, así como las medidas de prevención que son de utilidad en caso de inundaciones. En primer lugar, se solicitó el permiso respectivo a la Municipalidad Distrital de Pacora para realizar los diversos estudios necesarios para el desarrollo del proyecto siendo esto los estudios topográficos, hidrológicos e hidráulicos, siempre dando a conocer el propósito y cuáles serán los beneficios que se espera del proyecto de investigación. Luego de obtener la autorización se procede a la obtención de la información brindada tanto por la Municipalidad distrital de Pacora y de las siguientes instituciones ANA, Defensa Civil del distrito de Pacora, SENAMHI. Para obtener resultados más precisos de la superficie de río La Leche se realizará el estudio topográfico, así como la elaboración de planos topográficos del río en mención y su delimitación de cuencas y subcuencas y de esta manera determinar a través de la modelación hidrológica aplicando el software ARCGIS y HEC-RAS, las zonas con riesgo a inundación para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años del río La Leche.

IV. RESULTADOS

4.1 Descripción general del área de estudio

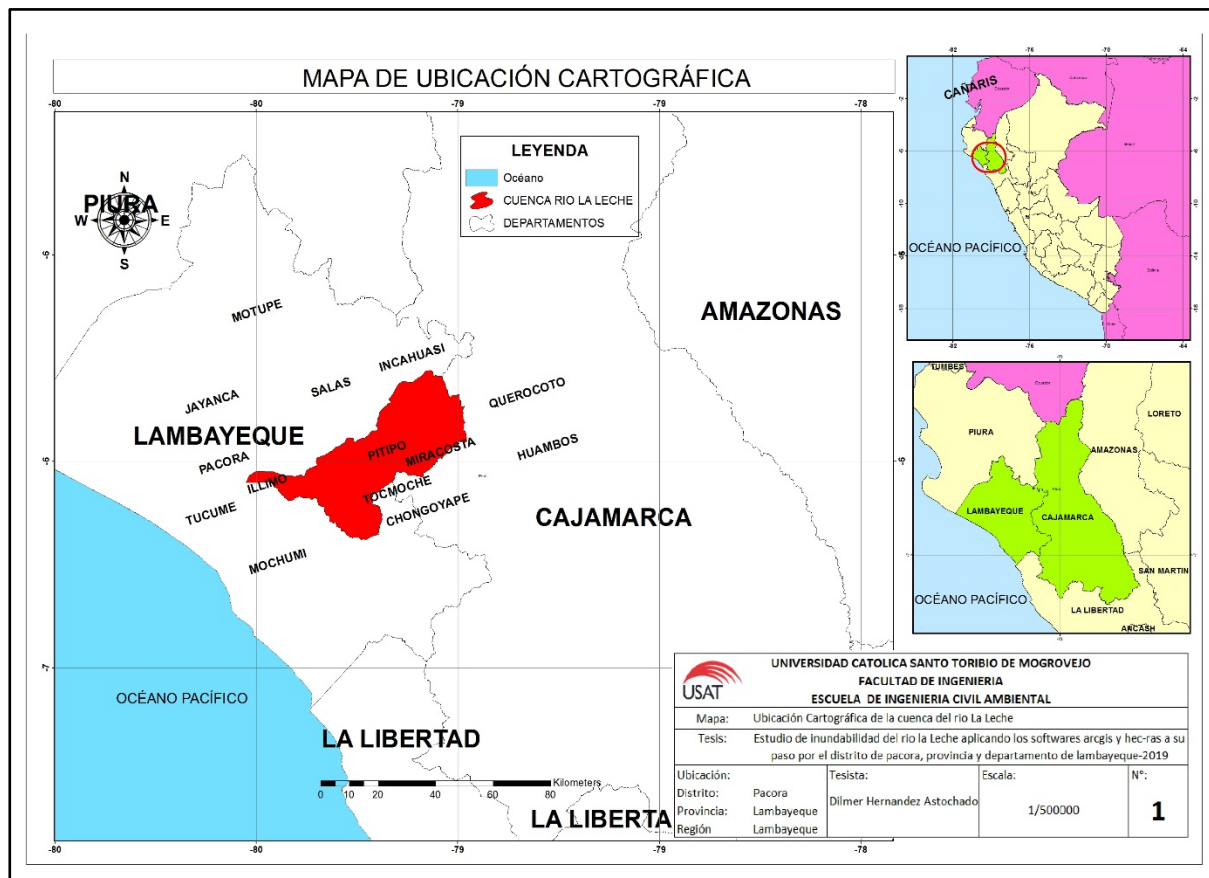
4.1.1 Ubicación política de la zona de estudio

El río La Leche perteneciente a la Hoya Hidrográfica del Pacífico, se ubica en la Costa peruana, a la cual cruza de Este a Oeste. Nace en la región andina de Cajamarca a partir de la unión de los ríos Moyan y Sàngano, tiene un recorrido de aproximado 50 km y sus aguas transcurren de Noreste a Sureste. La cuenca superior del río La Leche cuenta con 1600 km² con poca presencia de nevados, lagunas y cubetas de origen glacial, siendo esta una manera natural de almacenar el agua para entregarlo en estiaje.

Políticamente se encuentra en los departamentos de Lambayeque y Cajamarca. Es una subcuenca del Río Motupe. Ubicado en casi toda la extensión de Lambayeque. La cuenca está comprendida entre las siguientes coordenadas:

- Latitud Sur: 6° 26' – 6° 41'
- Longitud Oeste: 79° 50' – 79° 13'

Mapa 1: Ubicación cartográfica de la cuenca del río La Leche



Fuente: Elaboración propia

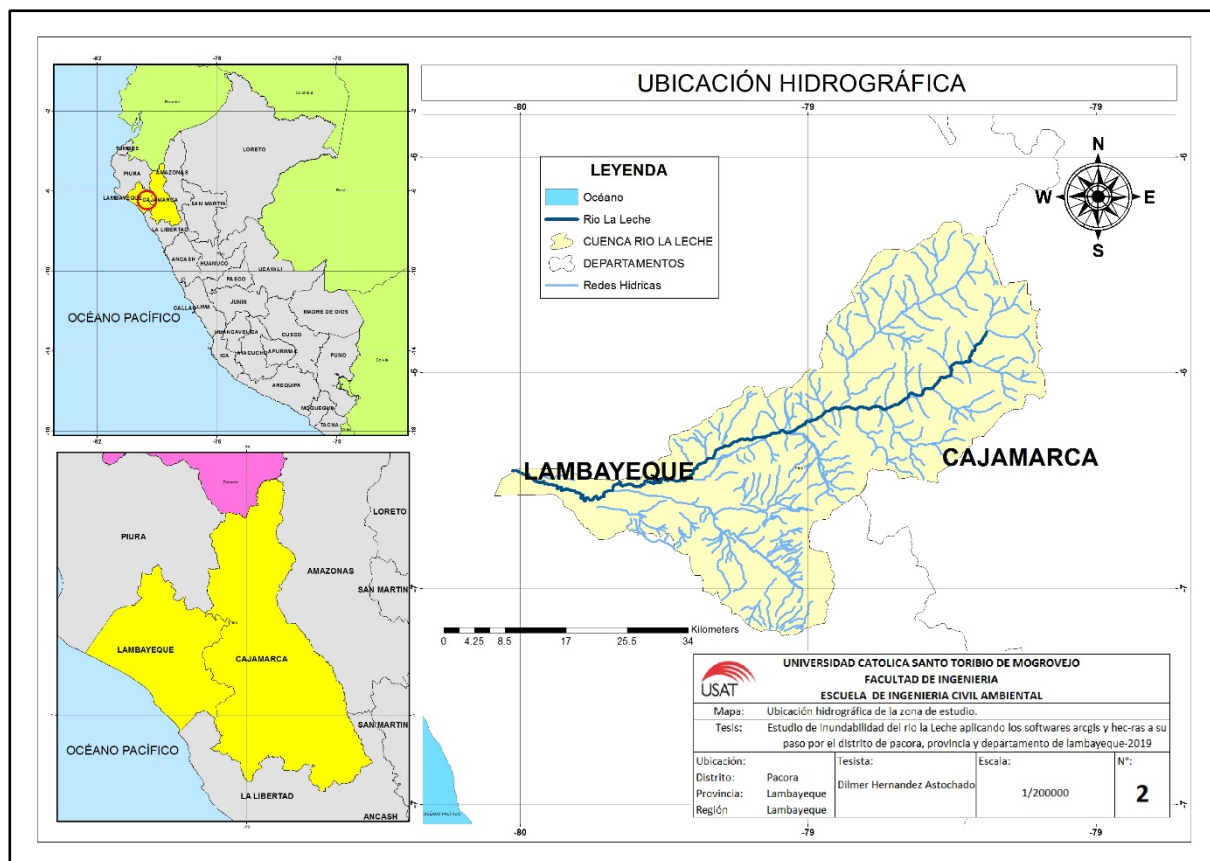
4.1.2 Ubicación hidrográfica de la zona de estudio

La cuenca del río La Leche pertenece hidrográficamente a la vertiente del Pacífico, nace en la laguna Quimsicocha, (6°14'30"S, 79°13'52"O), ubicada en el extremo alto de la cabecera de cuenca del río La Leche, a una altitud de 5000 m.s.n.m. aproximada en la provincia de Chota, en la región de Cajamarca. Ésta discurre sus aguas a la laguna Quimsicocha (10° 07' 42"S, 77° 16' 59"O).

A partir de la laguna Quimsicocha, el río se le conoce con el nombre de La Leche y recorre toda la cuenca en dirección de Este a Oeste, siguiendo un curso noreste-sudoeste hasta su desembocar en el Océano Pacífico, al norte de la ciudad de Lambayeque.

La cuenca hidrográfica del río La Leche, se encuentra en la zona norte del Perú, vertiente del Pacífico, abarca el departamento de Lambayeque, de forma total o parcial las provincias de Ferreñafe, Chota, Chiclayo y Lambayeque.

Mapa 2: Ubicación hidrográfica de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Vías de acceso

El área de la cuenca es accesible por la vía Panamericana hasta el Puente “la leche” Distrito de Pacora, desde donde existe la presencia caminos de penetración hacia el interior. Se puede hacer uso de cualquiera de las dos vías que conectan con la capital provincial, desde la ciudad de Chiclayo que es de 40 km aproximado. El viaje en combi u camioneta dura aproximadamente 45 minutos. Gran parte de la cuenca está unida por trochas carrozables o carreteras afirmadas y otras en plena construcción. Para los lugares en los cuales no llegan vehículos, existen caminos de herradura.

4.1.4 Límites

Los límites de la cuenca del río La Leche son:

- Norte: cuenca del río Salas – Motupe
- Oeste: con el Océano Pacífico.
- Sur: cuenca del río Chancay – Lambayeque.
- Este: con la cuenca del río Chotano.

4.1.5 Clima

El distrito de Pacora tiene un clima desértico. Habitualmente No hay ninguna lluvia durante todo el año en Pacora. El mes del año con mayor sensación térmica es febrero con un promedio de 26.2 °C. Las temperaturas menos calurosas del año se dan en el mes de agosto, estando alrededor de 20.2 ° C.

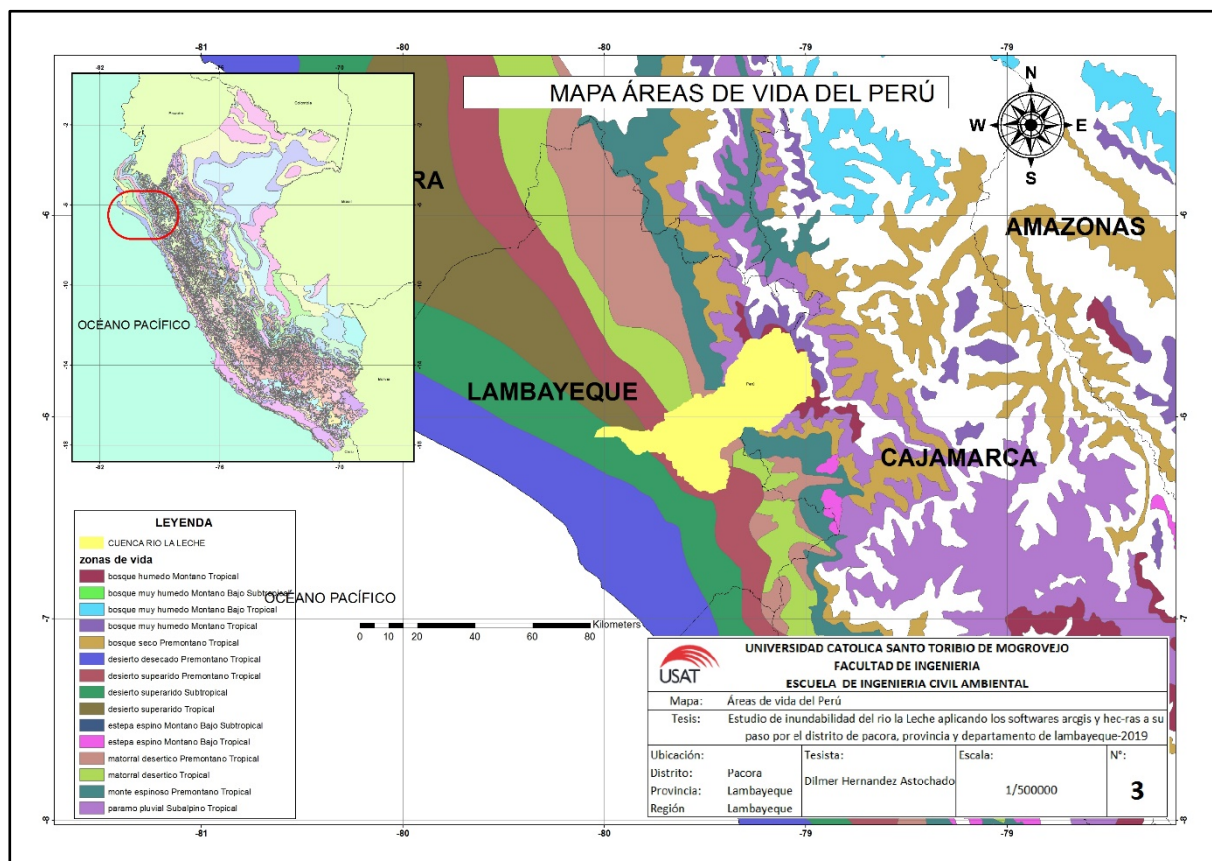
4.1.6 Ecología

En el año 2009 el MINAGRI tomo como base para describir de forma ecológica el mapa de áreas de vida del Perú, menciona que el valle La Leche presenta las formaciones de desierto sub tropical, maleza desértica y bosque espinoso sub tropical, sobresaliendo la formación de zonas desérticas sub tropicales.

La zona desértica sub tropical es la formación característica de la Costa Peruana desde la frontera con el Ecuador hasta llegar a la frontera con Chile y va desde el océano Pacífico hacia el Este en una longitud que cambia de acuerdo a la latitud y la elevación del terreno. Luego de las precipitaciones fuertes de los años 1983 y 1998 la vegetación se incrementó considerablemente en la zona de estudio, caracterizada generalmente por pastizales, hierbas, zonas montañosas y por áreas cubiertas de algarrobo. Existen áreas que son utilizadas para cultivar maíz, sandías, plátano, mangos, caña de azúcar, papayo, lechuga, frijoles, cebolla, lenteja, hortalizas, algodón, etc.

En relación a la fauna se observó una presencia significativa de roedores y reptiles pequeños como lagartijas, iguanas, tortugas motelo, etc. En relación a las aves habitan los gallinazos de cabeza negra, huerequeques, pava aliblanca, etc. Existen gran variedad de insectos y arácnidos.

Mapa 3: Áreas de vida del Perú



Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Vegetación

Existe una amplitud de gran consideración del área con vegetación que nos ocupa, corresponde a la formación de desierto sub tropical. En la formación denominada Maleza desértica sub tropical, se encuentran asociaciones de *Cereus*, *Melocactus* y *Opuntia*; también al borde del río observamos la presencia de caña brava, en los bosques espinosos sub tropical la vegetación natural se caracteriza por tener vegetación o monte a campo abierto, con especies vegetales temporales; encontramos grupos de algarrobos, palo santo, guayacan.

4.1.8 Drenaje

El movimiento de la excesiva agua en la zona es de vital importancia a fin de prevenir el hacinamiento de sales y la pérdida de aire de los suelos. Las zonas que se encuentran ubicadas en las partes medias y altas de la cuenca, debido su topografía tienen un mayor aprovechamiento su drenaje natural, pero es importante proteger las llanuras contra los procesos de salinización. Las llanuras, debido a su posición y su cercanía al mar, así como por un limitado drenaje natural,

presentan deficientes condiciones de drenaje. Las llanuras presentan drenaje superficial que se realiza por los cursos naturales de agua, constituyéndose el cauce del río “La Leche” en el principal dren natural. En años extraordinarios del fenómeno “El Niño”, las lluvias andinas sumadas a las lluvias torrenciales en el lugar, originan constantes desbordamientos de los cauces y generando inundaciones en la región siendo consideradas zonas críticas las correspondientes a los cursos inferiores del río La Leche.

4.2 Estudio Topográfico

Hace mención al estudio básico e indispensable sobre el cual se apoya el planteamiento de todas las obras civiles. Con los trabajos topográficos se quiere brindar información verídica y precisa el cual permita planear con seguridad estructuras basadas en cálculos confiables. Se ejecutaron trabajos de campo y gabinete orientados a reproducir con la suficiente precisión las características topográficas del río “La Leche” en todo el tramo de estudio.

a. Reconocimiento de campo

Estas actividades consistieron en efectuar visitas a la zona objeto de estudio y a otros puntos considerados de mucho interés. Las actividades de reconocimiento en definitiva consistieron en la visita a la zona de trabajo, con la finalidad de evaluar las actividades a realizarse, revisando la información con la que se dispone y estableciendo puntos de referencia y control topográfico, identificación de caminos de acceso, etc. Se tuvo importante cuidado al realizar el relleno topográfico de todos los elementos planimétrico (ancho de vías, caminos vecinales, postes de luz, viviendas, etc.), ya que estaban dentro de la zona del proyecto.

b. Levantamiento planimétrico – altimétrico

Se procedió a ubicar y colocar el punto de inicio, considerando todos los criterios técnicos necesarios, se procedió a efectuar el trazo del tramo del canal haciendo una longitud de 10+066 km. Luego se realizó el levantamiento del perfil longitudinal del objeto de estudio siguiendo todo el recorrido del río haciendo uso de un equipo (estación total). El levantamiento de las secciones transversales perpendiculares al eje del trazo, fue realizado cada 50m, considerando todo el ancho correspondiente. Para el dibujo se emplea el programa AutoCAD Civil 3D – 2018 a escalas indicadas.

c. Perfil longitudinal

Estos puntos se utilizaron para representar gráficamente y fueron colocados cada 20m en curvas y tramos rectos con una estaca en donde se establecieron las secciones transversales del río. Ver anexo 8.3.

d. Secciones transversales

Se ha efectuado secciones transversales perpendiculares al alineamiento definido por la poligonal del eje del río. Cada sección transversal tiene un punto de referencia debidamente nivelado en el eje, de donde se van encontrando cada una de las cotas de los puntos de la sección. Se han realizado secciones transversales cada 20 m. en todo el recorrido de la zona de estudio. Ver anexo 8.3.

4.3 Estudio hidrológico

4.3.1 Delimitación de la cuenca

Para realizar la delimitación de la cuenca se tomó como referencia el distrito de Pacora como punto de salida, de igual manera se usó la información espacial del DEM. Se utilizó el sistema de información geográfica ArcGIS como instrumento de apoyo para la delimitación de la cuenca del río La Leche. Con la finalidad de establecer los puntos vulnerables en toda la zona objeto de estudio.

4.3.2 Análisis geomorfológico de la cuenca

4.3.2.1 Elementos básicos

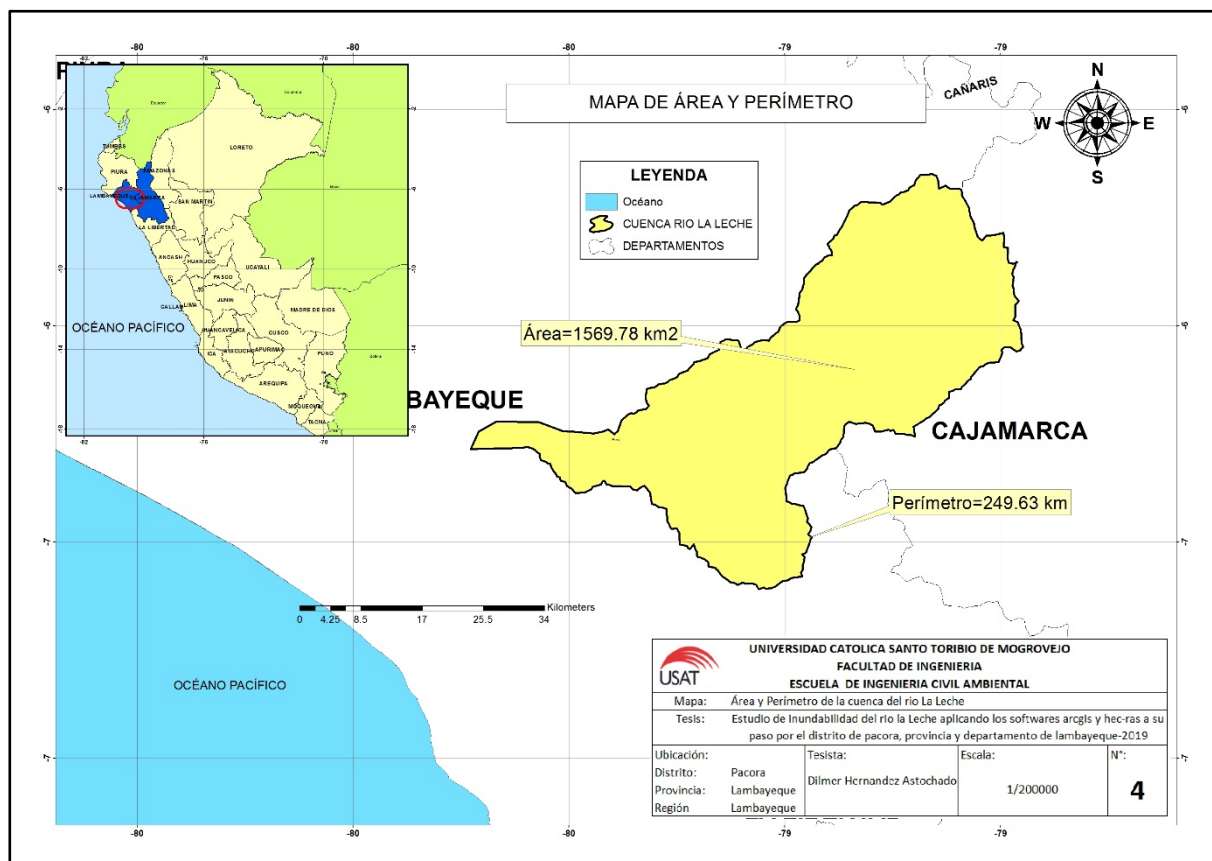
- Área

El área de la cuenca del río La Leche muestra el volumen total de agua que recibe la cuenca en tal sentido la cuenca tiene un área de 1569.78 km².

