

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN EL
DISTRITO DE TARACO UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JORGE LUIS SOTO JULCA

Lima- Perú

2014

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
LISTA DE CUADROS.....	2
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	7
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPITULO I.- METODOLOGÍA PARA LA EVALUCIÓN DE RIESGOS DE INUNDACIÓN	10
1.1.- INTRODUCCIÓN.....	10
1.2.- CONCEPTOS PREVIOS.....	10
1.2.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	10
1.2.2. Modelo Digital de elevaciones (MDE).....	11
1.2.3. Software SIG: ArcGIS Desktop 10.....	13
1.2.4. Aplicaciones SIG: Modelos de peligro, vulnerabilidad y riesgo.....	13
1.3.- METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INUNDACIÓN.....	14
1.3.1. Fase de recolección y análisis de la información disponible.....	14
1.3.2. Fase de estudio hidrológico.....	15
1.3.3. Fase de la modelación hidráulica en el River 2D.....	17
1.3.4. Fase de evaluación de riesgos.....	20
CAPÍTULO II.- ENTORNO FÍSICO Y CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	24
2.1.- GENERALIDADES.....	24
2.2.- ENTORNO FÍSICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	24

2.2.1. Ubicación Geográfica y Política.....	24
2.2.2. Climatología.....	25
2.2.3. Topografía.....	26
2.2.4. Geología y Estratigrafía.....	28
2.2.5. Geomorfología.....	29
2.2.6. Geodinámica externa.....	30
2.3.- USO ACTUAL DE SUELOS.....	30
2.3.1. Zona de pastizal y cultivo de secano.....	30
2.3.2. Zona urbana.....	30
2.3.3. Zona rural.....	31
2.3.4. Tierra estéril.....	31
2.4.- CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS Y SOCIOECONÓMICAS.....	34
2.4.1. Actividades Económicas.....	34
2.4.2. Características Demográficas.....	36
2.4.3. Características de la viviendas.....	36
2.4.4. Servicios básicos de las viviendas.....	37
CAPITULO III.- ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.....	39
3.1.- INTRODUCCIÓN.....	39
3.2.- ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	39
3.2.1. Descripción de la cuenca del río Ramis.....	39
3.2.2. Análisis de máximas avenidas del río Ramis.....	41
3.3.- ESTUDIO HIDRÁULICO.....	44
3.3.1. Generalidades.....	44
3.3.2. Descripción del modelo hidráulico River 2D.....	46

3.3.3. Modelación numérica del River 2D.....	50
3.3.4. Modelamiento hidráulico del río Ramis con el River 2D.....	53
CAPITULO IV.- GESTIÓN DE RIESGOS.....	60
4.1.- INTRODUCCIÓN.....	60
4.2.- EVALUACIÓN DE RIESGO DE INUNDACIÓN.....	60
4.2.1. Riesgo de inundación.....	60
4.2.2. Análisis de peligro.....	61
4.2.3. Análisis de vulnerabilidad.....	63
4.2.4. Evaluación del riesgo.....	64
4.3. MEDIDA DE PROTECCIÓN ANTE EL RIESGO DE INUNDACIÓN....	66
4.3.1. Generalidades.....	66
4.3.2. Sistema Polder.....	67
4.3.4. Diseño del sistema Polder para el área de estudio.....	73
CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
5.1.- CONCLUSIONES.....	95
5.2.- RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXOS	

RESUMEN

Esta tesis nos permite procesar toda la información básica para afrontar la problemática técnico, económica, social y ambiental del distrito de Taraco, provincia de Huancané, departamento de Puno ante un posible desborde del río Ramis.

El problema de las inundaciones es algo que se remonta a muchos años atrás, las cuales han dado como resultado no solo millonarias pérdidas sino también un retraso en el desarrollo del país como es el caso de la región de Puno donde se ha dado poca importancia a los planes de defensa contra inundaciones.

Por ello, la presente tesis está impulsado en hacer una evaluación de riesgo de inundación del río Ramis en un tramo donde se ubica el distrito de Taraco, provincia de Huancané, departamento de Puno, con el fin de reducir los daños que pueda ocasionar un desborde del río Ramis. Este trabajo trata de aportar a la ingeniería una guía sobre la evaluación de riesgos de inundación, y una alternativa de solución en áreas inundables con desarrollo agrícola y ganadero, como lo es la región de Puno.