- Perímetro

Es una de las características importantes que relaciona el tiempo de concentración, es decir el tiempo que demora desde el nacimiento hasta llegar a la desembocadura del agua, la cuenca del río La Leche cuenta con un perímetro de 249.63 km.

Mapa 4: Área y Perímetro de la cuenca del río La Leche



Fuente: Elaboración propia

- Subcuencas o Microcuencas

La cuenca del río La Leche cuenta con nueve subcuencas definidas como: subcuenca río La Leche-Bajo, subcuenca río Sanjon, subcuenca río La Leche-Medio bajo, subcuenca río Cincate (Colan), subcuenca río La Leche-Intermedio, subcuenca río La Leche-Medio alto, subcuenca río Tomoche, subcuenca río La Leche-Alto, subcuenca río Mojón.

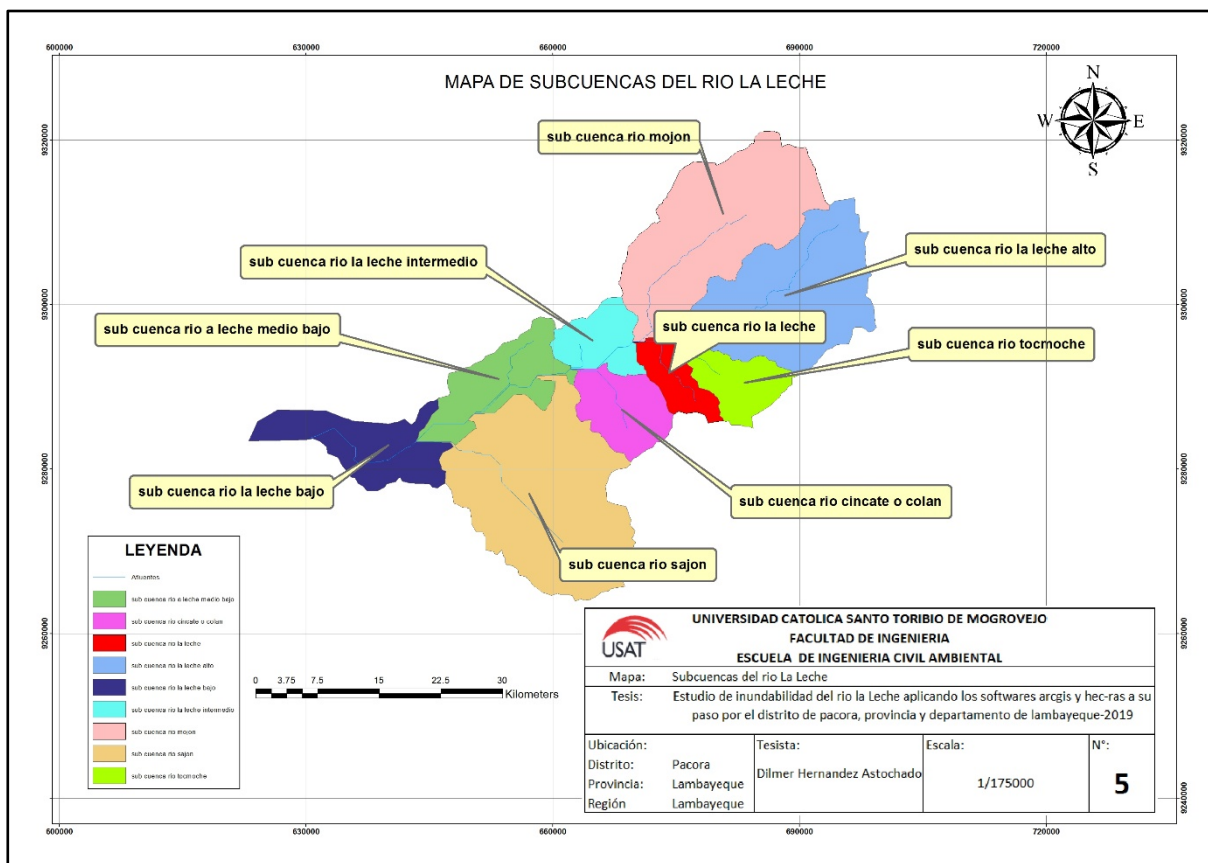
Las subcuencas pertenecientes al río La Leche se ubican dentro de las provincias de Lambayeque y Cajamarca, siendo el motivo de la variabilidad de sus climas desde el intenso sol a friajes y lluvias.

Tabla 8: Área de subcuencas

Subcuencas	Área (km ²)
Rio La Leche-Bajo	131.6703
Rio Sanjon	403.998
Rio La Leche-Medio bajo	120.6583
Rio Cincate (Colan)	92.2087
Rio La Leche-Intermedio	70.3691
Rio La Leche-Medio alto	62.4301
Rio Tocmoche	73.4902
Rio La Leche-Alto	293.7896
Rio Mojón	320.4087

Fuente: Elaboración propia

Mapa 5: Subcuencas del rio La Leche



Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 Forma de la cuenca

- Coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius (K)

Tabla 9: Coeficientes para la evaluación de la forma

Coeficiente	Descripción	Rango
K	Casi redonda a oval - Redonda	1 - 1.25
K	Oval - Redonda a oval - Alargada	1.25 - 1.5
K	Oval - Alargada a alargada	1.5 - 1.75
K	Rectangular (alargada)	>1.75

Fuente: Gaspari et al. (2012).

$$K = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

P= Perímetro de la cuenca en Km

A=Área de la cuenca en Km²

$$K = 0.28 * \frac{249.63}{\sqrt{1569.78}}$$

$$K = 1.764$$

Interpretación: Como el valor de K se encuentra entre el rango mayor a 1.75, la forma de la cuenca del río La Leche es Rectangular (alargada). Este resultado señala que la cuenca tiene tendencias a producir creciente de avenidas.

- Relación de elongación (R_e)

Es la relación que existe entre el área de un círculo con la misma área de la cuenca estudiada

$$R_e = 1.128 * \frac{\sqrt{A}}{L}$$

Donde:

L= Longitud de la cuenca Km

$A = \text{Área de la cuenca en Km}^2$

$$R_e = 1.128 * \frac{\sqrt{1569.78}}{70.169}$$

$$R_e = 0.64$$

Si varía entre 0.6 y 1 la cuenca presenta clima y geología variado, está relacionado a fuertes relieves.

- Factor de forma (F)

Tabla 10: Coeficientes para la evaluación de la forma

Factor de forma	Forma de la cuenca
F > 1	Redondeada
F < 1	Alargada

Fuente: Gaspari et al. (2012).

$$F = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

L= Longitud de la cuenca en km

A= Área de la cuenca en km²

$$F = \frac{1569.78}{70.169^2}$$

$$F = 0.32$$

Debido a que el factor de forma es bajo se puede deducir que estará menos propensa a crecientes que otras cuencas con similar tamaño pero mayor factor de forma

4.3.2.3 Relieve de la cuenca

- Curva hipsométrica

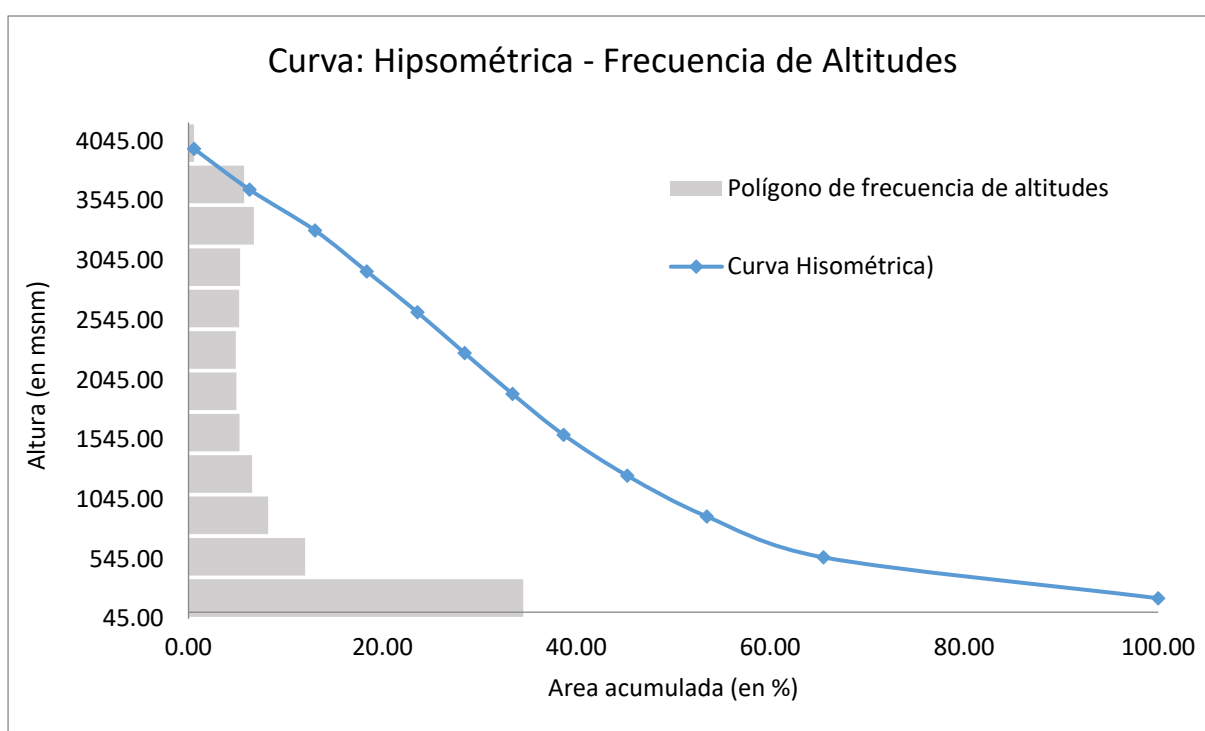
Para la realización de la curva hipsométrica se utilizarán los datos de la siguiente tabla, cuyos datos fueron conseguidos a partir del DEM, el cual es proporcionado por la NASA y posteriormente ejecutado por el software ArcGIS.

Tabla 11: Cotas promedio Vs Área acumulada

Nro	Altura o Cota(msnm)			Area (km2)			
	Mínimo	Máximo	Prom	Intervalo	Acumulado	% Acum	% Inter
1	45.94	387.93	216.94	541.83	1569.78	100.00	34.52
2	387.99	729.88	558.93	188.78	1027.95	65.48	12.03
3	730.05	1071.91	900.98	128.92	839.17	53.46	8.21
4	1071.99	1413.90	1242.95	103.04	710.25	45.25	6.56
5	1414.00	1755.93	1584.96	82.64	607.21	38.68	5.26
6	1755.99	2097.97	1926.98	77.54	524.57	33.42	4.94
7	2097.98	2439.95	2268.96	76.52	447.03	28.48	4.87
8	2439.98	2781.89	2610.93	82.10	370.51	23.60	5.23
9	2781.99	3123.96	2952.97	83.49	288.41	18.37	5.32
10	3123.99	3465.99	3294.99	105.96	204.92	13.05	6.75
11	3466.15	3807.75	3636.95	90.04	98.96	6.30	5.74
12	3808.11	4150	3979.06	8.92	8.92	0.57	0.57

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3: Curva Hipsométrica



Fuente: Elaboración propia

Interpretación: La curva hipsométrica mostrada en la gráfica 3 se realizó a partir de los datos de cota promedio vs Porcentaje acumulado de las áreas que comprenden las cotas de las curvas de nivel. Donde se puede apreciar la relación casi lineal del área con la altura mostrando una cuenca de forma alargada con respuesta hidrológica lenta.

- Rectángulo equivalente

Es la transformación de la cuenca en una superficie de forma rectangular de “L” y “l” lados convirtiendo en rectas paralelas todas las curvas de nivel.

$$L = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right] , \quad l = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right]$$

Donde:

L y l= Numero de lados

A= Área de la cuenca en km²

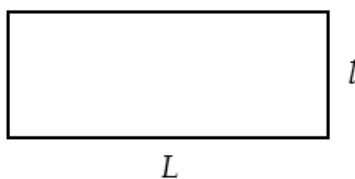
K= Índice de Gravelius

$$L = \frac{1.764 * \sqrt{1569.78}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.764} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{1.764 * \sqrt{1569.78}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.764} \right)^2} \right]$$

$$L = 110.6 Km$$

$$l = 14.20 Km$$



- Elevación media de la cuenca

Para el conocer el valor de la elevación media, se aplicó la siguiente ecuación:

$$H_{med} = \frac{\sum(H_i * A_i)}{A}$$

Tabla 12: Elevación media

Cotas promedio (Km)	Áreas (Km ²)	Cota x Área
216.9377915	541.83	117543.404
558.934067	188.78	105515.573
900.9832765	128.92	116154.764
1242.945557	103.04	128073.11
1584.961243	82.64	130981.197
1926.978028	77.54	149417.876
2268.962403	76.52	173621.003
2610.932618	82.1	214357.568
2952.973511	83.49	246543.758
3294.987915	105.96	349136.919
3636.95105	90.04	327471.072
3979.055908	8.92	35493.1787
Σ	1569.78	2094309.42

Fuente: Elaboración propia

$$H_{med} = \frac{2094309.42}{1569.78}$$

$$H_{med} = 1334.14 \text{ m. s. n. m}$$

- Pendiente media de la cuenca

El programa ArcGIS analiza la pendiente entre curvas de nivel, para lo cual utiliza el criterio de Alvord

$$S = \frac{\sum(D)}{\sum(w)}$$

Donde:

D= desnivel entre líneas medias (m)

w= ocurrencias en el ancho de franja analizada (m)

Tabla 13: Clasificación de pendientes medias

Pendiente (%)	Tipo de relieve
0 - 3	Plano
3 - 7	Suave
7 - 12	Mediano
12 - 35	Accidentado
35 - 50	Fuerte
50 - 75	muy fuerte
>75	Escarpado

Fuente: Ortiz Vera (2004)

Tabla 14: Rangos de pendiente -ArcGIS

Nro	Rango Pendiente (%)			Numero de ocurrencias (2)	(1)x(2)
	Inferior	Superior	Promedio (1)		
1	0	10	5	79186	395930
2	10	20	15	57079	856185
3	20	30	25	17404	435100
4	30	40	35	2759	96565
5	40	50	45	427	19215
6	50	60	55	75	4125
7	60	70	65	26	1690
8	70	80	75	8	600
9	80	90	85	5	425
10	90	100	95	9	855
TOTAL				156978	1810690

Fuente: Elaboración propia

$$S = \frac{1810690}{156978}$$

$$S = 11.53\%$$

Interpretación: La pendiente de la cuenca es de 11.53% presentando un tipo de relieve mediano según la tabla 14 de clasificaciones.

4.3.2.4 La red de drenaje

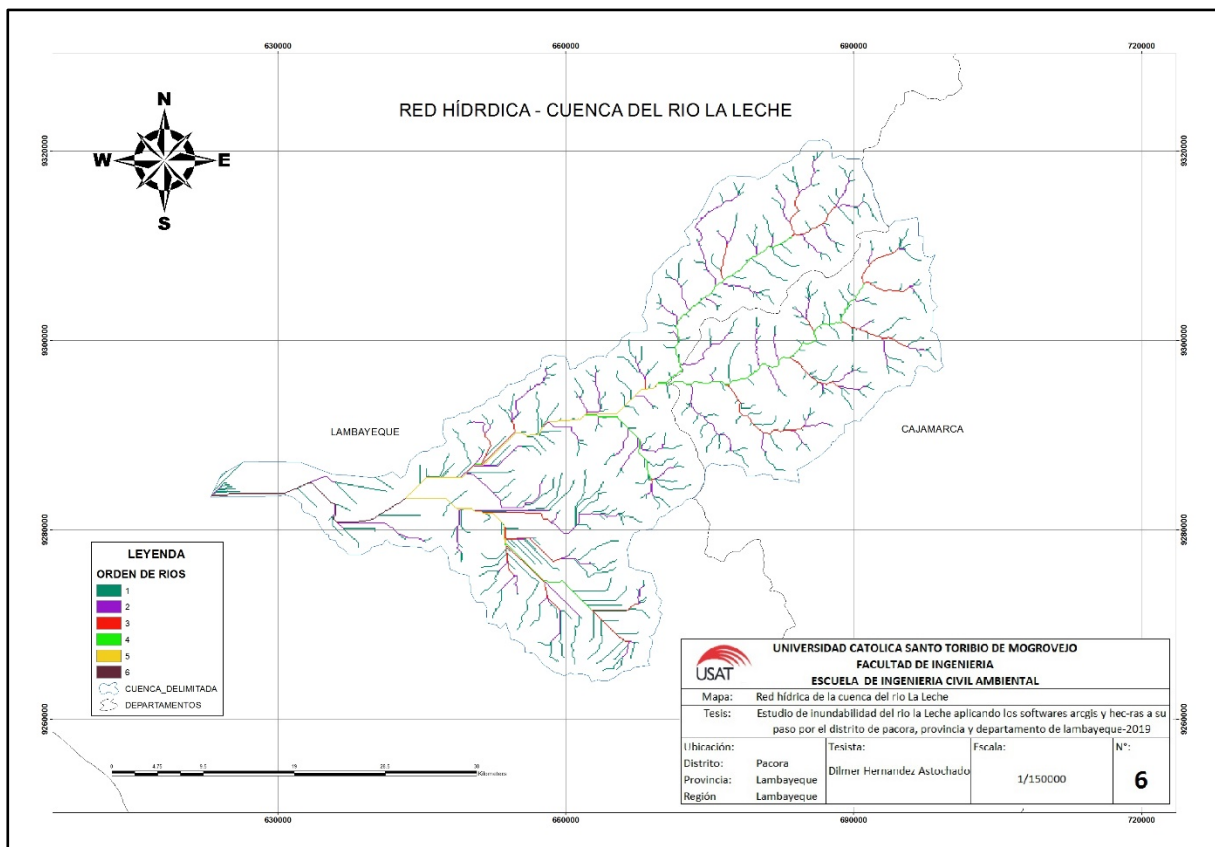
- Orden de corriente e identificación del cauce principal

Tabla 15: Orden y longitud de la red hídrica

Orden RH	Longitud (Km)
1	623.15891
2	252.11999
3	104.70090
4	78.46768
5	45.06380
6	24.32329
Total	1127.83

Fuente: Elaboración propia

Mapa 6: Red hídrica de la cuenca del río La Leche



Fuente: Elaboración propia

- Densidad de corriente (D_c)

Es un parámetro importante encargado de relacionar el aumento de corriente y la superficie drenada, el cual representa una medida no real del drenaje.

$$D_c = \frac{N_c}{A}$$

Donde:

N_c = Numero de corrientes

A = Área de la cuenca en Km^2

$$D_c = \frac{828}{1569.78 \text{ km}^2}$$

$$D_c = 0.53$$

Interpretación: El resultado de 0.53 señala que por cada km^2 se hallara a 0.53 corrientes de agua que pertenecen a la cuenca estudiada.

- Densidad de drenaje (D_d)

Representa la información más real de la eficiencia del drenaje.

Tabla 16: Clasificación de la red de drenaje de las cuencas

Clasificación de la red de drenaje			
Rangos (Km/Km ²)	Clases	Rangos (Km/Km ²)	Clases
Fuentes Junco (2004)		Delgadillo y Páez (2008)	
0.1 - 1.8	Baja	< 1	Baja
1.9 - 3.6	Moderada	1 - 2	Moderada
3.7 - 5.6	Alta	2 - 3	Alta
		> 3	Muy Alta

Fuente: Fuentes Junco (2004) y Delgadillo y Páez (2008)

Se calcula por la expresión siguiente:

$$D_d = \frac{L_i}{A}$$

Donde:

L_i = Longitud total de ríos Km

$A = \text{Área de la cuenca en Km}^2$

$$D_d = \frac{1127.83 \text{ km}}{1569.78 \text{ km}^2}$$

$$D_d = 0.72 \text{ km/km}^2$$

Interpretación: El resultado de la densidad de drenaje de 0.72 indica que el grado de cobertura vegetal que contiene la cuenca es baja.

- Sinuosidad de corrientes (S)

$$S = \frac{L}{L_v}$$

Donde:

$L = \text{Longitud del río principal (Km)}$

$L_v = \text{Longitud de la cuenca (Km)}$

$$S = \frac{97.97 \text{ km}}{70.17 \text{ km}}$$

$$S = 1.396$$

Debido a que la sinuosidad es mayor que 1.25, el resultado indica que las velocidades en el cauce son menores.