La evaluación de riesgos de áreas susceptibles a inundación implica la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en está, se usan datos topográficos y de uso del suelo. Conjuntamente la modelación hidráulica y los Sistemas de Información Geográfica permiten determinar espacial y cuantitativamente las áreas inundadas y los riesgos asociados a nuestra área de estudio.

Una vez determinado cuantitativamente el riesgo de la zona de inundación se propone una solución que permita reducir el impacto de las inundaciones y el desarrollo de las actividades económicas (agricultura y ganadería), para ello se utilizará el modelo agrícola Polder desarrollado por lo holandeses desde el siglo XII, debido a que nuestra zona de estudio presenta ciertas condiciones naturales que favorecen a la aplicación de esta posible solución.

LISTA DE CUADROS

N°	Título del Cuadro	Pág.
Cuadro N°1.1.-	Distribución de probabilidad para el ajuste de información hidrológica	15
Cuadro N°1.2.-	Nivel de intensidad de las inundaciones	21
Cuadro N°1.3.-	Periodo de retorno en función de la zona a proteger	23
Cuadro N°2.1.-	Promedio multianual (1994-2010) de temperatura máxima, media y mínima de la estación meteorológica de Taraco	26
Cuadro N°2.2.-	Variables climatológicas - promedio multianual estación meteorológica de Taraco	27
Cuadro N°2.3.-	Clasificación de suelos	28
Cuadro N°2.4.-	Producción Agrícola (Ha) del distrito de Taraco	34
Cuadro N°2.5.-	Producción Ganadera del distrito de Taraco	35
Cuadro N°2.6.-	Población y tasa de crecimiento intercensal anual del distrito de Taraco	36
Cuadro N°2.7.-	Material de las viviendas	36
Cuadro N°2.8.-	Abastecimiento de agua de las viviendas	37
Cuadro N°2.9.-	Servicio higiénico de las viviendas	38
Cuadro N°2.10.-	Alumbrado eléctrico de las viviendas	38
Cuadro N°3.1.-	Caudales máximos diarios (m^3/s) durante 1965-2010	42
Cuadro N°3.2.-	Caudales máximos para los periodos de retorno	44
Cuadro N°3.3.-	Coordenadas del tramo de estudio del río Ramis	46
Cuadro N°3.4.-	Valores para el cálculo del coeficiente de Manning	54
Cuadro N°3.5.-	Elevaciones del nivel de agua para los periodos de retorno obtenidos con el HEC-RAS	57

Cuadro N°3.6.- Características de la malla generada en los 4 tramos del río Ramis	58
Cuadro N°4.1.- Análisis de peligro estático	61
Cuadro N°4.2.- Análisis de peligro dinámico	61
Cuadro N°4.3.- Análisis de vulnerabilidad	63
Cuadro N°4.4.- Borde libre recomendado según la descarga de diseño	74
Cuadro N°4.5.- Ancho de corona según la descarga de diseño	75
Cuadro N°4.6.- Talud laterales en función del tipo de material	75
Cuadro N°4.7.- Taludes recomendados para los rellenos estabilizadores para presas construidas sobre cimentaciones saturadas de limo y arcilla	76
Cuadro N°4.8.- Coeficiente para el diseño de enrocado de protección (Maynard)	77
Cuadro N°4.9.- Valores de x y $1/(x+1)$ para suelos no cohesivos	78
Cuadro N°4.10.- Coeficiente de contracción " μ "	79
Cuadro N°4.11.- Profundidades y espaciamientos de drenes, más comunes en suelos no diferenciados	81
Cuadro N°4.12.- Precipitación máxima de 24 horas (mm) durante 1970-2011 en la estación meteorológica de Taraco	83
Cuadro N°4.13.- Tipo de suelo	84
Cuadro N°4.14.- Uso de la tierra	84
Cuadro N°4.15.- Números de curva	85
Cuadro N°4.16.- Talud para secciones trapeciales en diferentes materiales	86
Cuadro N°4.17.- Coeficiente de rugosidad según las condiciones del dren	87
Cuadro N°4.18.- Evapotranspiración potencial mensual mediante el método de Thornthwaite	91