- Tiempo de concentración (TC)

Se hace uso del método california, o básicamente el método según Kirpich.

$$T_c = \left(\frac{0.871L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Donde:

$L = \text{Longitud del cauce principal (Km)}$

$H = \text{Desnivel máximo de la cuenca (m)}$

$$T_c = \left(\frac{0.871 * 97.97^3}{4104.06} \right)^{0.385}$$

$$T_c(\text{Horas}) = 7.68$$

$$T_c(\text{Min}) = 460.98$$

Luego de los cálculos se obtuvo como valor de tiempo de concentración obtenido de 460.98 minutos.

4.3.2.5 El cauce principal

- Longitud de la red hídrica

La longitud total de la red hídrica del cauce principal del río La Leche es de 1127.83 Km.

- Longitud del cauce

La longitud del cauce o curso principal de la cuenca del río La Leche es de 97.97 Km.

- Pendiente del cauce

La pendiente del cauce o curso principal de la cuenca del río La Leche es de 41.89 m/km.

4.3.2.6 Estimación hidráulica de coeficientes de rugosidad de Manning

El investigador W. L. Cowan (1956), propuso utilizar el siguiente método de cálculo

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$$

Siendo:

n_0 = Valor básico del coeficiente de rugosidad para un tramo recto y uniforme.

n_1 = Incremento por irregularidades de las secciones.

n_2 = Incremento por variaciones de forma y dimensiones de las secciones.

n_3 = Incremento por obstrucciones.

n_4 = Incremento por vegetación en el cauce.

m = Factor correctivo por curvas y meandros del río.

Un procedimiento que recomiendan para un ingeniero con poca experiencia con el uso de los coeficientes de rugosidades en ríos, es realizar comparaciones del caso que debe resolver, con tablas publicadas en algunos textos sobre el tema, de diversos tramos de ríos con sus coeficientes medidos. Cowan recomienda 2 publicaciones útiles en el tema: “Hydraulic Roughness of Rivers “de Harry Barnes (U.S Geological Survey) y el libro “Roughness characteristics of New Zealand Rivers” de D.M. Hicksy y P.D. Mason (1998) (Institute of Water and Atmospheric Research). A continuación, se indican los valores que adoptan los diversos términos del procedimiento de Cowan:

Tabla 17: Valores medios del coeficiente de Manning (n)

Características de la canalización	Características	Valor medio del coeficiente n .	
Material del lecho: n_0	Tierra	0.020	
	"	Roca cortada	0.025
	"	Grava fina	0.024
	"	Grava gruesa	0.028
Grado de Irregularidades: n_1	Suaves	0.000	
	"	Pocas	0.005
	"	Moderadas	0.010
	"	Severas	0.020
Variaciones de la sección: n_2	Graduales	0.000	
	"	Ocasionales	0.005
	"	Frecuentes	0.010 - 0.015
Obstrucciones: n_3	Despreciables	0.000	
	"	Pocas	0.010 - 0.015
	"	Muchas	0.020 - 0.030
	"	Severas	0.040 - 0.060
Vegetación: n_4	Pocas	0.005 - 0.010	
	"	Regular	0.010 - 0.025
	"	Muchas	0.025 - 0.050
	"	Gran cantidad	0.050 - 0.100
Curvas: m	Pocas	1.000	
	"	Regular	1.050
	"	Muchas	1.100

Fuente: W. L. Cowan (1956)

A continuación, se muestra el resumen de las características de la cuenca del río La Leche.

Tabla 18: Características de la cuenca de río La Leche

PARAMETROS MORFOMETRICOS CUENCA RIO LA LECHE		
DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
De la superficie		
Área	km ²	1569.78
Perímetro de la cuenca	km	249.63
Cotas		
Cota máxima	msnm	4150
Cota mínima	msnm	45.94
Centroide (PSC:wgs 1984 UTM Zona 17S)		
X centroide	m	669227.23
Y centroide	m	9292310.51
Z centroide	msnm	760.95
Forma de la cuenca		
Coeficiente de Gravelius (k)		1.76
Relación elongación (Re)		0.64
Factor de forma		0.32
Altitud		
Altitud media	msnm	760.95
Altitud más frecuente	msnm	3294.99
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	1493.22
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	11.53
De la Red Hídrica		
Densidad de drenaje (Dd)	km/km ²	0.72
Densidad de corriente (Dc)		0.53
Longitud de la cuenca	km	70.17
Longitud del curso principal	km	97.97
Orden de la Red Hídrica	Und	6
Longitud de la red hídrica	km	1127.83
Pendiente Promedio de la Red Hídrica	%	1.18
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	horas	7.68
Pendiente del cauce principal	m/km	41.89

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Información meteorológica

Gran parte de la información meteorológica fue tomada de la página disponible del SENAMHI y del ANA (Autoridad Nacional del Agua) en formato digital, debido a que estas instituciones cuentan con amplia información.

4.3.3.1 Registros datos de precipitación

Todos los datos obtenidos de la estación Puchaca, Tocmoche y Incahuasi conforman una información básica e importante para realizar el estudio hidrológico de la cuenca del río La Leche. Este estudio se realizó ordenando la cantidad de lluvia caída durante todos los días de un año.

4.3.3.2 Análisis, relleno y consistencia de la información meteorológica

Para rellenar los datos se ha ponderado los valores de lluvia de las siguientes estaciones: Puchaca, Tocmoche e Incahuasi. En proporción al valor normal anual de lluvia en la estación de dato faltante con cada una de las estaciones índices.

Proporción normal:

$$\frac{P_X}{\bar{P}_X} = \frac{1}{N} \left(\frac{P_A}{\bar{P}_A} + \frac{P_B}{\bar{P}_B} + \frac{P_C}{\bar{P}_C} + \dots + \frac{P_N}{\bar{P}_N} \right)$$

Donde:

P_A = Dato de precipitación de la estación A.

P_B = Dato de precipitación de la estación B.

P_X = Dato de precipitación de la estación faltante X.

\bar{P}_X = Promedio sin la precipitación de X.

\bar{P}_A = Promedio sin la precipitación de A.

\bar{P}_B = Promedio sin la precipitación de B.

- Relleno de datos faltantes de la estación Puchaca.

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Dic. 1963	x	0.00	95.50
TOTAL ANUAL	0.00	40.00	179.50
Precipt. total (x)	0.000		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Ene. 1964	x	55.00	106.40
TOTAL ANUAL	21.77	396.11	490.30
Precipt total (x)	3.87		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Mar. 1964	x	20.00	43.40
TOTAL ANUAL	21.77	396.11	490.30

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Feb. 1964	x	110.00	38.50
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
	21.77	396.11	490.30
Abr. 1964	x	75.00	124.50
Precipt total (x)		3.88	
TOTAL ANUAL	21.77	396.11	490.30
Precipt total (x)	4.82		

Precipt total (x)	1.51
-------------------	------

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Set. 1974	x	0.00	80.50
TOTAL ANUAL	107.78	251.00	640.00
Precipt total (x)	6.78		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Oct. 1974	x	0.00	64.50
TOTAL ANUAL	107.78	251.00	640.00
Precipt total (x)	5.43		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Nov. 1974	x	0.00	60.00
TOTAL ANUAL	107.78	251.00	640.00
Precipt total (x)	5.05		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Ene. 2008	x	199.80	71.70
TOTAL ANUAL	115.14	1600.60	863.30
Precipt total (x)	11.97		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Dic. 2000	x	20.00	93.30
TOTAL ANUAL	236.55	1078.50	719.20
Precipt total (x)	17.55		

- Relleno de datos faltantes de la estación Tocmoche.

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Jul. 1968	0.00	x	8.50
TOTAL ANUAL	19.20	36.00	271.50
Precipt total (x)	0.56		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Ago. 1968	0.00	x	14.50
TOTAL ANUAL	19.20	36.00	271.50
Precipt total (x)	0.96		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Feb. 1991	0.00	x	68.50
TOTAL ANUAL	5.60	26.90	195.50
Precipt total (x)	4.71		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Mar. 1991	0.00	x	23.50
TOTAL ANUAL	5.60	26.90	195.50
Precipt total (x)	1.62		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Abr. 1991	5.30	x	27.50
TOTAL ANUAL	5.60	26.90	195.50
Precipt total (x)	14.62		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
May. 1991	0.00	x	2.00
TOTAL ANUAL	5.60	26.90	195.50
Precipt total (x)	0.14		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi

Jun. 1991	0.00	x	0.00
TOTAL ANUAL	5.60	26.90	195.50
Precipt total (x)	0.00		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Mar. 2006	189.15	x	250.00
TOTAL ANUAL	420.45	450.70	719.40
Precipt total (x)	179.69		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Abr. 2014	4.70	x	31.40
TOTAL ANUAL	40.93	181.80	557.20
Precipt total (x)	15.56		

- Relleno de datos faltantes de la estación Incahuasi.

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Set. 1964	0.56	25.00	x
TOTAL ANUAL	21.77	396.11	490.30
Precipt total (x)	21.78		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Oct. 1964	9.10	60.00	x
TOTAL ANUAL	21.77	396.11	490.30
Precipt total (x)	139.61		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Abr. 1998	147.90	343.00	x
TOTAL ANUAL	2258.00	2696.00	507.30
Precipt total (x)	48.88		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Mar. 2005	109.33	232.00	x
TOTAL ANUAL	147.84	473.00	293.60
Precipt total (x)	180.56		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Jul. 2002	0.00	0.00	x
TOTAL ANUAL	486.15	1060.00	528.80
Precipt total (x)	0.00		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Set. 2002	0.00	0.00	x
TOTAL ANUAL	486.15	1060.00	528.80
Precipt total (x)	0.00		

	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Oct. 2002	4.80	3.00	x
TOTAL ANUAL	486.15	1060.00	528.80
Precipt total (x)	3.36		

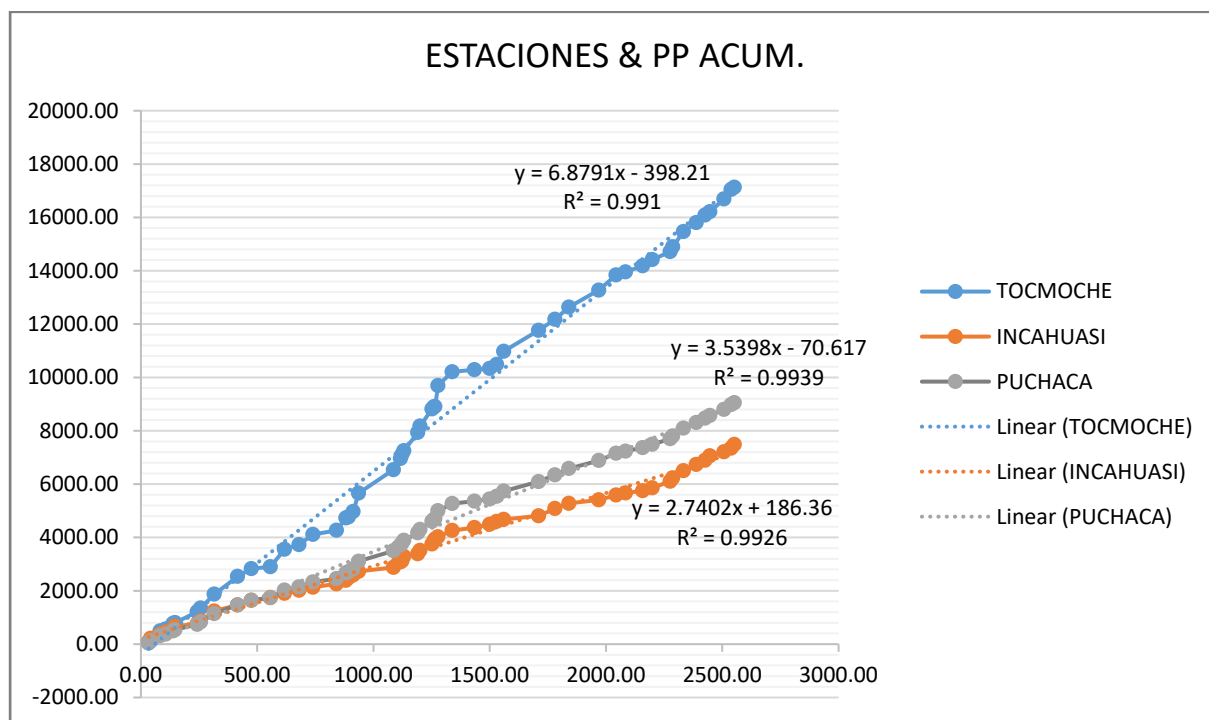
	ESTACIONES		
FECHA FALTANTE	Puchaca	Tocmoche	Incahuasi
Nov. 2002	1.40	7.00	x
TOTAL ANUAL	486.15	1060.00	528.80
Precipt total (x)	2.51		

Tabla 19: Precipitaciones máximas en 24 Hrs.

AÑO	ANUAL				ANUAL ACUMULADO			
	PUCHACA	TOCMOCHE	INCAHUASI	PP	PUCHACA	TOCMOCHE	INCAHUASI	PP ACUM.
1963	33.5	40	95.5	56.33	33.50	40.00	95.50	56.33
1964	9.1	75	124.5	69.53	42.60	115.00	220.00	125.87
1965	40	382.9	151	191.30	82.60	497.90	371.00	317.17
1966	24.3	66.4	89	59.90	106.90	564.30	460.00	377.07
1967	31.5	212	108	117.17	138.40	776.30	568.00	494.23
1968	8.8	28	99.5	45.43	147.20	804.30	667.50	539.67
1969	95.4	410	103	202.80	242.60	1214.30	770.50	742.47
1970	14.3	141	105	86.77	256.90	1355.30	875.50	829.23
1971	59	518	364	313.67	315.90	1873.30	1239.50	1142.90
1972	100.4	667	229	332.13	416.30	2540.30	1468.50	1475.03
1973	58.7	292	171.5	174.07	475.00	2832.30	1640.00	1649.10
1974	82.13	68	108	86.04	557.13	2900.30	1748.00	1735.14
1975	60.3	654	156	290.10	617.43	3554.30	1904.00	2025.24
1976	62.7	177	116	118.57	680.13	3731.30	2020.00	2143.81
1977	60	380	114.5	184.83	740.13	4111.30	2134.50	2328.64
1978	101.5	156	126.1	127.87	841.63	4267.30	2260.60	2456.51
1979	40.1	462	129	210.37	881.73	4729.30	2389.60	2666.88
1980	11.1	36	100	49.03	892.83	4765.30	2489.60	2715.91
1981	20.3	209	100.5	109.93	913.13	4974.30	2590.10	2825.84
1982	23.2	685	139.6	282.60	936.33	5659.30	2729.70	3108.44
1983	150	881	145	392.00	1086.33	6540.30	2874.70	3500.44
1984	30.2	421	204.5	218.57	1116.53	6961.30	3079.20	3719.01
1985	6.1	139	39.5	61.53	1122.63	7100.30	3118.70	3780.54
1986	8.2	153	172.5	111.23	1130.83	7253.30	3291.20	3891.78
1987	60.2	683	97	280.07	1191.03	7936.30	3388.20	4171.84
1988	9.7	242	127	126.23	1200.73	8178.30	3515.20	4298.08
1989	51.5	641	238	310.17	1252.23	8819.30	3753.20	4608.24
1990	8.5	78	110.5	65.67	1260.73	8897.30	3863.70	4673.91
1991	4.2	11.7	68.5	28.13	1264.93	8909.00	3932.20	4702.04
1992	12.9	788.2	92.5	297.87	1277.83	9697.20	4024.70	4999.91
1993	60.9	514.2	238.5	271.20	1338.73	10211.40	4263.20	5271.11
1994	96.2	77	108	93.73	1434.93	10288.40	4371.20	5364.84
1995	65.3	46.7	120.4	77.47	1500.23	10335.10	4491.60	5442.31
1996	30.3	154	111.3	98.53	1530.53	10489.10	4602.90	5540.84
1997	30	491	74.5	198.50	1560.53	10980.10	4677.40	5739.34
1998	150.2	788	133.5	357.23	1710.73	11768.10	4810.90	6096.58
1999	70.3	414	273	252.43	1781.03	12182.10	5083.90	6349.01
2000	59.8	455.5	194.4	236.57	1840.83	12637.60	5278.30	6585.58
2001	128.3	636	129.7	298.00	1969.13	13273.60	5408.00	6883.58
2002	74.7	570	179.1	274.60	2043.83	13843.60	5587.10	7158.18
2003	40.3	110	81.6	77.30	2084.13	13953.60	5668.70	7235.48
2004	73.5	231	81.3	128.60	2157.63	14184.60	5750.00	7364.08
2005	41.5	232	108.4	127.30	2199.13	14416.60	5858.40	7491.38
2006	77.4	301	250	209.47	2276.53	14717.60	6108.40	7700.84
2007	10.8	177.3	121.6	103.23	2287.33	14894.90	6230.00	7804.08
2008	45.8	574.7	269.7	296.73	2333.13	15469.60	6499.70	8100.81
2009	55.2	334.6	235.7	208.50	2388.33	15804.20	6735.40	8309.31
2010	38.2	284.8	155.2	159.40	2426.53	16089.00	6890.60	8468.71
2011	20.6	125.5	170.6	105.57	2447.13	16214.50	7061.20	8574.28
2012	60.4	475.2	147.2	227.60	2507.53	16689.70	7208.40	8801.88
2013	30.9	356.2	140.4	175.83	2538.43	17045.90	7348.80	8977.71
2014	14.2	83.2	136.1	77.83	2552.63	17129.10	7484.90	9055.54

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4: Precipitaciones máximas en 24 Hr.



Fuente: Propia

4.3.3.3 Análisis estadísticos de datos hidrológicos históricos

En el análisis hidrológico se aplicará de forma simultánea la parte teórica y la estimación de caudales máximos de diseño a partir de la precipitación máxima en 24 horas.

Para esta tesis se ha trabajado con la precipitación máxima de 24 hr de estación meteorológica Puchaca siendo la más apropiada y cercana a la zona de estudio. Se dispuso la siguiente información pluviométrica: Estación: Puchaca, Parámetro: Precipitación máxima (24 hr) y Periodo: 1963-2014

La ubicación y características de la estación meteorológica cercana ubicada en la zona de estudio es:

Nombre de estación	Tipo	Entidad operadora	Latitud	Longitud	Altitud m.s.n.m.	Provincia	Dpto.	Periodo de registro
Puchaca	CO	SENAMHI	6°22'25"	79°28'10.25"	500 msnm	Ferreñafe	Lambayeque	1963-2014

En la tabla siguiente se muestra una serie de datos históricos de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Puchaca, las cuales son proporcionadas por senamhi.

Tabla 20: Datos mensuales de precipitación máxima en 24 hrs. (mm)

Año	Ener.	Febr.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Max.
1963			33.5	7.9	2.1	1.0	0.2	0.2	0.0	0.6	S/D	0.0	33.5
1964	3.9	3.9	1.5	4.8	0.0	0.8	0.0	0.6	0.6	9.1	3.5	7.2	9.1
1965	0.0	9.2	40.0	35.2	7.2	0.3	0.1	0.0	6.3	1.7	10.2	12.3	40.0
1966	3.7	0.0	24.3	1.2	0.6	0.0	0.0	0.6	2.5	8.7	5.0	0.3	24.3
1967	23.3	31.5	3.1	0.0	2.0	0.0	2.8	4.3	0.0	8.0	0.0	0.0	31.5
1968	0.4	1.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8	0.9	0.0	8.8
1969	4.0	20.7	95.4	5.6	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0	0.5	95.4
1970	11.0	0.0	14.3	1.4	8.9	0.6	0.0	0.0	1.5	8.3	3.0	0.5	14.3
1971	0.0	18.5	59.0	21.6	1.6	0.0	0.0	0.7	0.5	0.8	1.7	7.5	59.0
1972	3.1	30.6	100.4	14.4	0.8	1.6	0.5	0.0	0.8	-99.9	2.2	4.4	100.4
1973	58.7	50.3	20.0	10.3	1.1	0.5	0.4	1.1	6.0	0.2	0.9	0.0	58.7
1974	3.7	82.1	2.0	1.9	4.5	9.2	0.0	4.4	6.8	5.4	5.1	0.0	82.1
1975	2.8	33.3	60.3	14.3	2.0	2.1	0.0	4.5	1.1	13.0	4.1	0.0	60.3
1976	62.7	21.0	1.4	4.1	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4	0.1	62.7
1977	6.4	19.7	60.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	4.8	0.0	0.0	60.0
1978	0.0	12.3	101.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	101.5
1979	5.1	5.8	40.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	40.1
1980	1.1	3.1	9.9	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.4	0.0	11.1
1981	0.0	9.5	20.3	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.0	20.3
1982	0.0	6.3	2.0	9.2	0.4	0.0	0.0	0.0	1.9	7.8	15.5	23.2	23.2
1983	86.2	28.2	150.0	81.1	80.4	15.4	0.0	0.0	0.9	15.7	0.0	0.0	150.0
1984	10.2	30.2	18.4	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.6	30.2
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	0.0	1.6	6.1
1986	3.1	0.0	0.0	8.2	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.6	3.5	4.7	8.2
1987	8.5	40.2	60.2	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	60.2
1988	3.1	4.6	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7
1989	0.0	20.1	51.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	51.5
1990	0.0	1.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	8.5	0.0	8.5
1991	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	4.2
1992	4.1	6.7	12.9	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	2.1	8.5	0.0	12.9
1993	0.7	10.2	60.9	3.6	0.0	0.0	0.4	1.7	6.6	15.7	20.9	0.6	60.9
1994	6.2	18.7	96.2	9.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9	5.4	1.3	96.2
1995	58.9	65.3	11.1	5.2	1.0	0.0	2.1	0.0	0.2	1.1	1.2	4.9	65.3
1996	0.6	1.4	30.3	5.4	3.5	0.2	0.0	0.3	0.3	1.1	0.2	0.0	30.3
1997	0.5	4.9	30.0	16.1	1.1	1.2	0.0	5.9	0.8	1.7	8.6	25.0	30.0
1998	150.2	105.4	147.0	23.2	10.4	1.7	0.4	0.3	5.1	1.7	0.8	8.4	150.2
1999	20.4	70.3	10.2	20.7	12.5	5.2	0.0	0.6	5.3	2.1	0.3	11.5	70.3
2000	49.2	59.8	55.6	58.9	9.6	0.5	0.0	2.6	0.5	0.0	0.0	17.6	59.8
2001	7.2	16.9	128.3	50.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.5	0.1	0.0	128.3
2002	0.0	74.7	37.2	63.2	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	1.2	0.0	74.7
2003	12.7	40.3	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.1	40.3
2004	5.0	3.5	73.5	8.9	0.0	0.0	4.1	0.0	1.8	5.0	0.0	7.5	73.5
2005	0.0	12.4	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	41.5
2006	41.5	27.1	77.4	12.1	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	1.6	5.3	6.2	77.4
2007	4.2	5.0	10.8	2.3	5.0	0.0	0.0	2.5	0.0	3.2	2.8	1.0	10.8
2008	12.0	45.8	30.2	27.2	4.2	3.6	0.0	0.0	0.0	3.0	1.1	0.0	45.8
2009	55.2	11.2	25.5	0.0	0.0	0.0	1.6	2.0	0.0	2.0	2.0	5.3	55.2
2010	11.5	34.6	38.2	5.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	10.4	4.9	2.9	38.2
2011	8.6	20.6	0.0	15.1	1.4	0.0	0.9	0.0	2.2	1.1	0.0	6.8	20.6
2012	4.2	46.7	60.4	9.5	0.0	0.6	0.0	0.0	1.2	-99.9	6.2	3.8	60.4
2013	5.5	3.5	30.9	2.2	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	0.0	5.0	30.9
2014	2.2	0.0	10.8	3.0	6.9	0.0	0.0	0.0	2.8	3.2	14.2	1.9	14.2
MAX	150.2	105.4	150.0	81.1	80.4	15.4	4.1	5.9	6.8	20.0	20.9	25.0	150.2

Fuente: Elaboración propia

Las precipitaciones máximas de la estación Puchaca fue sometida a un análisis de frecuencia con la finalidad de determinar los valores de precipitación, intensidades o caudales máximos para los diversos periodos de retorno de interés mediante la aplicación de modelos probabilísticos.