Cuadro N°4.19.- Valores de coeficiente de cultivo promedio K_c	92
Cuadro N°4.20.- Precipitación efectiva mensual mediante el método del número de curva	92
Cuadro N°4.21.- Cálculo de la demanda de agua de la zona de estudio	94

LISTA DE FIGURAS

N°	Título de la Figura	Pág.
Figura N°1.1.-	Diferencias del modelo vectorial y raster del mundo real	9
Figura N°1.2.-	Modelo Digital de Elevaciones de un terreno en formato raster	12
Figura N°1.3.-	Modelos de vulnerabilidad y riesgo utilizando SIG	13
Figura N°1.4.-	Información de entrada al R2_Bed	18
Figura N°1.5.-	Metodología de la evaluación de riesgo de inundación	22
Figura N°2.1.-	Ubicación geográfica de la zona de estudio	25
Figura N°2.2.-	Tierras destinadas al uso agrícola y ganadero	31
Figura N°2.3.-	Viviendas de la zona rural en el distrito de Taraco	31
Figura N°2.4.-	Cerro Hujino de la comunidad de Collana	32
Figura N°2.5.-	Uso del suelo de la zona de estudio	33
Figura N°3.1.-	Mapa de la cuenca del río Ramis	40
Figura N°3.2.-	Ubicación de la cuenca del río Ramis en la región Puno	41
Figura N°3.3.-	Tramos de estudio del río Ramis	42
Figura N°3.4.-	Elemento rectangular de dimensiones Δx y Δy	46
Figura N°3.5.-	Fuerzas que actúan en el elemento rectangular	47
Figura N°3.6.-	Ejemplos de discretización de elementos finitos	50
Figura N°3.7.-	Topografía del primer tramo del río Ramis en el R2D_Bed	55
Figura N°3.8.-	Altura de rugosidad del primer tramo del río Ramis en el R2D_Bed	56
Figura N°3.9.-	Límite del área a modelar en el primer tramo	57
Figura N°3.10.-	Malla generada en el primer tramo del río Ramis en el R2_Mesh	59
Figura N°4.1.-	Análisis de peligro estático (Plano N°2, 3, 4, 5 y 6)	62

Figura N°4.2.- Análisis de peligro dinámico (Plano N°7, 8, 9, 10, 11 y 12)	62
Figura N°4.3.- Análisis de mapas de vulnerabilidad	63
Figura N°4.4.- Evaluación de riesgo del tipo estático de la zona rural	64
Figura N°4.5.- Evaluación de riesgo del tipo estático de la zona de pastizal y cultivo	65
Figura N°4.6.- Evaluación de riesgo del tipo dinámico de la zona rural	66
Figura N°4.7.- Evaluación de riesgo del tipo dinámico de la zona de pastizal y cultivo	66
Figura N°4.8.- Esquema de un sistema Polder	68
Figura N°4.9.- Ejemplo de un dique típico	69
Figura N°4.10.- Componentes del sistema de drenaje	70
Figura N°4.11.- Sistema de drenaje parcelario	71
Figura N°4.12.- Sistema de drenaje principal	71
Figura N°4.13.- Componentes del molino de viento	72
Figura N°4.14.- Ubicación de la zona intervenida para ser polderizada	74
Figura N°4.15.- Secciones transversales del dique del Polder	80
Figura N°4.16.- Diseño del sistema parcelario	81
Figura N°4.17.- Secciones del dren principal y dren colector	88
Figura N°4.18.- Mapa eólico del Perú	89
Figura N° 4.19.- Diseño del Polder en la zona de estudio	93

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A	: Área (Ha)
C_d	: Coeficiente de drenaje
ETM	: Evapotranspiración Máxima
ETP	: Evapotranspiración Potencial
F	: Número de Froude (adimensional)
H	: Profundidad de agua (m)
K_c	: Coeficiente de cultivo
P	: Precipitación total (mm)
P_e	: Precipitación efectiva (mm)
Q	: Caudal (m^3/s)
S_0	: Pendientes del fondo del río
S_f	: Pendiente de fricción
T_r	: Periodo de retorno
b	: Ancho de canal
d_g	: Socavación general (m)
g	: Gravedad ($9.81m^2/s$)
k_s	: Altura de Rugosidad
n	: coeficiente de Manning
q_x	: Descarga de intensidad en el eje x
q_y	: Descarga de intensidad en el eje y
y	: Tirante de agua (m)
z	: Talud de canal