Tabla 21: Resultado de ajuste de datos a distribución normal

DISTRIBUCION NORMAL							
m	Q=X (m3/s)	Media	Desv. Estand. (S)	P(X)=m/n+1	F(Z)=X-(Media/S)	F(Z) Ordinario	Delta
1	4.20	49.09	35.80	0.019	-1.254	0.105	0.086
2	6.10			0.038	-1.201	0.115	0.077
3	8.20			0.057	-1.142	0.127	0.070
4	8.50			0.075	-1.134	0.128	0.053
5	8.80			0.094	-1.125	0.130	0.036
6	9.10			0.113	-1.117	0.132	0.019
7	9.70			0.132	-1.100	0.136	0.004
8	10.80			0.151	-1.070	0.142	0.009
9	11.10			0.170	-1.061	0.144	0.025
10	12.90			0.189	-1.011	0.156	0.033
11	14.20			0.208	-0.975	0.165	0.043
12	14.30			0.226	-0.972	0.166	0.061
13	20.30			0.245	-0.804	0.211	0.035
14	20.60			0.264	-0.796	0.213	0.051
15	23.20			0.283	-0.723	0.235	0.048
16	24.30			0.302	-0.692	0.244	0.058
17	30.00			0.321	-0.533	0.297	0.024
18	30.20			0.340	-0.528	0.299	0.041
19	30.30			0.358	-0.525	0.300	0.059
20	30.90			0.377	-0.508	0.306	0.072
21	31.50			0.396	-0.491	0.312	0.085
22	33.50			0.415	-0.435	0.332	0.083
23	38.20			0.434	-0.304	0.381	0.053
24	40.00			0.453	-0.254	0.400	0.053
25	40.10			0.472	-0.251	0.401	0.071
26	40.30			0.491	-0.246	0.403	0.088
27	41.50			0.509	-0.212	0.416	0.093
28	45.80			0.528	-0.092	0.463	0.065
29	51.50			0.547	0.067	0.527	0.020
30	55.20			0.566	0.171	0.568	0.002
31	58.70			0.585	0.268	0.606	0.021
32	59.00			0.604	0.277	0.609	0.005
33	59.80			0.623	0.299	0.618	0.005
34	60.00			0.642	0.305	0.620	0.022
35	60.20			0.660	0.310	0.622	0.039
36	60.30			0.679	0.313	0.623	0.056
37	60.40			0.698	0.316	0.624	0.074
38	60.90			0.717	0.330	0.629	0.088
39	62.70			0.736	0.380	0.648	0.088
40	65.30			0.755	0.453	0.675	0.080
41	70.30			0.774	0.592	0.723	0.050
42	73.50			0.792	0.682	0.752	0.040
43	74.70			0.811	0.715	0.763	0.049
44	77.40			0.830	0.791	0.785	0.045
45	82.13			0.849	0.923	0.822	0.027
46	95.40			0.868	1.294	0.902	0.034
47	96.20			0.887	1.316	0.906	0.019
48	100.40			0.906	1.433	0.924	0.018
49	101.50			0.925	1.464	0.928	0.004
50	128.30			0.943	2.213	0.987	0.043
51	150.00			0.962	2.819	0.998	0.035
52	150.20			0.981	2.824	0.998	0.016

n=	52	Δteórico	0.0934
		Δtabular	0.1886

Los datos se ajustan a la distribución Normal, con un nivel de significación del 5%	
---	--

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: Resultado de ajuste de datos a distribución Lognormal 2 parámetros

DISTRIBUCION LOGNORMAL 2 PARÁMETROS							
m	X	Y=LnX	P(X)	Media Ln(X)	Desv. Estand. Ln (X)	F(Z) Ordinario	Delta
1	4.20	1.435	0.0189	3.575	0.886	0.0078	0.01102
2	6.10	1.808	0.0377			0.0230	0.01470
3	8.20	2.104	0.0566			0.0484	0.00822
4	8.50	2.140	0.0755			0.0526	0.02288
5	8.80	2.175	0.0943			0.0569	0.03740
6	9.10	2.208	0.1132			0.0614	0.05182
7	9.70	2.272	0.1321			0.0706	0.06144
8	10.80	2.380	0.1509			0.0885	0.06241
9	11.10	2.407	0.1698			0.0936	0.07621
10	12.90	2.557	0.1887			0.1252	0.06346
11	14.20	2.653	0.2075			0.1490	0.05858
12	14.30	2.660	0.2264			0.1508	0.07560
13	20.30	3.011	0.2453			0.2619	0.01663
14	20.60	3.025	0.2642			0.2673	0.00318
15	23.20	3.144	0.2830			0.3132	0.03021
16	24.30	3.190	0.3019			0.3320	0.03010
17	30.00	3.401	0.3208			0.4221	0.10133
18	30.20	3.408	0.3396			0.4250	0.08540
19	30.30	3.411	0.3585			0.4265	0.06800
20	30.90	3.431	0.3774			0.4352	0.05783
21	31.50	3.450	0.3962			0.4437	0.04752
22	33.50	3.512	0.4151			0.4713	0.05621
23	38.20	3.643	0.4340			0.5304	0.09642
24	40.00	3.689	0.4528			0.5510	0.09817
25	40.10	3.691	0.4717			0.5521	0.08042
26	40.30	3.696	0.4906			0.5543	0.06377
27	41.50	3.726	0.5094			0.5674	0.05796
28	45.80	3.824	0.5283			0.6107	0.08236
29	51.50	3.942	0.5472			0.6604	0.11320
30	55.20	4.011	0.5660			0.6886	0.12253
31	58.70	4.072	0.5849			0.7127	0.12776
32	59.00	4.078	0.6038			0.7146	0.11085
33	59.80	4.091	0.6226			0.7198	0.09712
34	60.00	4.094	0.6415			0.7210	0.07952
35	60.20	4.098	0.6604			0.7223	0.06192
36	60.30	4.099	0.6792			0.7229	0.04368
37	60.40	4.101	0.6981			0.7235	0.02543
38	60.90	4.109	0.7170			0.7267	0.00967
39	62.70	4.138	0.7358			0.7375	0.00163
40	65.30	4.179	0.7547			0.7522	0.00251
41	70.30	4.253	0.7736			0.7778	0.00421
42	73.50	4.297	0.7925			0.7925	0.00001
43	74.70	4.313	0.8113			0.7977	0.01366
44	77.40	4.349	0.8302			0.8088	0.02142
45	82.13	4.408	0.8491			0.8265	0.02258
46	95.40	4.558	0.8679			0.8664	0.00155
47	96.20	4.566	0.8868			0.8684	0.01840
48	100.40	4.609	0.9057			0.8784	0.02725
49	101.50	4.620	0.9245			0.8809	0.04365
50	128.30	4.854	0.9434			0.9256	0.01778
51	150.00	5.011	0.9623			0.9474	0.01485
52	150.20	5.012	0.9811			0.9476	0.03356

n=	52	Δteórico	0.1278
		Δtabular	0.1886

Los datos se ajustan a la distribución Log Normal de dos parámetros, con un nivel de significación del 5%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23: Resultado de ajuste de datos a distribución Lognormal 3 parámetros

DISTRIBUCION LOGNORMAL 3 PARÁMETROS										
m	X	P(X)	Mediana	Xo	X - Xo	Ln(X - Xo)	Media Ln(X - Xo)	Desv. Estand.	F(Z)	Delta
1	4.20	0.0189	40.900	-14.3522	18.552	2.921	3.993	0.572	3.031E-02	0.0114
2	6.10	0.0377			20.452	3.018			4.403E-02	0.0063
3	8.20	0.0566			22.552	3.116			6.242E-02	0.0058
4	8.50	0.0755			22.852	3.129			6.531E-02	0.0102
5	8.80	0.0943			23.152	3.142			6.826E-02	0.0261
6	9.10	0.1132			23.452	3.155			7.128E-02	0.0419
7	9.70	0.1321			24.052	3.180			7.749E-02	0.0546
8	10.80	0.1509			25.152	3.225			8.948E-02	0.0615
9	11.10	0.1698			25.452	3.237			9.288E-02	0.0769
10	12.90	0.1887			27.252	3.305			1.144E-01	0.0743
11	14.20	0.2075			28.552	3.352			1.309E-01	0.0767
12	14.30	0.2264			28.652	3.355			1.322E-01	0.0942
13	20.30	0.2453			34.652	3.545			2.167E-01	0.0286
14	20.60	0.2642			34.952	3.554			2.211E-01	0.0430
15	23.20	0.2830			37.552	3.626			2.601E-01	0.0229
16	24.30	0.3019			38.652	3.655			2.768E-01	0.0251
17	30.00	0.3208			44.352	3.792			3.625E-01	0.0417
18	30.20	0.3396			44.552	3.797			3.654E-01	0.0258
19	30.30	0.3585			44.652	3.799			3.669E-01	0.0084
20	30.90	0.3774			45.252	3.812			3.757E-01	0.0016
21	31.50	0.3962			45.852	3.825			3.845E-01	0.0117
22	33.50	0.4151			47.852	3.868			4.133E-01	0.0018
23	38.20	0.4340			52.552	3.962			4.780E-01	0.0441
24	40.00	0.4528			54.352	3.995			5.015E-01	0.0487
25	40.10	0.4717			54.452	3.997			5.028E-01	0.0311
26	40.30	0.4906			54.652	4.001			5.054E-01	0.0148
27	41.50	0.5094			55.852	4.023			5.205E-01	0.0111
28	45.80	0.5283			60.152	4.097			5.719E-01	0.0436
29	51.50	0.5472			65.852	4.187			6.329E-01	0.0857
30	55.20	0.5660			69.552	4.242			6.683E-01	0.1022
31	58.70	0.5849			73.052	4.291			6.988E-01	0.1139
32	59.00	0.6038			73.352	4.295			7.013E-01	0.0975
33	59.80	0.6226			74.152	4.306			7.079E-01	0.0852
34	60.00	0.6415			74.352	4.309			7.095E-01	0.0680
35	60.20	0.6604			74.552	4.311			7.111E-01	0.0507
36	60.30	0.6792			74.652	4.313			7.119E-01	0.0326
37	60.40	0.6981			74.752	4.314			7.127E-01	0.0146
38	60.90	0.7170			75.252	4.321			7.166E-01	0.0003
39	62.70	0.7358			77.052	4.344			7.305E-01	0.0054
40	65.30	0.7547			79.652	4.378			7.493E-01	0.0054
41	70.30	0.7736			84.652	4.439			7.819E-01	0.0084
42	73.50	0.7925			87.852	4.476			8.006E-01	0.0081
43	74.70	0.8113			89.052	4.489			8.071E-01	0.0042
44	77.40	0.8302			91.752	4.519			8.211E-01	0.0091
45	82.13	0.8491			96.482	4.569			8.432E-01	0.0059
46	95.40	0.8679			109.752	4.698			8.912E-01	0.0233
47	96.20	0.8868			110.552	4.705			8.936E-01	0.0068
48	100.40	0.9057			114.752	4.743			9.051E-01	0.0006
49	101.50	0.9245			115.852	4.752			9.078E-01	0.0167
50	128.30	0.9434			142.652	4.960			9.546E-01	0.0112
51	150.00	0.9623			164.352	5.102			9.738E-01	0.0115
52	150.20	0.9811			164.552	5.103			9.739E-01	0.0072

n=	52	Ateorico	0.1139
		Δtabular	0.1886

Los datos se ajustan a la distribución Log Normal de tres parámetros, con un nivel de significación del 5%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Resultado de ajuste de datos a distribución Gamma 2 parámetros

DISTRIBUCION GAMMA 2 PARÁMETROS							
m	X	Media	P (X)	β	γ	G(X) Ordinario	Delta
1	4.20	49.089	0.0189	28.564	1.72	0.0216	0.0027
2	6.10		0.0377			0.0393	0.0016
3	8.20		0.0566			0.0624	0.0058
4	8.50		0.0755			0.0660	0.0095
5	8.80		0.0943			0.0696	0.0247
6	9.10		0.1132			0.0733	0.0399
7	9.70		0.1321			0.0807	0.0514
8	10.80		0.1509			0.0948	0.0561
9	11.10		0.1698			0.0988	0.0710
10	12.90		0.1887			0.1231	0.0656
11	14.20		0.2075			0.1412	0.0663
12	14.30		0.2264			0.1427	0.0838
13	20.30		0.2453			0.2300	0.0153
14	20.60		0.2642			0.2344	0.0297
15	23.20		0.2830			0.2727	0.0103
16	24.30		0.3019			0.2888	0.0131
17	30.00		0.3208			0.3702	0.0495
18	30.20		0.3396			0.3730	0.0334
19	30.30		0.3585			0.3744	0.0159
20	30.90		0.3774			0.3827	0.0053
21	31.50		0.3962			0.3909	0.0053
22	33.50		0.4151			0.4179	0.0028
23	38.20		0.4340			0.4784	0.0444
24	40.00		0.4528			0.5004	0.0476
25	40.10		0.4717			0.5016	0.0299
26	40.30		0.4906			0.5040	0.0134
27	41.50		0.5094			0.5183	0.0088
28	45.80		0.5283			0.5668	0.0385
29	51.50		0.5472			0.6252	0.0780
30	55.20		0.5660			0.6596	0.0935
31	58.70		0.5849			0.6896	0.1047
32	59.00		0.6038			0.6921	0.0883
33	59.80		0.6226			0.6986	0.0759
34	60.00		0.6415			0.7002	0.0587
35	60.20		0.6604			0.7018	0.0414
36	60.30		0.6792			0.7026	0.0233
37	60.40		0.6981			0.7034	0.0052
38	60.90		0.7170			0.7073	0.0097
39	62.70		0.7358			0.7211	0.0147
40	65.30		0.7547			0.7401	0.0146
41	70.30		0.7736			0.7734	0.0002
42	73.50		0.7925			0.7926	0.0001
43	74.70		0.8113			0.7994	0.0119
44	77.40		0.8302			0.8140	0.0161
45	82.13		0.8491			0.8373	0.0117
46	95.40		0.8679			0.8890	0.0211
47	96.20		0.8868			0.8915	0.0047
48	100.40		0.9057			0.9041	0.0016
49	101.50		0.9245			0.9071	0.0174
50	128.30		0.9434			0.9584	0.0150
51	150.00		0.9623			0.9786	0.0163
52	150.20		0.9811			0.9787	0.0024

n=	52	Δ teorico	0.1047
		Δ tabular	0.1886

Los datos se ajustan a la distribución Gamma 2 parámetros, con un nivel de significación del 5%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Resultado de ajuste de datos a distribución Gamma 3 parámetros

DISTRIBUCION GAMMA 3 PARÁMETROS								
m	X	P(X)	Mediana	Xo	β	γ	G(Y) Ordinario	Delta
1	4.20	0.0189	40.9	-20.9396	18.302	3.8263	0.0629	0.0441
2	6.10	0.0377					0.0770	0.0392
3	8.20	0.0566					0.0941	0.0375
4	8.50	0.0755					0.0967	0.0212
5	8.80	0.0943					0.0993	0.0049
6	9.10	0.1132					0.1019	0.0113
7	9.70	0.1321					0.1073	0.0248
8	10.80	0.1509					0.1175	0.0335
9	11.10	0.1698					0.1203	0.0495
10	12.90	0.1887					0.1380	0.0507
11	14.20	0.2075					0.1514	0.0562
12	14.30	0.2264					0.1524	0.0740
13	20.30	0.2453					0.2194	0.0258
14	20.60	0.2642					0.2230	0.0412
15	23.20	0.2830					0.2542	0.0288
16	24.30	0.3019					0.2677	0.0342
17	30.00	0.3208					0.3388	0.0180
18	30.20	0.3396					0.3413	0.0017
19	30.30	0.3585					0.3426	0.0159
20	30.90	0.3774					0.3501	0.0272
21	31.50	0.3962					0.3577	0.0386
22	33.50	0.4151					0.3828	0.0323
23	38.20	0.4340					0.4412	0.0072
24	40.00	0.4528					0.4631	0.0103
25	40.10	0.4717					0.4643	0.0074
26	40.30	0.4906					0.4667	0.0238
27	41.50	0.5094					0.4811	0.0283
28	45.80	0.5283					0.5313	0.0030
29	51.50	0.5472					0.5938	0.0467
30	55.20	0.5660					0.6316	0.0656
31	58.70	0.5849					0.6652	0.0803
32	59.00	0.6038					0.6679	0.0642
33	59.80	0.6226					0.6753	0.0526
34	60.00	0.6415					0.6771	0.0356
35	60.20	0.6604					0.6789	0.0185
36	60.30	0.6792					0.6798	0.0005
37	60.40	0.6981					0.6807	0.0174
38	60.90	0.7170					0.6851	0.0318
39	62.70	0.7358					0.7008	0.0350
40	65.30	0.7547					0.7225	0.0322
41	70.30	0.7736					0.7608	0.0128
42	73.50	0.7925					0.7831	0.0094
43	74.70	0.8113					0.7910	0.0203
44	77.40	0.8302					0.8079	0.0223
45	82.13	0.8491					0.8349	0.0142
46	95.40	0.8679					0.8940	0.0261
47	96.20	0.8868					0.8969	0.0101
48	100.40	0.9057					0.9109	0.0053
49	101.50	0.9245					0.9143	0.0102
50	128.30	0.9434					0.9680	0.0246
51	150.00	0.9623					0.9863	0.0240
52	150.20	0.9811					0.9864	0.0053

n=	52			
		Δteórico	0.0803	
		Δtabular	0.1886	

Los datos se ajustan a la distribución Gamma 3 parámetros, con un nivel de significación del 5%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Resultado de ajuste de datos a distribución Gumbel

DISTRIBUCION GUMBEL							
m	X	P(X)	μ	α	G (y) Ordinario	G (y) Momem Lineal	Delta
1	4.20	0.0189	32.9770	27.9134	0.0606	0.0652	0.0417
2	6.10	0.0377			0.0729	0.0778	0.0351
3	8.20	0.0566			0.0881	0.0933	0.0315
4	8.50	0.0755			0.0904	0.0957	0.0149
5	8.80	0.0943			0.0928	0.0981	0.0016
6	9.10	0.1132			0.0951	0.1005	0.0181
7	9.70	0.1321			0.1000	0.1054	0.0320
8	10.80	0.1509			0.1093	0.1148	0.0416
9	11.10	0.1698			0.1120	0.1175	0.0579
10	12.90	0.1887			0.1284	0.134	0.0603
11	14.20	0.2075			0.1409	0.1466	0.0666
12	14.30	0.2264			0.1419	0.1476	0.0845
13	20.30	0.2453			0.2070	0.2126	0.0382
14	20.60	0.2642			0.2106	0.2161	0.0536
15	23.20	0.283			0.2418	0.2471	0.0412
16	24.30	0.3019			0.2555	0.2606	0.0464
17	30.00	0.3208			0.3287	0.3328	0.0080
18	30.20	0.3396			0.3313	0.3354	0.0083
19	30.30	0.3585			0.3327	0.3367	0.0258
20	30.90	0.3774			0.3405	0.3444	0.0368
21	31.50	0.3962			0.3484	0.3522	0.0478
22	33.50	0.4151			0.3748	0.3781	0.0403
23	38.20	0.434			0.4363	0.4386	0.0024
24	40.00	0.4528			0.4595	0.4614	0.0067
25	40.10	0.4717			0.4608	0.4627	0.0109
26	40.30	0.4906			0.4634	0.4652	0.0272
27	41.50	0.5094			0.4786	0.4802	0.0308
28	45.80	0.5283			0.5317	0.5323	0.0034
29	51.50	0.5472			0.5975	0.5971	0.0503
30	55.20	0.566			0.6369	0.6359	0.0709
31	58.70	0.5849			0.6717	0.6702	0.0868
32	59.00	0.6038			0.6746	0.673	0.0708
33	59.80	0.6226			0.6821	0.6805	0.0595
34	60.00	0.6415			0.6840	0.6823	0.0425
35	60.20	0.6604			0.6859	0.6842	0.0255
36	60.30	0.6792			0.6868	0.6851	0.0075
37	60.40	0.6981			0.6877	0.686	0.0104
38	60.90	0.717			0.6923	0.6905	0.0247
39	62.70	0.7358			0.7084	0.7064	0.0275
40	65.30	0.7547			0.7304	0.7282	0.0243
41	70.30	0.7736			0.7690	0.7665	0.0045
42	73.50	0.7925			0.7912	0.7886	0.0012
43	74.70	0.8113			0.7991	0.7964	0.0123
44	77.40	0.8302			0.8158	0.813	0.0144
45	82.13	0.8491			0.8421	0.8392	0.0070
46	95.40	0.8679			0.8987	0.896	0.0307
47	96.20	0.8868			0.9014	0.8988	0.0146
48	100.40	0.9057			0.9145	0.9121	0.0089
49	101.50	0.9245			0.9177	0.9153	0.0068
50	128.30	0.9434			0.9677	0.9661	0.0243
51	150.00	0.9623			0.9850	0.9841	0.0227
52	150.20	0.9811			0.9851	0.9842	0.0040
n= 52					Δteorico	0.0868	
					Δtabular	0.1886	
Los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significación del 5%							

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Resultado de ajuste de datos a distribución LogGumbel

DISTRIBUCION LOGGUMBEL							
m	X	P(X)	μ	α	G (y) Ordinario	G (y) Momem Lineal	Delta
1	4.20	0.0189	3.1766	0.6907	0	0	0.0189
2	6.10	0.0377			0.0007	0.0016	0.037
3	8.20	0.0566			0.0089	0.0137	0.0477
4	8.50	0.0755			0.0113	0.0168	0.0642
5	8.80	0.0943			0.014	0.0204	0.0803
6	9.10	0.1132			0.0172	0.0243	0.096
7	9.70	0.1321			0.0246	0.0333	0.1075
8	10.80	0.1509			0.042	0.0532	0.109
9	11.10	0.1698			0.0475	0.0594	0.1223
10	12.90	0.1887			0.0861	0.1009	0.1025
11	14.20	0.2075			0.1184	0.1341	0.0891
12	14.30	0.2264			0.121	0.1368	0.1054
13	20.30	0.2453			0.2804	0.2936	0.0351
14	20.60	0.2642			0.2879	0.3009	0.0238
15	23.20	0.283			0.3506	0.3609	0.0676
16	24.30	0.3019			0.3753	0.3845	0.0734
17	30.00	0.3208			0.4856	0.4895	0.1648
18	30.20	0.3396			0.4889	0.4928	0.1493
19	30.30	0.3585			0.4906	0.4943	0.1321
20	30.90	0.3774			0.5005	0.5038	0.1231
21	31.50	0.3962			0.5101	0.5129	0.1139
22	33.50	0.4151			0.5402	0.5416	0.1251
23	38.20	0.434			0.601	0.5996	0.167
24	40.00	0.4528			0.6211	0.6189	0.1682
25	40.10	0.4717			0.6221	0.6199	0.1504
26	40.30	0.4906			0.6242	0.6219	0.1337
27	41.50	0.5094			0.6366	0.6338	0.1272
28	45.80	0.5283			0.676	0.6717	0.1477
29	51.50	0.5472			0.7186	0.7129	0.1715
30	55.20	0.566			0.7417	0.7353	0.1757
31	58.70	0.5849			0.7608	0.754	0.1759
32	59.00	0.6038			0.7623	0.7555	0.1586
33	59.80	0.6226			0.7664	0.7594	0.1437
34	60.00	0.6415			0.7673	0.7604	0.1258
35	60.20	0.6604			0.7683	0.7613	0.1079
36	60.30	0.6792			0.7688	0.7618	0.0896
37	60.40	0.6981			0.7693	0.7623	0.0712
38	60.90	0.717			0.7717	0.7646	0.0547
39	62.70	0.7358			0.78	0.7728	0.0441
40	65.30	0.7547			0.7911	0.7837	0.0364
41	70.30	0.7736			0.8101	0.8025	0.0366
42	73.50	0.7925			0.8209	0.8131	0.0284
43	74.70	0.8113			0.8246	0.8168	0.0133
44	77.40	0.8302			0.8326	0.8248	0.0024
45	82.13	0.8491			0.8453	0.8374	0.0038
46	95.40	0.8679			0.8734	0.8656	0.0055
47	96.20	0.8868			0.8749	0.8671	0.0119
48	100.40	0.9057			0.8819	0.8742	0.0238
49	101.50	0.9245			0.8836	0.876	0.0409
50	128.30	0.9434			0.9157	0.9087	0.0277
51	150.00	0.9623			0.9321	0.9257	0.0301
52	150.20	0.9811			0.9323	0.9259	0.0489

n=	52	Δ teórico	0.1759
		Δ tabular	0.1886

Los datos se ajustan a la distribución Log Gumbel, con un nivel de significación del 5%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov

Δ TABULAR	Δ TEÓRICO DE LAS DISTRIBUCIONES						
	DISTRIBUCION NORMAL	DISTRIBUCION LOGNORMAL 2 PARÁMETROS	DISTRIBUCION LOGNORMAL 3 PARÁMETROS	DISTRIBUCION GAMMA 2 PARÁMETROS	DISTRIBUCION GAMMA 3 PARÁMETROS	DISTRIBUCION GUMBEL	DISTRIBUCION LOGGUMBEL
0.18860	0.09337	0.12776	0.11391	0.104705	0.080258	0.08680	0.17590
MIN Δ	0.080257675						

Fuente: Elaboración propia

De los análisis de distribuciones realizados se obtiene que la mejor distribución que se ajusta es la distribución **Gamma 3 parámetros** por ser la menor y se aprecia en la tabla 28.

4.3.3.4 Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia de la estación base de la cuenca

La ecuación de la intensidad válida para la zona del proyecto resulta:

$$I = \frac{2627.5849 * T^{0.6429}}{t^{-0.7500}}$$

Donde:

I= Intensidad de precipitación (mm/hr)

T=Periodo de retorno (años)

t= Tiempo de duración de precipitación (min)

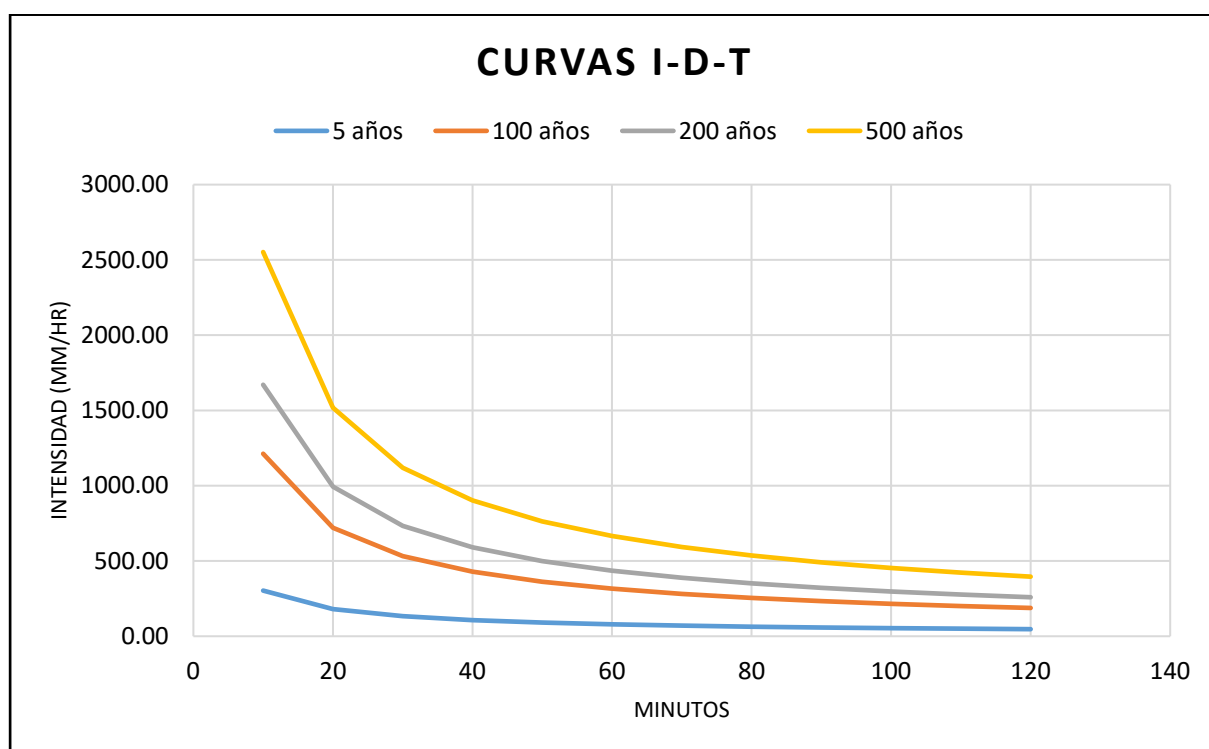
Tabla 29: Intensidades - Tiempo de duración

Duración D	T (años)			
	5 años	100 años	200 años	500 años
10	303.31	1212.30	1670.47	2552.02
20	180.35	720.84	993.27	1517.44
30	133.06	531.83	732.82	1119.55
40	107.24	428.61	590.60	902.28
50	90.71	362.56	499.59	763.23
60	79.12	316.23	435.74	665.69
70	70.48	281.70	388.16	593.01
80	63.76	254.86	351.17	536.50
90	58.37	233.31	321.48	491.14
100	53.94	215.58	297.06	453.82
110	50.22	200.71	276.56	422.51
120	47.04	188.03	259.09	395.82

Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio se presenta las curvas de I-D-F para periodos de retorno de 100,200 y 500 años para el cálculo de socavación, de esta manera obtener la luz y el nivel de aguas máximas extraordinarias para el diseño de una estructura (puente) importante.

Gráfica 5: Curvas I-D-F de la cuenca del rio La Leche



Fuente: Elaboración propia

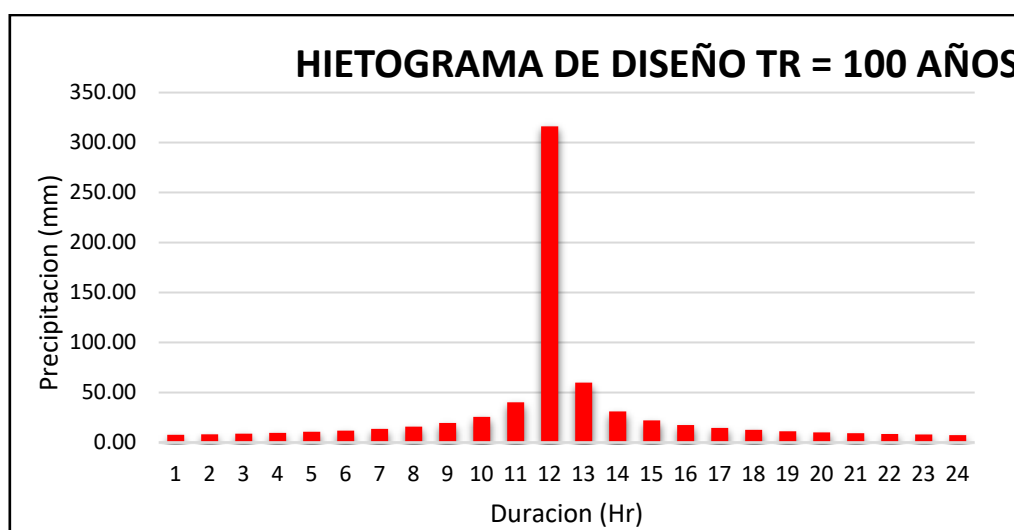
4.3.4 Hietograma de diseño

Los hietogramas de diseño se obtuvieron a partir de las curvas IDF, se utilizó el método de bloques alternos con una duración de 1440 minutos, se realizó las siguientes tablas de intensidades con intervalos de 60 minutos para la estación Puchaca, para tiempo de retorno $Tr = 100, 200$ y 500 años.

Tabla 30: Hietograma de diseño para $Tr = 100$ años

DURACION (hr)	DURACION (min)	INTENSIDAD (mm/hr)	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD	TIEMPO (min)	PRECIPITACION (mm)
			ACUMULADA (mm)	INCREMENTAL (mm)		
1.00	60.00	316.23	316.23	316.23	0-1	7.65
2.00	120.00	188.03	376.06	59.83	1-2	8.21
3.00	180.00	138.73	416.18	40.12	2-3	8.86
4.00	240.00	111.80	447.21	31.03	3-4	9.66
5.00	300.00	94.57	472.87	25.66	4-5	10.64
6.00	360.00	82.49	494.92	22.05	5-6	11.90
7.00	420.00	73.48	514.37	19.45	6-7	13.56
8.00	480.00	66.48	531.83	17.46	7-8	15.89
9.00	540.00	60.86	547.72	15.89	8-9	19.45
10.00	600.00	56.23	562.34	14.62	9-10	25.66
11.00	660.00	52.35	575.90	13.56	10-11	40.12
12.00	720.00	49.05	588.56	12.66	11-12	316.23
13.00	780.00	46.19	600.46	11.90	12-13	59.83
14.00	840.00	43.69	611.69	11.23	13-14	31.03
15.00	900.00	41.49	622.33	10.64	14-15	22.05
16.00	960.00	39.53	632.45	10.12	15-16	17.46
17.00	1020.00	37.77	642.11	9.66	16-17	14.62
18.00	1080.00	36.19	651.35	9.24	17-18	12.66
19.00	1140.00	34.75	660.22	8.86	18-19	11.23
20.00	1200.00	33.44	668.74	8.52	19-20	10.12
21.00	1260.00	32.24	676.94	8.21	20-21	9.24
22.00	1320.00	31.13	684.86	7.92	21-22	8.52
23.00	1380.00	30.11	692.52	7.65	22-23	7.92
24.00	1440.00	29.16	699.92	7.41	23-24	7.41

Fuente: Elaboración propia

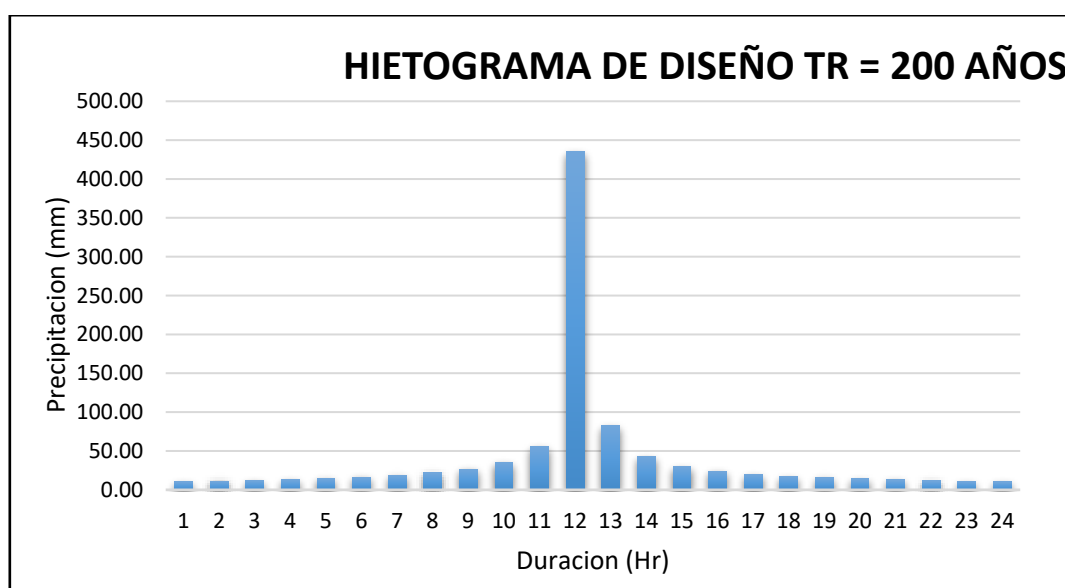
Gráfica 6: Hietograma de diseño para $Tr = 100$ años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Hietograma de diseño para $Tr = 200$ años

DURACION (hr)	DURACION (min)	INTENSIDAD (mm/hr)	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD	TIEMPO (min)	PRECIPITACION (mm)
			ACUMULADA (mm)	INCREMENTAL (mm)		
1.00	60.00	435.74	435.74	435.74	0-1	10.55
2.00	120.00	259.09	518.18	82.44	1-2	11.31
3.00	180.00	191.15	573.46	55.28	2-3	12.21
4.00	240.00	154.06	616.22	42.76	3-4	13.31
5.00	300.00	130.32	651.58	35.35	4-5	14.66
6.00	360.00	113.66	681.96	30.39	5-6	16.39
7.00	420.00	101.25	708.76	26.79	6-7	18.68
8.00	480.00	91.60	732.82	24.06	7-8	21.90
9.00	540.00	83.86	754.72	21.90	8-9	26.79
10.00	600.00	77.49	774.86	20.14	9-10	35.35
11.00	660.00	72.14	793.55	18.68	10-11	55.28
12.00	720.00	67.58	811.00	17.45	11-12	435.74
13.00	780.00	63.65	827.39	16.39	12-13	82.44
14.00	840.00	60.20	842.86	15.47	13-14	42.76
15.00	900.00	57.17	857.53	14.66	14-15	30.39
16.00	960.00	54.47	871.47	13.95	15-16	24.06
17.00	1020.00	52.05	884.78	13.31	16-17	20.14
18.00	1080.00	49.86	897.52	12.73	17-18	17.45
19.00	1140.00	47.88	909.73	12.21	18-19	15.47
20.00	1200.00	46.07	921.47	11.74	19-20	13.95
21.00	1260.00	44.42	932.78	11.31	20-21	12.73
22.00	1320.00	42.90	943.69	10.91	21-22	11.74
23.00	1380.00	41.49	954.24	10.55	22-23	10.91
24.00	1440.00	40.19	964.44	10.21	23-24	10.21

Fuente: Elaboración propia

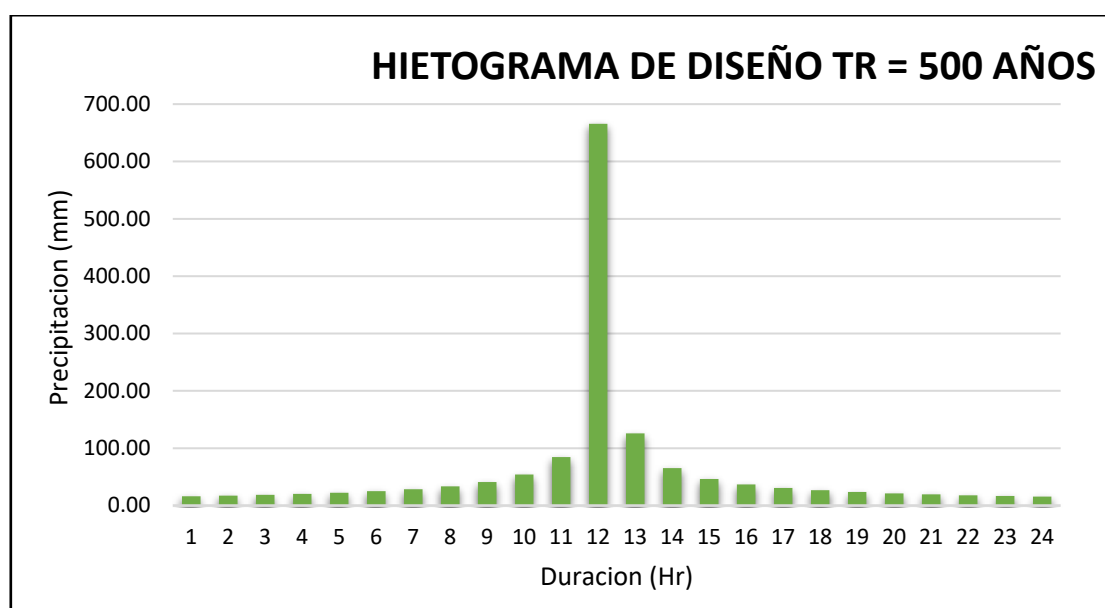
Gráfica 7: Hietograma de diseño para $Tr = 200$ años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Hietograma de diseño para $Tr = 500$ años

DURACION (hr)	DURACION (min)	INTENSIDAD (mm/hr)	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD	TIEMPO (min)	PRECIPITACION (mm)
			ACUMULADA (mm)	INCREMENTAL (mm)		
1.00	60.00	665.69	665.69	665.69	0-1	16.11
2.00	120.00	395.82	791.64	125.95	1-2	17.28
3.00	180.00	292.03	876.10	84.45	2-3	18.66
4.00	240.00	235.36	941.43	65.33	3-4	20.33
5.00	300.00	199.09	995.44	54.01	4-5	22.40
6.00	360.00	173.64	1041.86	46.42	5-6	25.04
7.00	420.00	154.68	1082.79	40.93	6-7	28.55
8.00	480.00	139.94	1119.55	36.76	7-8	33.46
9.00	540.00	128.11	1153.01	33.46	8-9	40.93
10.00	600.00	118.38	1183.78	30.77	9-10	54.01
11.00	660.00	110.21	1212.33	28.55	10-11	84.45
12.00	720.00	103.25	1238.99	26.66	11-12	665.69
13.00	780.00	97.23	1264.03	25.04	12-13	125.95
14.00	840.00	91.98	1287.67	23.64	13-14	65.33
15.00	900.00	87.34	1310.07	22.40	14-15	46.42
16.00	960.00	83.21	1331.38	21.31	15-16	36.76
17.00	1020.00	79.51	1351.71	20.33	16-17	30.77
18.00	1080.00	76.18	1371.16	19.45	17-18	26.66
19.00	1140.00	73.15	1389.82	18.66	18-19	23.64
20.00	1200.00	70.39	1407.76	17.94	19-20	21.31
21.00	1260.00	67.86	1425.04	17.28	20-21	19.45
22.00	1320.00	65.53	1441.71	16.67	21-22	17.94
23.00	1380.00	63.38	1457.82	16.11	22-23	16.67
24.00	1440.00	61.39	1473.41	15.59	23-24	15.59

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8: Hietograma de diseño para $Tr = 500$ años

Fuente: Elaboración propia

Simulación de inundación para un periodo de retorno $Tr = 100$ años



Simulación de inundación para un periodo de retorno $Tr = 200$ años



Simulación de inundación para un periodo de retorno $Tr = 500$ años



Simulación de inundación durante el Fenómeno del niño, 2017



4.3.5 Conclusiones del estudio hidrológico

El estudio y análisis de tipo hidrológico que se realiza tiene como punto de inicio la ubicación de las estaciones pluviométricas que se encuentran más cercanas y que cuenten con los datos suficientes para poder obtener datos de precipitación máxima mediante el uso de un análisis estadístico.

Las estaciones elegidas son Tocmoche, Puchaca e Incahuasi de las cuales se solicitaron datos al ANA y SENAMHI de las estaciones mencionadas se trabaja con los datos brindado por el ANA de la estación Puchaca ya que es la más actualizada y se encuentra en constante funcionamiento. Mediante la comprobación de Kolgomorov-Smirnov se procesa los datos para calcular las precipitaciones de máximas avenidas y con el HIDROESTA calcular los caudales para los periodos de retorno de 100,200 y 500 años.

Los resultados en modo resumen se presenta a continuación: $Tr\ 100 = 162.44\ m^3/s$, $Tr\ 200 = 179.68\ m^3/s$, $Tr\ 500 = 201.70\ m^3/s$ estos resultados servirán para realizar la modelación hidráulica con el software HEC-RAS.

4.4 Estudio hidráulico

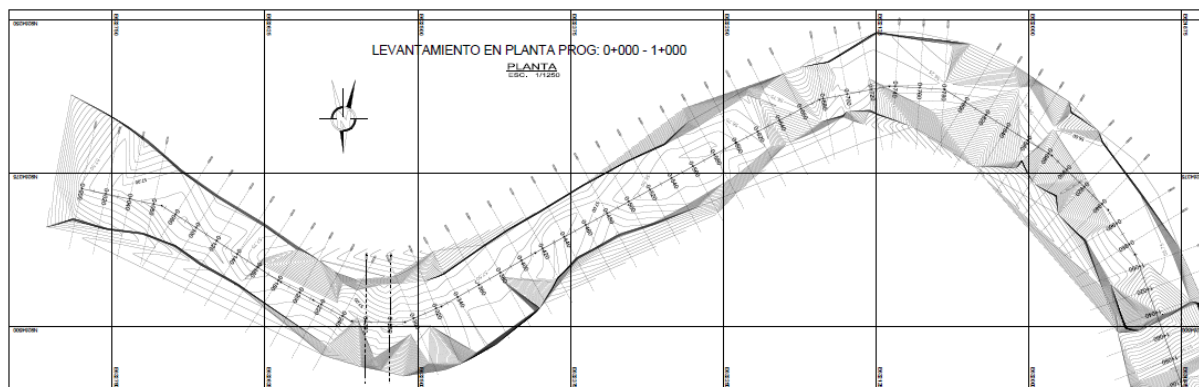
El modelo utilizado para la simulación hidráulica fue el software HEC-RAS (River Analysis System del Hydrologic Engineering Center del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos), Este modelo unidimensional principalmente ejecuta cálculos de Flujo Gradualmente Variado (FGV) a través de la solución de la ecuación de energía unidimensional. Toma en cuenta las pérdidas de carga producto de la fricción en el cauce durante el recorrido del flujo y de procesos de expansión y contracción. El software HEC-RAS necesita que se incluya la geometría de las secciones transversales para obtener los parámetros hidráulicos de las mismas en diferentes condiciones de flujos analizados.

Para modelar la resistencia de flujo es necesario conocer el coeficiente de Manning (n), su variación dependerá del tramo analizado y el modelo también necesita fijar condiciones de frontera. Para la realización del presente estudio el modelado se realizó en régimen permanente, es decir no se consideró la variación del flujo a través del tiempo, de esta manera el HEC-RAS considera que la secciones del rio La Leche tienen contorno o fronteras rígidas y distribuye de manera total todo el caudal hasta llegar a alcanzar la capacidad hidráulica requerida para la avenida que se está simulando. Los cálculos se realizarán en régimen subcrítico, supercrítico o mixto ya que evalúa las condiciones hidráulicas de cada una de las secciones.

4.4.1 Levantamiento topográfico del rio La Leche

Se ejecutó el levantamiento topográfico del rio La Leche que consistió en tomar una nube de puntos georreferenciados los cuales sirven para obtener las curvas de nivel. En la imagen 15 se muestra un tramo del levantamiento topográfico del rio La Leche y con mayor detalle se muestra en el plano anexo.

Imagen 15: Esquema del levantamiento topográfico del rio La Leche

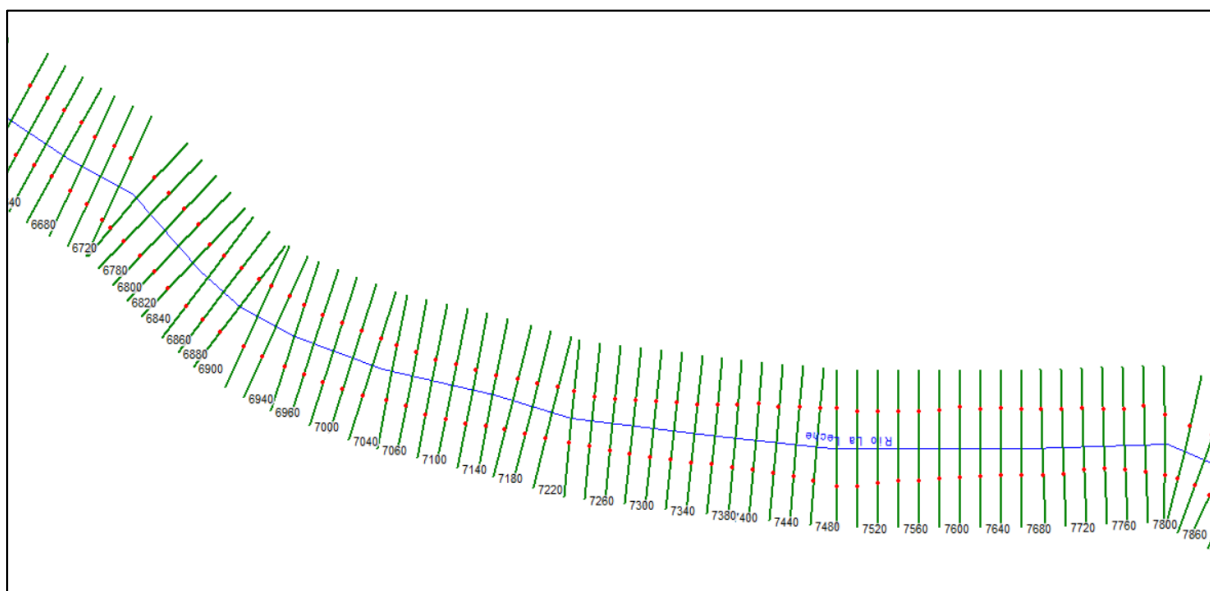


Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Batimetría

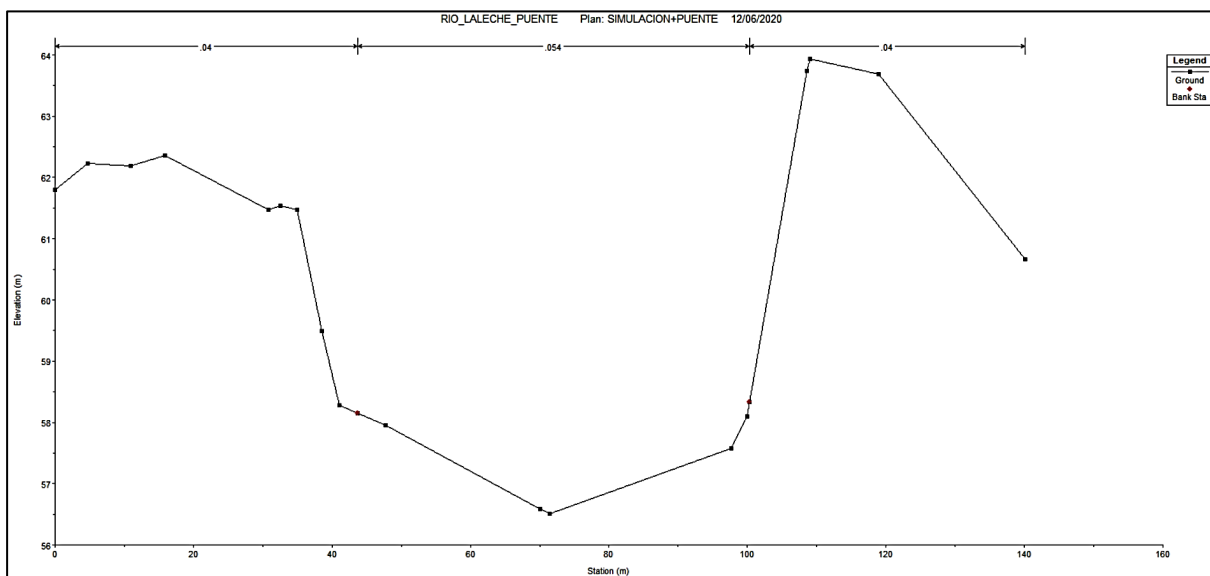
Luego de realizar el levantamiento topográfico del tramo de estudio se obtuvieron 506 secciones transversales del río con una separación de 20 metros que son perpendiculares al flujo del mismo.

Imagen 16: Distribución de las secciones transversales a lo largo del cauce del río La Leche



Fuente: Elaboración propia

Imagen 17: Sección transversal Km 9+800 del río La Leche



Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Información para el modelo HEC-RAS

Los caudales necesarios para el diseño son resultado del estudio hidrológico y se muestran en la tabla 34, para la simulación de este proyecto se utilizarán los caudales para los periodos de retorno de 100, 200 y 500 años.

Tabla 33: Caudales de diseño hidrológico

PERIODO DE RETORNO (años)	CAUDAL DE DISEÑO (m ³ /S)
2	44.38
5	78.39
10	99.98
20	119.89
30	131.01
50	144.59
80	156.76
100	162.44
140	170.89
200	179.68
500	201.70

Fuente: Elaboración propia

4.4.4 Calibración del modelo hidráulico

Consiste en establecer el valor del coeficiente de rugosidad de Manning, el cual facilite obtener un nivel en la sección de aforo. Por tal motivo se calcula primero la pendiente del cauce en el tramo de estudio y se corre el software en régimen subcrítico.

a) Calculo de la pendiente topográfica del río La Leche

$$S = \frac{\text{Cota máxima} - \text{Cota Mínima}}{\text{Longitud del río objeto de estudio}}$$

$$S = \frac{57.330 - 42.940}{100666.59}$$

$$S = 0.0014$$

b) Determinación del Coeficiente de Manning

Para el cálculo el perfil hidráulico del río, una de las mayores dificultades reside en determinar los coeficientes de rugosidad (n) el cual significa calcular la resistencia al escurrimiento en el cauce del río. Luego de analizar la tabla 18 del investigador W. L. Cowan se obtuvo los valores del coeficiente de Manning y se aprecia en la tabla 35.

Tabla 34: Coeficiente de Manning para canal principal y llanuras de inundación

Coeficiente de Manning		
Margen Derecha	Canal principal	Margen Izquierda
0.04	0.054	0.04

Fuente: Elaboración propia

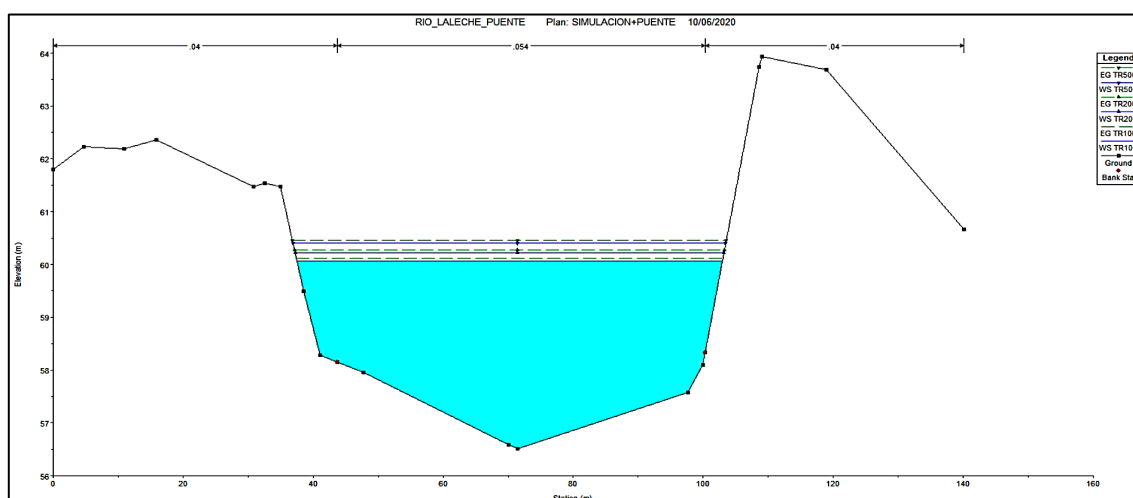
Los coeficientes de contracción y expansión en las secciones transversales según el software HEC-RAS:

Tabla 35: Coeficiente de Contracción y Expansión del HEC-RAS.

Descripción de la transición	Contracción	Expansión
Sin pérdidas por transición	0.00	0.00
Transiciones graduales	0.10	0.30
Secciones típicas de puentes	0.30	0.50
Transiciones abruptas	0.60	0.80

Fuente: Máximo Villón Béjar HEC-RAS.

Imagen 18: Calibración de la rugosidad para el modelo hidráulico



Fuente: Elaboración propia

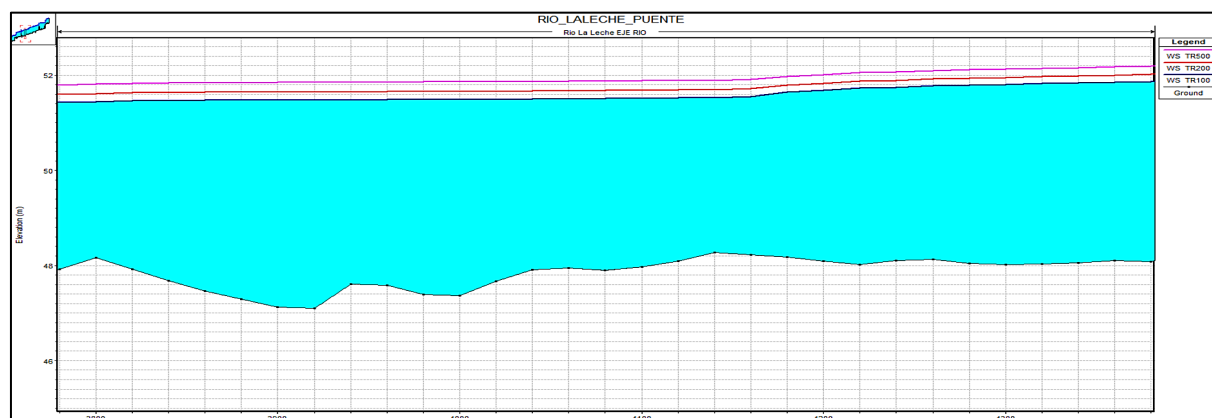
4.4.5 Resultados de la modelación hidráulica

Los resultados que obtenemos luego de la simulación hidráulica nos permite conocer diversos parámetros hidráulicos que son necesarios para diseñar cualquier estructura a lo largo del río La Leche y se muestran a continuación:

- Perfil del flujo

En la imagen 19 se muestra el perfil del flujo para los caudales con periodos de retorno diferentes de 100, 200 y 500 años, esos resultados indican que el promedio de la altura de la lámina de agua tendrán una altura de 4.14 m, 4.27 m y 4.40 respectivamente.

Imagen 19: Perfil de flujo del río La Leche en la zona de estudio

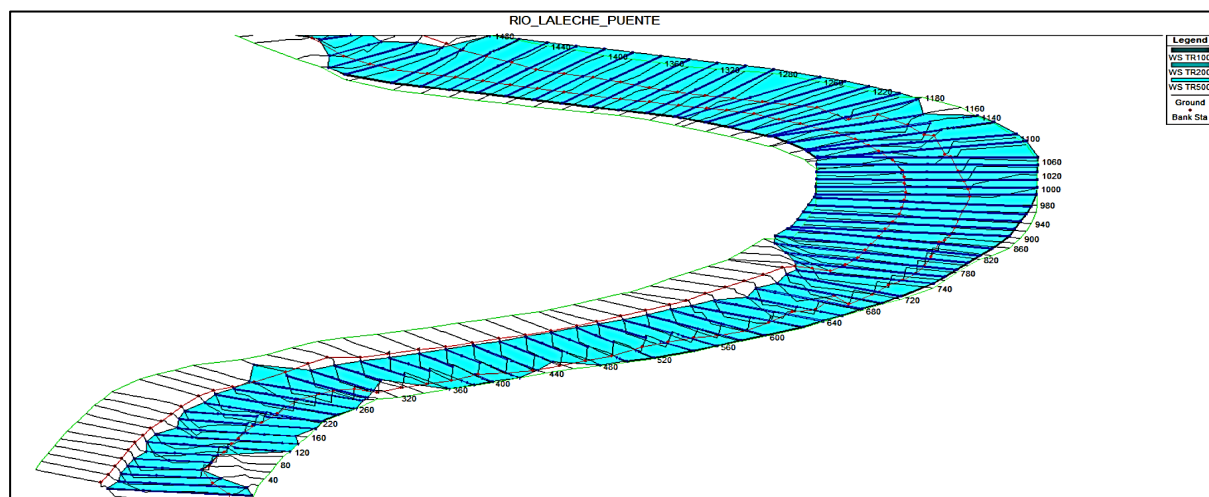


Fuente: Elaboración propia

- Llanura de inundación

En la imagen 20 se representa la llanura de inundación para crecientes de 100, 200 y 500 años.

Imagen 20: Imagen de la llanura de inundación del río La Leche



Fuente: Elaboración propia

Tabla 36: Términos de tablas de resultados

Reach	Nombre del río
River Sta	Estación del río
Profile	Perfil
Q Total	Caudal
Min Ch El	Cota mínima en el canal principal
W. S. Elev.	Cota de la lámina de agua
Crit W.S.	Cota de la lámina para el calado crítico
E.G. Elev	Elevación de la línea de energía
E.G. Slope	Pendiente de la línea de energía
Vel Chnl	Velocidad media en el canal principal
Flow Area	Área de flujo activo de toda la sección
Top Width	Ancho de la sección sin incluir áreas no efectivas
Froude #Chl	Número de Froude para el canal principal

Fuente: Elaboración propia

4.4.6 Análisis del flujo con HEC-RAS

Para realizar la simulación se ha considerado un tramo del río La Leche que consta de 10+066.59 km, la simulación se ejecutó con los caudales máximos instantáneos considerándose periodos de retorno de 100, 200, 500 años y con los datos de las secciones transversales cuyos resultados se muestran en los **anexos 2, 3 y 4**.

4.4.7 Secciones obtenidas de la simulación Hidráulica

En las secciones obtenidas en la simulación se aprecian desbordamientos en ambas márgenes del río La Leche según el modelamiento con los caudales máximos de simulación en el HEC-RAS, estas secciones se muestran en el **anexo 5**.

4.4.8 Identificación de zonas críticas y propuestas como alternativas de solución

Luego de identificar las zonas críticas se procede a proponer obras longitudinales (Muros de encauzamiento y defensas ribereñas) que servirán para proteger las orillas ante inundaciones y erosiones, recuperara terrenos ribereños, etc. Las propuestas se muestran en la tabla 37:

Sabiendo que:

ER: Espigones con roca

AM: Arrimar material

R: Enrocado

D: Diques

C: Colchones

G: Gaviones

Tabla 37: Tipo de protección para las zonas críticas

ANCHO B	TRAMO		LONGITUD (m)	TIPO DE PROTECCIÓN	
				M. DERECHA	M. IZQUIERDA
93 m	0 + 000	0 + 020	20	AM	
73 m	0 + 120	0 + 140	20	AM	
	0 + 280	0 + 300	20	AM	
51 m	0 + 660	0 + 680	20	AM	
	0 + 700	0 + 720	20	AM	
	0 + 720	0 + 740	20	AM	
	0 + 740	0 + 760	20	AM	
	0 + 760	0 + 780	20	AM	
94 m	0 + 780	0 + 800	20	AM	
	0 + 800	0 + 820	20	G	AM
	0 + 820	0 + 840	20	G	C - G
	0 + 840	0 + 860	20	C - G	D
	0 + 860	0 + 880	20	D	D
	0 + 880	0 + 900	20	D	D
	0 + 900	0 + 920	20	D	C - G
	0 + 920	0 + 940	20	D	C - G
	0 + 940	0 + 960	20	D	C - G
	0 + 960	0 + 980	20	D	C - G
	0 + 980	1 + 000	20	C - G	D
46 m	1 + 000	1 + 020	20	AM	C - G
	1 + 020	1 + 040	20	AM	G
	1 + 040	1 + 060	20	AM	G
	1 + 060	1 + 080	20	AM	G
	1 + 080	1 + 100	20	AM	G
	1 + 100	1 + 120	20		G
	1 + 120	1 + 140	20		G
	1 + 140	1 + 160	20		G
	1 + 160	1 + 180	20		C - G
	1 + 180	1 + 200	20	G	C - G
	1 + 200	1 + 220	20	E-G	D
	1 + 220	1 + 240	20	E-G	D
	1 + 240	1 + 260	20	E-G	D
	1 + 260	1 + 280	20	E-G	D
	1 + 280	1 + 300	20	E-G	D
	1 + 300	1 + 320	20	D	C - G
	1 + 320	1 + 340	20	D	C - G
	1 + 340	1 + 360	20	C - G	C - G
	1 + 360	1 + 380	20	D	D
	1 + 380	1 + 400	20	D	D
1 + 400	1 + 420	20	C - G	D	
1 + 420	1 + 440	20	G	D	
1 + 440	1 + 460	20		D	

	1 + 460	1 + 480	20		D
82 m	1 + 480	1 + 500	20		G
	1 + 580	1 + 600	20		AM - R
	1 + 600	1 + 620	20		AM - R
	1 + 620	1 + 640	20		AM - R
	1 + 640	1 + 660	20		AM - R
	1 + 660	1 + 680	20		AM - R
	1 + 680	1 + 700	20		AM - R
	90 m	1 + 700	1 + 720	20	AM
1 + 720		1 + 740	20		G
1 + 740		1 + 760	20		C - G
1 + 760		1 + 780	20		C - G
1 + 780		1 + 800	20		C - G
1 + 800		1 + 820	20		C - G
1 + 820		1 + 840	20		C - G
1 + 840		1 + 860	20		C - G
1 + 860		1 + 880	20		G
1 + 880		1 + 900	20		G
82 m	1 + 900	1 + 920	20		G
	1 + 960	1 + 980	20		AM
	1 + 980	2 + 000	20		AM
	2 + 000	2 + 020	20		AM
	2 + 020	2 + 040	20		AM
	2 + 040	2 + 060	20		AM
	2 + 060	2 + 080	20		AM
	2 + 080	2 + 100	20		AM
	2 + 100	2 + 120	20		AM
	2 + 120	2 + 140	20		AM
	2 + 140	2 + 160	20		AM
	2 + 160	2 + 180	20		AM
	2 + 180	2 + 200	20		AM
	2 + 200	2 + 220	20		AM
	2 + 220	2 + 240	20		AM
	2 + 240	2 + 260	20		AM
	2 + 260	2 + 280	20		AM
	2 + 280	2 + 300	20		AM
2 + 300	2 + 320	20		AM	
2 + 420	2 + 440	20	AM		
67 m	3 + 500	3 + 520	20	AM	
	3 + 540	3 + 560	20	AM	
	3 + 760	3 + 780	20	C - G	
	3 + 780	3 + 800	20	C - G	
	3 + 800	3 + 820	20	C - G	
	3 + 820	3 + 840	20	C - G	
	3 + 840	3 + 860	20	C - G	
	3 + 860	3 + 880	20	C - G	

	3 + 880	3 + 900	20	C - G	
	3 + 900	3 + 920	20	C - G	
	3 + 920	3 + 940	20	C - G	
	3 + 940	3 + 960	20	G	
	3 + 960	3 + 980	20	G	
110 m	3 + 980	4 + 000	20	AM	
	4 + 000	4 + 020	20	AM	
	4 + 020	4 + 040	20	AM	
	4 + 040	4 + 060	20	AM	
	4 + 060	4 + 080	20	AM	
77 m	4 + 080	4 + 100	20	AM	
	4 + 100	4 + 120	20	AM	
	4 + 120	4 + 140	20	AM	
	4 + 140	4 + 160	20	AM	
	4 + 160	4 + 180	20	AM	
37 m	4 + 180	4 + 200	20	AM	
	4 + 200	4 + 220	20	AM	R
	4 + 220	4 + 240	20	AM	R
	4 + 240	4 + 260	20	AM	
	4 + 260	4 + 280	20	AM	
	4 + 280	4 + 300	20	AM	
	4 + 300	4 + 320	20	AM	
	4 + 320	4 + 340	20	AM	
	4 + 340	4 + 360	20	AM	
	4 + 360	4 + 380	20	AM	
	4 + 380	4 + 400	20	AM	
	4 + 400	4 + 420	20	AM	
	4 + 420	4 + 440	20	AM	
4 + 440	4 + 460	20	AM		
32 m	4 + 480	4 + 500	20	AM	
	4 + 520	4 + 540	20	AM	
	4 + 540	4 + 560	20	AM	
	4 + 920	4 + 940	20	AM	
	4 + 940	4 + 960	20	AM	
	4 + 960	4 + 980	20	AM	
38 m	4 + 980	5 + 000	20	G	AM
	5 + 000	5 + 020	20	G	AM
	5 + 020	5 + 040	20	G	AM
	5 + 040	5 + 060	20	G	AM
	5 + 060	5 + 080	20	G	AM
	5 + 080	5 + 100	20	G	AM
	5 + 100	5 + 120	20	AM	
	5 + 120	5 + 140	20	G	
	5 + 140	5 + 160	20	G	
	5 + 160	5 + 180	20	G	
	5 + 180	5 + 200	20	G	

	5 + 200	5 + 220	20	G	
	5 + 220	5 + 240	20	G	
	5 + 240	5 + 260	20	G	
	5 + 260	5 + 280	20	G	
	5 + 280	5 + 300	20	G	
	5 + 300	5 + 320	20	G	
	5 + 320	5 + 340	20	G	
	5 + 340	5 + 360	20	G	
	5 + 360	5 + 380	20	G	
	5 + 380	5 + 400	20	G	AM
	5 + 400	5 + 420	20	G	AM
	5 + 420	5 + 440	20	G	AM
	5 + 440	5 + 460	20	G	AM
	5 + 460	5 + 480	20	G	AM
	5 + 480	5 + 500	20	G	AM
	5 + 500	5 + 520	20	G	AM
	5 + 520	5 + 540	20	AM	AM
	5 + 540	5 + 560	20		G
	5 + 560	5 + 580	20		G
	5 + 580	5 + 600	20		G
	5 + 600	5 + 620	20		G
	5 + 620	5 + 640	20		G
	5 + 640	5 + 660	20		G
	5 + 660	5 + 680	20		G
	5 + 680	5 + 700	20		G
	5 + 700	5 + 720	20		G
	5 + 720	5 + 740	20		G
	5 + 740	5 + 760	20		G
	5 + 960	5 + 980	20	AM	
	5 + 980	6 + 000	20	E	
46 m	6 + 000	6 + 020	20	E	
	6 + 020	6 + 040	20	E	
	6 + 040	6 + 060	20	E	
	6 + 060	6 + 080	20	E	
	6 + 080	6 + 100	20	E	
	6 + 100	6 + 120	20	E	
	6 + 120	6 + 140	20	E	
	6 + 200	6 + 220	20	AM	
	6 + 220	6 + 240	20	AM	
	6 + 240	6 + 260	20	AM	
	6 + 260	6 + 280	20	AM	
	6 + 280	6 + 300	20	AM	
6 + 300	6 + 320	20	AM		
62 m	6 + 700	6 + 720	20	AM	E
	6 + 720	6 + 740	20	AM - E	
	6 + 740	6 + 760	20	AM - E	

	6 + 760	6 + 780	20	AM - E	
	6 + 780	6 + 800	20	AM - E	
	6 + 800	6 + 820	20	AM - E	
	6 + 820	6 + 840	20	AM - E	
	6 + 840	6 + 860	20	AM - E	
	6 + 860	6 + 880	20	AM - E	
	6 + 880	6 + 900	20	AM - E	
	6 + 900	6 + 920	20	AM - E	
	6 + 920	6 + 940	20	AM - E	
	6 + 940	6 + 960	20	AM - E	
	6 + 960	6 + 980	20	AM - E	
53 m	6 + 980	7 + 000	20	AM - E	
	7 + 000	7 + 020	20	AM - E	
	7 + 020	7 + 040	20	AM - E	
	7 + 040	7 + 060	20	AM - E	
	7 + 060	7 + 080	20	AM - E	
	7 + 080	7 + 100	20	AM	
	7 + 160	7 + 180	20	AM	
	7 + 180	7 + 200	20	AM	
	7 + 200	7 + 220	20	AM	
	7 + 220	7 + 240	20	AM	
	7 + 240	7 + 260	20	AM	
	7 + 260	7 + 280	20	AM	
	7 + 280	7 + 300	20	AM	
	7 + 300	7 + 320	20	AM	
	7 + 320	7 + 340	20	AM	
7 + 340	7 + 360	20	AM		
7 + 360	7 + 380	20	AM		
70 m	7 + 520	7 + 540	20		AM
	7 + 560	7 + 580	20	AM	
	7 + 580	7 + 600	20	AM	
	7 + 600	7 + 620	20	AM	
61 m	7 + 620	7 + 640	20	AM	
	7 + 640	7 + 660	20	AM	
	7 + 660	7 + 680	20	AM	
	7 + 680	7 + 700	20	AM	
	7 + 700	7 + 720	20	AM - E	
56 m	7 + 720	7 + 740	20	AM - E	
	7 + 740	7 + 760	20	AM - E	
	7 + 760	7 + 780	20	AM - E	
	7 + 780	7 + 800	20	AM - E	
	7 + 800	7 + 820	20	AM - E	
	7 + 820	7 + 840	20	AM - E	
	7 + 840	7 + 860	20	AM	
	7 + 860	7 + 880	20	G	
68 m	7 + 880	7 + 900	20	G	

	7 + 900	7 + 920	20	G	
80 m	7 + 920	7 + 940	20	G	
	7 + 940	7 + 960	20	G	G
	7 + 960	7 + 980	20	G	G - C
	7 + 980	8 + 000	20	G	G - C
	8 + 000	8 + 020	20	G	D
	8 + 020	8 + 040	20	G	D
	8 + 040	8 + 060	20		D
	8 + 060	8 + 080	20	AM	D
	8 + 080	8 + 100	20		AM
	8 + 120	8 + 140	20		AM
	8 + 140	8 + 160	20		AM
	8 + 160	8 + 180	20		AM
	8 + 180	8 + 200	20		AM
	8 + 200	8 + 220	20	AM	AM
90 m	8 + 220	8 + 240	20	G	G
	8 + 240	8 + 260	20	G	G
	8 + 260	8 + 280	20	G	G
	8 + 280	8 + 300	20	G	G
	8 + 300	8 + 320	20	G	G
	8 + 320	8 + 340	20	G	G
	8 + 340	8 + 360	20	G	G
	8 + 360	8 + 380	20	G	G
	8 + 380	8 + 400	20	G	G
	8 + 400	8 + 420	20	G	G
	8 + 420	8 + 440	20	G	G
	8 + 440	8 + 460	20	G	G
	8 + 460	8 + 480	20	G	G
	8 + 480	8 + 500	20	G	G
8 + 500	8 + 520	20	G	G	
84 m	8 + 520	8 + 540	20	AM	G
	8 + 540	8 + 560	20	AM	G
	8 + 560	8 + 580	20	AM	G
	8 + 580	8 + 600	20	AM	G
	8 + 600	8 + 620	20	AM	G
	8 + 620	8 + 640	20	AM	G
	8 + 640	8 + 660	20	AM	G
	8 + 660	8 + 680	20	AM	G
	8 + 680	8 + 700	20	AM	AM
	8 + 700	8 + 720	20	AM	
	8 + 720	8 + 740	20	AM	
	8 + 740	8 + 760	20	AM	
	8 + 760	8 + 780	20	AM	
	8 + 780	8 + 800	20	AM	
8 + 800	8 + 820	20	AM		
8 + 820	8 + 840	20	AM	AM	

	8 + 840	8 + 860	20	G	G
80 m	8 + 860	8 + 880	20	G	G
	8 + 880	8 + 900	20	G	G
	8 + 900	8 + 920	20	G	G
	8 + 920	8 + 940	20	AM	G
	8 + 960	8 + 980	20	AM	AM
	8 + 980	9 + 000	20		AM
61 m	9 + 320	9 + 340	20	AM	
	9 + 340	9 + 360	20	AM	
	9 + 360	9 + 380	20	AM	
	9 + 900	9 + 920	20	AM	
	9 + 920	9 + 940	20	AM	
89 m	10 + 020	10 + 040	20	AM	
	10 + 040	10 + 060	20	AM	
	10 + 060	10 + 066.59	20	AM	

Fuente: Elaboración propia

4.4.9 Conclusiones del estudio hidráulico

La propuesta de los diferentes tipos de protección para las zonas críticas se debe a que son más económicas, necesarias, común y utilizable en dicha zona.

Los diques, enrocados, arrimado de material, gaviones, etc. Se detallan en la tabla 37 abarcando todo el tramo objeto de estudio.

Se propone colchón de gaviones para el río debido a que es afectado circunstancialmente por actividades realizadas por el hombre.

4.4.10 Caudal durante el fenómeno del niño

Se asume el caudal durante el fenómeno del niño de 450 m³/seg, es el equivalente al caudal registrado en las avenidas máximas del río La Leche, el mismo que quedó registrado y evaluado según las trazas dejadas en la escala que se encuentra ubicada en el puente sobre el río La Leche, y que aún se pueden apreciar hasta la fecha, y no se tiene en consideración la gran capa de colmatación que existe en la zona.

4.4.11 Mapas de inundación

Para la elaboración de los mapas de inundación se utilizó el programa google Earth para mostrar el área afectada, el HEC-RAS para la modelación de los diferentes caudales para cada

periodo de retorno y se usó el ArcGIS para la simulación de los caudales, los cuales se muestran en el anexo 8.2.

4.4.12 Predimensionamiento y alternativas de estructuras de encauzamiento

- DISEÑO HIDRAÚLICO DEL DIQUE

a. Cálculo del ancho estable (B)

Se utiliza el método Blench – Altunin que está representado por la siguiente formula:

$$B = 1.81 \left(Q * \frac{Fb}{Fs} \right)^{0.5}$$

Donde:

Q (m³/s) = caudal de diseño

Fb = Factor de fondo de cauce del rio

Fs = Factor de orilla de cauce del rio

Tabla 38: Valores de factor de fondo y orilla de un cauce

Factor de Fondo	Fb
Materia Fino	0.80
Material Grueso	1.20
Factor de Orilla	Fs
Materiales sueltos (Barro y Arena)	0.10
Materiales ligeramente cohesivos (barro arc. Fang.)	0.20
Materiales cohesivos	0.30

Fuente: Blench

Se dimensionará con el caudal que se obtuvo durante el fenómeno del niño ya que es el más extremo:

$$Q = 450 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Fb = 0.80$$

$$Fs = 0.10$$

$$B = 1.81 \left(450 \text{ m}^3/\text{s} * \frac{0.80}{0.10} \right)^{0.5}$$

$$B = 108.6 \text{ m}$$

b. Cálculo del tirante hidráulico (Y) y velocidad (Vm)

Para el cálculo del tirante se utiliza el método Manning – Strickler que está representado por la siguiente formula:

$$Y = \left(\frac{Q(m^3/s)}{K_s * B * S^{0.5}} \right)^{3/5}$$

Donde:

Q (m³/s) = caudal de diseño

Y = Tirante hidráulico (m)

Ks = Coeficiente de rugosidad

B = Ancho estable del rio (m)

S = Pendiente del tramo (m/m)

Tabla 39: Coeficientes de rugosidad para cauces naturales

Valores de Ks para cauces naturales	Ks
Cauce con fondo solido sin irregularidades	40
Cauces de rio con acarreo irregular	33-35
Cauces de ríos con vegetación	30-35
Cauces naturales con derrubio e irregularidades	30
Cauces de rio con fuerte transporte de acarreo	28
Torrentes con piedras de tamaño de una cabeza	25-28
Torrente con derrubio grueso y acarreo móvil	19-22

Fuente: Blench

$$Q = 450 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K_s = 33$$

$$F_s = 0.10$$

$$B = 108.6 \text{ m}$$

$$S = 0.0014$$

$$Y = \left(\frac{450(m^3/s)}{33 * 108.6 \text{ m} * 0.0014^{0.5}} \right)^{3/5}$$

$$Y = 2.10 \text{ m}$$

Para el cálculo de la velocidad se utiliza el método Manning – Strickler que está representado por la siguiente formula:

$$Vm = Ks * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

Z = Talud excesivo

Ks = Coeficiente de rugosidad (Inversa de Manning)

Y = Tirante Hidráulico Máximo (m)

T = Espejo del rio (m)

P = Perímetro mojado (m)

A = Área (m²)

R = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente del tramo (Manning)

B = Ancho estable del rio (m)

Vm = Velocidad media (m/s)

$$T = B + 2 * ZY$$

$$T = 108.6 \text{ m} + 2 * 2 * 2.10 \text{ m}$$

$$T = 117 \text{ m}$$

$$A = \frac{(B + T)}{2} * Y$$

$$A = \frac{(108.6 \text{ m} + 117 \text{ m})}{2} * 2.10 \text{ m}$$

$$A = 236.88 \text{ m}^2$$

$$P = B + 2\sqrt{Z^2 + Y^2}$$

$$P = 108.6 \text{ m} + 2\sqrt{2^2 + 2.10^2}$$

$$P = 114.04 \text{ m}$$

$$R = A/P$$

$$R = 236.88/114.04$$

$$R = 2.08 \text{ m}$$

Reemplazando en la fórmula se obtiene lo siguiente:

$$Vm = 33 * 2.08^{\frac{2}{3}} * 0.0014^{\frac{1}{2}}$$

$$Vm = 2.01 \text{ m/s}$$

c. Determinar el régimen de flujo del río

Para determinar el régimen de flujo se aplica la fórmula para determinar el número de Froude:

$$F = \frac{V}{\left(g * \frac{A}{T}\right)^{0.5}}$$

Donde:

V = Velocidad (m/s)

g = Aceleración de la gravedad

A = Área hidráulica (m)

T = Ancho del cauce (m)

F = Numero de Froude

$$F = \frac{2.01 \text{ m/s}}{\left(9.81 * \frac{236.88 \text{ m}^2}{117 \text{ m}}\right)^{0.5}}$$

$$F = 0.45$$

Por lo tanto, el flujo es lento o Subcritico.

d. Determinación de la altura máxima de encauzamiento (Hm)

La altura máxima (Hm) y el borde libre (BL) se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

Altura máxima (Hm):

$$Hm = BL + Y$$

Borde libre (BL):

$$BL = \emptyset + \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

Hm = Altura máxima

BL = Borde libre

Y = Tirante hidráulico

Tabla 40: Recomendaciones del borde libre

Descarga de diseño (m ³ /s)	Borde libre (m)
Menos de 200	0.6
200 - 500	0.8
500 - 2000	1.08

Fuente: (Campaña Toro, 2004). Diseño de defensas ribereñas.

De acuerdo a nuestro caudal de diseño asumimos el borde libre de 0.8 m.

Luego:

$$Hm = 0.8 \text{ m} + 2.10 \text{ m}$$

$$Hm = 2.90 \text{ m}$$

Por lo tanto, asumimos que Hm = 3 m.

Pendiente:

- Cara húmeda H = 2 y V = 1.00

- Cara seca $H = 3$ y $V = 4$

e. Determinar el ancho de la corona (A_c)

Se estima dependiendo del caudal de diseño y se hace uso de la siguiente tabla:

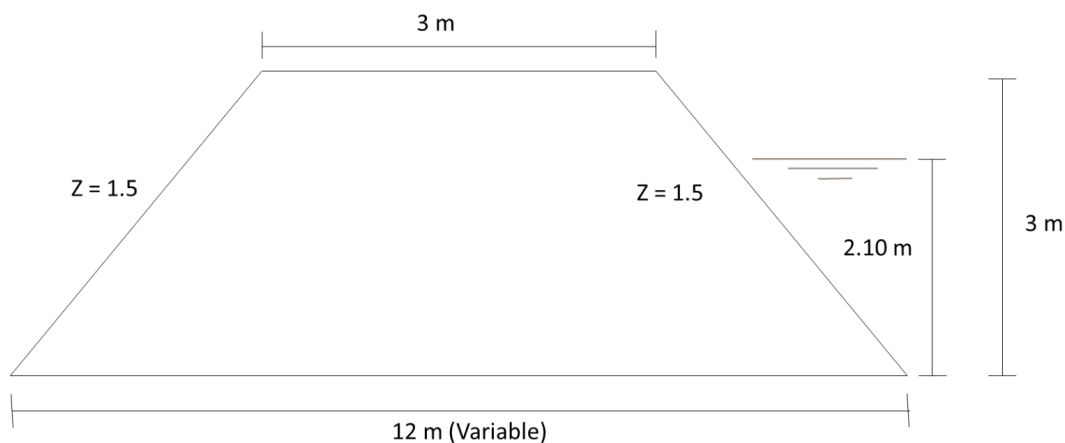
Tabla 41: Ancho de corona en función del caudal de diseño

Descarga de diseño (m^3/s)	Ancho de corona (m)
Menos de 500	3
500 - 2000	4

Fuente: (Campaña Toro, 2004). Diseño de defensas ribereñas.

Dado que el caudal de diseño es $450 m^3/s$ se estima y asume el ancho de la corona de 3.0 metros.

Gráfica del dimensionamiento del dique



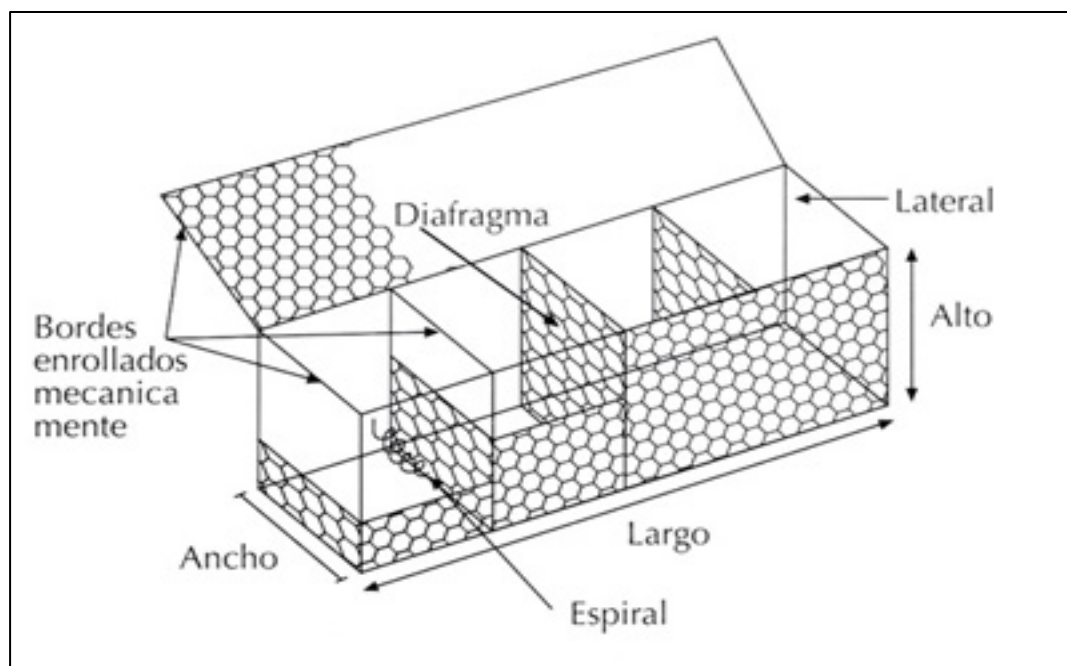
- DISEÑO DE GAVIONES

a. Gaviones tipo caja

Son prismas rectangulares constituidos por mallas que forman una base con paredes de manera vertical y una tapa, que en algunas ocasiones se puede formar por separado y se denominan de tipo caja debido a que la altura de una unidad es desde 1.0 m, cada unidad de gavión debe estar dividido por diafragmas, formando celdas y su largo no debe ser mayor a una vez y medio el ancho de la unidad de gavión, la separación llega

a ser de 1 m. Para reforzar la ribera del río la leche se recomienda utilizar gaviones de 2.0 m x 1.0 m x 1.0 m.

Imagen 21: Gaviones tipo caja



Fuente: Parque y Grama.

Tabla 42: Dimensiones comerciales del gavión tipo caja

Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Nº Diafragmas	Volumen (m ³)
1.5	1.0	1.0	-	1.5
2.0	1.0	0.5	1	1.0
2.0	1.0	1.0	-	2.0
2.0	1.0	1.0	1	2.0
3.0	1.0	0.5	2	1.5
3.0	1.0	1.0	2	3.0
4.0	1.0	0.5	3	2.0
4.0	1.0	1.0	3	4.0
4.0	1.5	1.0	3	6.0
5.0	1.0	0.5	4	2.5
5.0	1.0	1.0	4	5.0
5.0	1.5	1.0	4	7.5

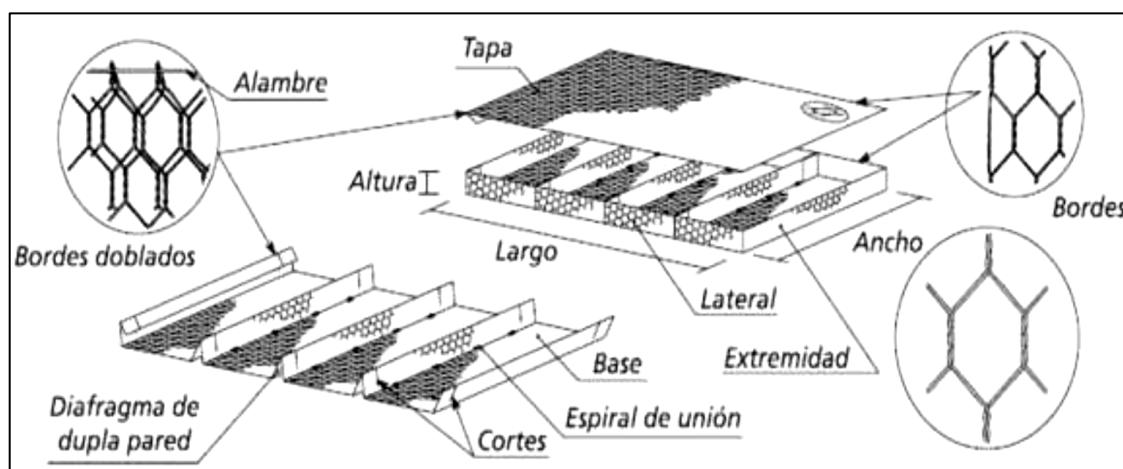
6.0	2.0	0.5	5	6.0
-----	-----	-----	---	-----

Fuente: IGC (Innovación en Geosintéticos y Construcción).

b. Gaviones tipo colchón

Este tipo de gaviones están conformados de igual manera que los gaviones tipo caja con la única diferencia es que las paredes verticales tienen menor tamaño entre 0.20-0.50 m.

Imagen 22: Gaviones tipo colchón



Fuente: Manual técnico de obras de contención. Maccaferri.

Tabla 43: Dimensiones comerciales del gavión tipo colchón

Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Nº Diafragmas	Volumen (m ³)
5	2.0	0.20	4	1.5
5	2.0	0.30	4	1.0
5	2.0	0.50	4	2.0
6	2.0	0.50	5	2.0

Fuente: IGC (Innovación en Geosintéticos y Construcción).

La tolerancia en las dimensiones de los gaviones tanto en el ancho, largo y alto será de +- 3% para gaviones de tipo caja y tipo colchón. El uso de los gaviones es más trabajable ya que usan una menor calidad, tamaño y densidad de roca con respecto al enrocado.

4.5 Discusiones

Los resultados obtenidos en el análisis del presente proyecto son los siguientes:

- Topografía

El Levantamiento Topográfico se realizó para la obtención de secciones transversales respecto al eje del cauce del río La Leche, se ha desarrollado desde 300 metros aguas arriba de la compuerta San Isidro, y hasta 250 metros aguas abajo de la compuerta La Cruz, definiéndose en consecuencia el eje del cauce y de acuerdo a su ancho estable requerido se logró identificar las zonas más afectadas y vulnerables. Las secciones transversales servirán para las tareas de movimiento de tierra, diseño y construcción de las defensas ribereñas en cualquier proyecto relacionado al río. Se hizo uso de un BM que se encuentra cerca de la compuerta San Isidro y cuya cota es de 46.0 m.s.n.m., con el que se ha tendido una red de BMs. Para el procesamiento digital se utilizó el programa Civil 3D obteniendo los planos de planta georreferenciados.

- Hidrología

El sistema hidrográfico de la región de Lambayeque está conformado por ríos de caídas cuya desembocadura se da en el océano pacífico. se conoce que los ríos de la vertiente del pacífico tienen una descarga irregular a lo largo de los años

Ante la presencia del fenómeno “El Niño”, los ríos Chancay, La Leche, Motupe, Saña, Reque incrementan su flujo, acarreando gran cantidad de agua el cual origina inundaciones. En la región Lambayeque contamos con 13 estaciones meteorológicas, todas estas pertenecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (SENAMHI) donde se registra la información de las precipitaciones.

V. CONCLUSIONES

1. De acuerdo a las exigencias del proyecto se concluye que la longitud total a intervenir es de 10 + 066.59 km
2. De la situación actual del cauce del rio se concluye que la zona de estudio esta colmatado a su ancho de vegetación arbórea y colmatado de sedimentos.
3. Los parámetros geomorfológicos que se han obtenido para la cuenca del rio La Leche, siendo la principal caracterización la delimitación que se realizó a partir de la MED proporcionado por el satélite de la NASA, obteniéndose un área de cuenca de 1569.78 km² y por eso se clasifica como cuenca grande.
4. Para el desarrollo del modelamiento hidrológico se ingresó los parámetros hidrológicos al HIDROESTA del cual se obtuvo flujos inestables de diseño para los siguientes periodos, para un periodo de retorno de 100 años se encuentran a 162.44 m³/s, para un periodo de retorno de 200 años se encuentran a 179.68 m³/s y para un periodo de retorno de 500 años se encuentran a 201.70 m³/s,
5. Del análisis de las zonas aledañas del proyecto se concluye que existe vulnerabilidad de los centros poblados y restos arqueológicos cercanos a la ribera del rio obteniéndose 5175 hectáreas afectadas, por tal motivo se presentan las alternativas que serviría para evitar inundaciones y daños producto de su máxima avenida.
6. De las propuestas de alternativas se concluye con la selección del tipo de defensa ribereña que son Gaviones, enrocado, arrimar material, colchón de gaviones, diques, espigones.
7. El estado actual del rio es sinuoso y gran parte de su ancho esta colmatado por vegetación y sedimentos, por lo que es necesario la limpieza, encauzar y colocar defensas ribereñas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Para el análisis hidrológico de una cuenca se recomienda hacer un levantamiento altimétrico y batimétrico del campo de estudio.
2. Implementar las estaciones de medición cercanas al río La Leche y realizar un mantenimiento continuo para obtener mejores datos para un mejor uso en modelos de predicción.
3. Se recomienda utilizar las imágenes de la mayor resolución proporcionados por el MED para la realizar la batimetría del río La Leche.
4. Incentivar y capacitar a la población adyacente con la finalidad que eviten utilizar terrenos agrícolas y de crianza de ganado que están propensas en, máximas avenidas.
5. Priorizar el encauzamiento del río con la construcción de defensas ribereñas cercanas a los centros poblados los cuales son más propensos a sufrir inundaciones en máximas avenidas.
6. Capacitar a la población para que eviten hacer uso de las zonas agrícolas adyacentes al río con fines agrícolas o ganaderas.
7. Ejecutar labores de reforestación en las partes cercanas a los márgenes del río que no cuentan con vegetación para dar una mayor protección a las obras de defensas ribereñas que se realicen.

VII. REFERENCIAS

- [1] L. REPÚBLICA, «Peligro de desborde en río La Leche por descolmatación deficiente,» p. 1, 23 Mayo 2018.
- [2] INEI, «Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas,» INEI, 2017.
- [3] R. M. Rodas, «Lluvias también causan desborde del río Motupe en Jayanca,» pp. 1-2, 14 Marzo 2017.
- [4] INDECI, «INDECI».
- [5] G. P. Murga, «determinación de las áreas inundables en los sectores San Pablo y Niño Pobre, según caudales máximos estimados del río Utcubamba, aplicando modelo HEC-RAS y software ArcGIS,» Trujillo, 2017.
- [6] H. M. Grainger, «Modelación hidráulica e hidrológica del río Guapiles para determinar la vulnerabilidad a inundaciones en un tramo comprendido entre los poblados Guapiles y la Rita,» Costa Rica, 2006.
- [7] J. A. S. O. R. F. Bach. QUISPE TORRES, «APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HEC RAS PARA EL CÁLCULO DEL PERFIL HIDRÁULICO DEL RÍO RAMIS,» Juliaca, 2015.
- [8] Congreso de la República, «LEY DE RECURSOS HÍDRICOS,» 27 Marzo 2019.
- [9] J. Marquez, Universo Marino, Australia, 2017.
- [10] Universidad de Buenos Aires, «El agua: un recurso esencial,» *Química Viva*, vol. 11, n° 3, pp. 147-170, 2012.
- [11] M. G.-F. Dario, El medio ambiente en Colombia, Colombia, 2012.
- [12] A. G. A. I. D. G. M. R. F. P. L. y. E. R. P. Helena Cotler Ávalos, «Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión,» México, 2013.
- [13] M. v. Béjar, Hidrología, Lima: Villón, 2002.
- [14] A. V. V. -. A. M. M. -. J. F. M. -. R. T. A. -. I. V. R. -. J. D. R. -, «MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRAFICAS,» Ad Printing S.A.C., Lima, 2016.
- [15] L. E. Prim, «Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente,» España, 1998.
- [16] M. d. T. y. C. (MTC), Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, Lima, 2008.

- [17] A. R. Felices, HIDRAULICA DE TUBERIAS Y CANALES, Lima, 1997.
- [18] AZIMUT, «Aplicaciones del software Hec-ras,» HOME, Valencia, 2018.
- [19] C. D. Sergio, Metodología de la investigación científica : pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación, Lima: San Marcos, 2013.
- [20] Y. G. R. J. R. B. Orangel de Jesús Noriega, «Análisis de la vulnerabilidad y el riesgo a inundaciones en la cuenca,» *Prospect*, vol. 9, pp. 93-102, 2011.
- [21] D. Toycen, «Manual Manejo de Cuencas,» Vision Mundial, Canadá.
- [22] D. A. A. Garcia, TOPOGRAFIA Y SUS APLICACIONES, México: EBOOK, 2014.

VIII. ANEXOS, PLANOS Y MAPAS

8.1 ANEXOS

Anexo 1: Panel Fotográfico

En la fotografía se observa el tramo del río La Leche objeto de estudio



Fuente: Google Earth

Se observa el estado actual de la ribera del río con presencia de colmatación y vegetación en todo el tramo



Fuente: Galería propia

Estado actual del acceso del margen Izquierdo aguas arriba del rio la leche



Fuente: Galería propia

Tramo colmatado con vegetación y rivera con talud sin pendiente.



Fuente: Galería propia

Cauce del río colmatado a la altura del puente La Leche



Fuente: Galería propia

Estado de los terrenos agrícolas afectados por el desborde del río



Fuente: Galería propia

Zona de uso agrícola inundada



Fuente: Defensa Civil-Pacora 2017

Viviendas afectadas y colapsadas en las juntas



Fuente: Defensa Civil-Pacora 2017

Inundación de la autopista Panamericana Norte



Fuente: Defensa Civil-Pacora 2017

Levantamiento topográfico.



Fuente: Defensa Civil-Pacora 2017

Anexo 2: Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del río La Leche para un periodo de retorno de 100 años

Anexo 2
(Ver Archivo Adjunto)

Anexo 3: Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del río La Leche para un periodo de retorno de 200 años

Anexo 3
(Ver Archivo Adjunto)

Anexo 4: Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del río La Leche para un periodo de retorno de 500 años

Anexo 4
(Ver Archivo Adjunto)

Anexo 5: Tabla de cálculos y resultados de la modelación en HEC-RAS del río La Leche durante el fenómeno del niño

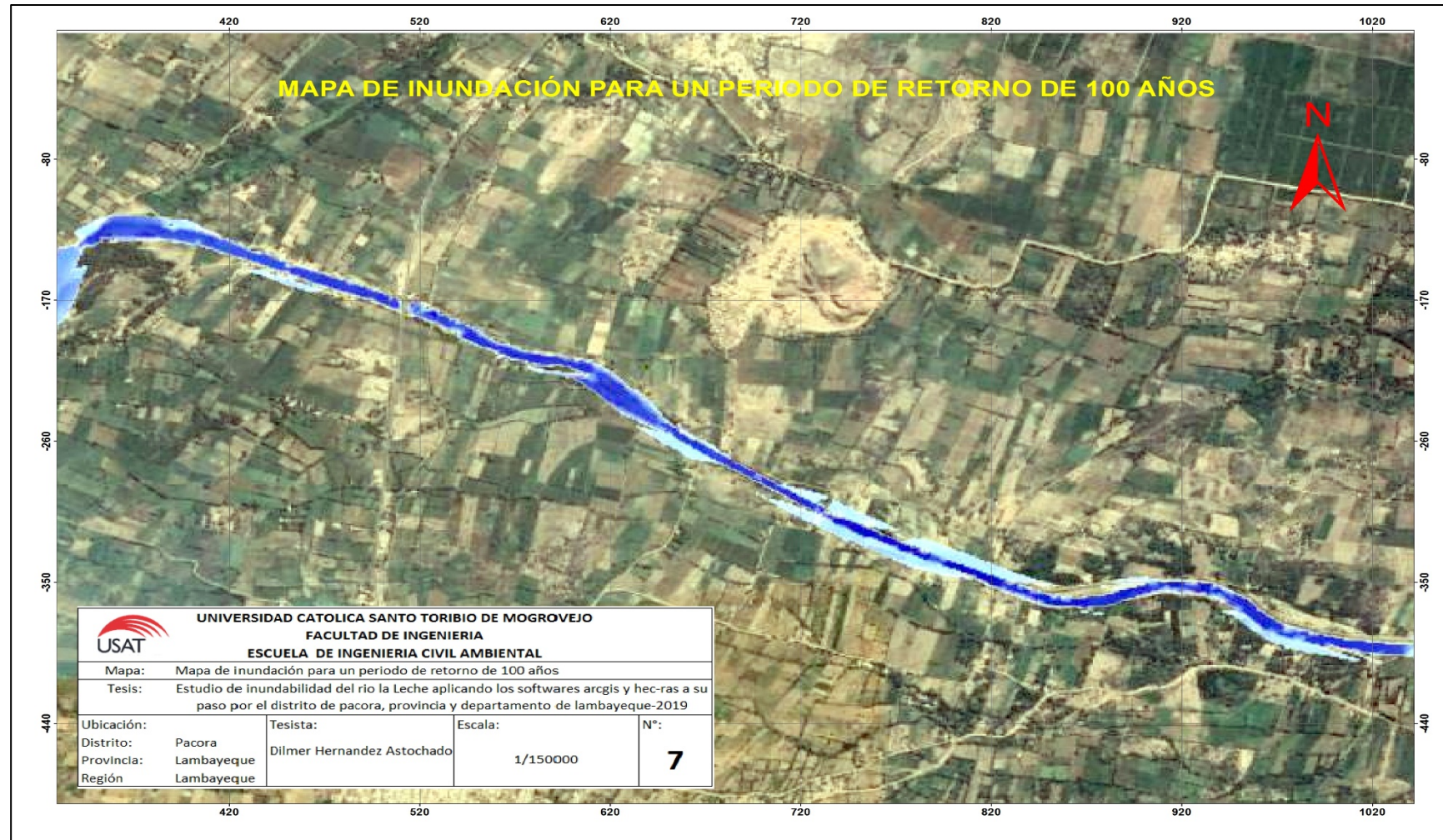
Anexo 5
(Ver Archivo Adjunto)

Anexo 6: Secciones de la simulación hidráulica (Hecras) para los periodos de retorno de 100, 200, 500 años y durante el fenómeno del niño

Anexo 6
(Ver Archivo Adjunto)

8.2 MAPAS

Mapa 7: Inundación para un periodo de retorno de 100 años



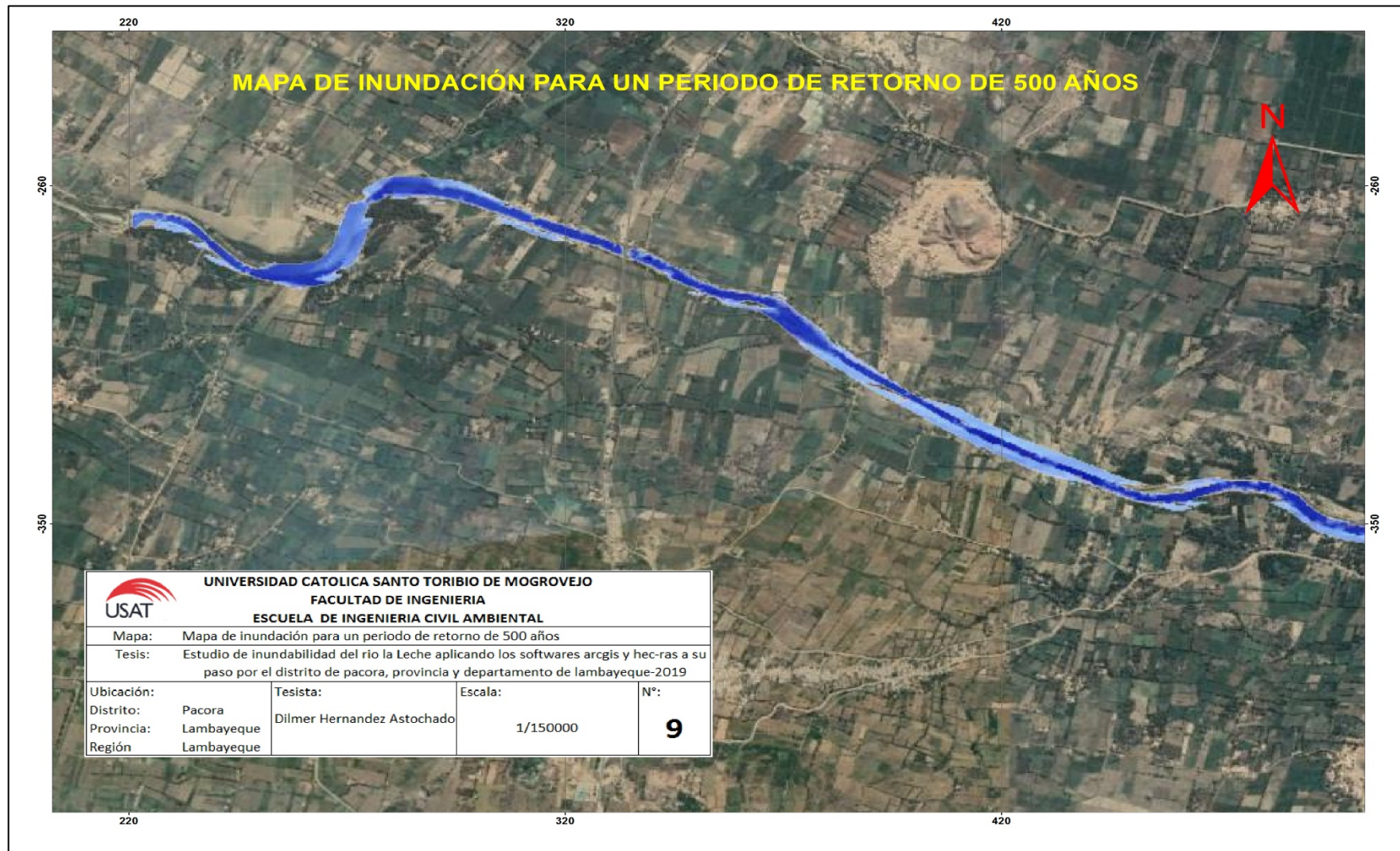
Fuente: Elaboración propia

Mapa 8: Inundación para un periodo de retorno de 200 años



Fuente: Elaboración propia

Mapa 9: Inundación para un periodo de retorno de 500 años



Fuente: Elaboración propia

Mapa 10: Inundación durante el fenómeno del niño



Fuente: Elaboración propia

8.3 PLANOS

- Plano de planta y perfil longitudinal

Plano PL 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10
(Ver Archivo Adjunto)

- Secciones transversales

Plano ST 1,2,3 y 4
(Ver Archivo Adjunto)