α	: Coeficiente de sección o de distribución de gasto
β	: Coeficiente de frecuencia
ρ	: Densidad del agua (1000Kg/m ³)
μ	: Coeficiente de contracción
CONAGUA	: Comisión Nacional de Agua de México
CN	: Número de Curva
ENVI	: Environmental Visualization Images (siglas en inglés)
ESDI	: Earth Science Data Interface (siglas en inglés)
ESRI	: Enviromental Systems Research Institute (siglas en inglés)
FEMA	: Agencia de Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (siglas en inglés)
HEC	Centro de Ingeniería e Hidrología del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos
INDECI	: Instituto Nacional de Defensa Civil
INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática
MDE	: Modelo Digital de Elevaciones
PELT	: Proyecto Especial Lago Titicaca
QI	: Quality Index (siglas en inglés)
RAS	: River Analysis System (siglas en inglés)
SCS	: Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	: Sistema de Información Geográfica
STRM	: Shuttle Radar Topography Misión (siglas en inglés)
TIN	: Red irregular de triángulos

INTRODUCCION

Presento a consideración de los miembros del jurado la tesis Evaluación de Riesgo de Inundación en el distrito de Taraco utilizando Sistemas de Información Geográfica para obtener el Título de Grado de Ingeniero Civil que otorga la Universidad Nacional de Ingeniería.

El objetivo de la presente tesis es presentar una metodología para la evaluación del riesgo de áreas susceptibles a inundación del río Ramis en el distrito de Taraco, provincia de Huancané, departamento de Puno, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y un modelo hidráulico 2D, para ello se contempla la utilización de programas de análisis espacial, particularmente ArcMap de ArcGIS y el software River2D, herramientas de análisis espacial que permiten generar procesos y cartografía detallada del riesgo por inundación, mediante información geoespacial y datos de campo. La evaluación de riesgo ante inundaciones muestra las inundaciones en relación con los impactos potenciales que éstas pueden llegar a ocasionar en un área determinada dependiendo del uso del suelo.

Esta investigación ha sido posible analizando las inundaciones del río Ramis en el distrito de Taraco, para lo cual la tesis se ha dividido en 5 capítulos:

El capítulo I abarca la teoría básica que se utiliza en la tesis, y además establece una metodología para la evaluación de riesgos de inundación, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica.

El capítulo II hace una descripción del entorno físico (climatología, geología, geomorfología), uso del suelo y las características sociales, económicas, entre otras de la situación actual de la zona de estudio.

El capítulo III presenta los estudios hidrológicos e hidráulicos realizados para determinar el caudal y los niveles de inundación de la zona de estudio al ocurrir una inundación de evento extremo.

El capítulo IV consiste en el análisis y evaluación del riesgo en base a sus componentes de peligro y vulnerabilidad del evento extremo de inundación asociado.

El capítulo V detalla las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado en la tesis.

CAPÍTULO I

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INUNDACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El propósito de este capítulo es definir algunos conceptos referidos a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y establecer la metodología para la evaluación de riesgos de inundación, a través del uso de los SIG y del modelo hidráulico River2D, la cual nos permita incrementar la eficiencia del análisis y toma de decisiones para la adopción de medidas de prevención adecuadas.

La metodología empleada para la evaluación de riesgos se basa en el enfoque desarrollado por Gilard (1996), este considera que el riesgo de inundación se divide en un componente de peligro y vulnerabilidad.

1.2. CONCEPTOS PREVIOS

1.2.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una integración organizada de hardware, software y datos geográficos, diseñados para capturar, almacenar, manipular y analizar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

La razón fundamental para utilizar los Sistemas de Información Geográfica es la gestión de información espacial. Estos sistemas permiten separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Los datos de los Sistemas de Información Geográfica representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos y continuos, en base a esto existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: raster y vectorial.

a. Modelo de datos vectorial

Está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices, es decir, para modelar digitalmente las entidades del mundo real se utilizan tres elementos geométricos: el punto, la línea y el polígono.

b. Modelo de datos raster

Un tipo de datos raster es cualquier tipo de imagen digital representada en mallas, es decir, se divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor, se trata de un modelo de datos muy adecuado para la representación de variables continuas en el espacio.

En la figura N°1.1 se muestran las diferencias entre un modelo vectorial y raster al representar el mundo real.

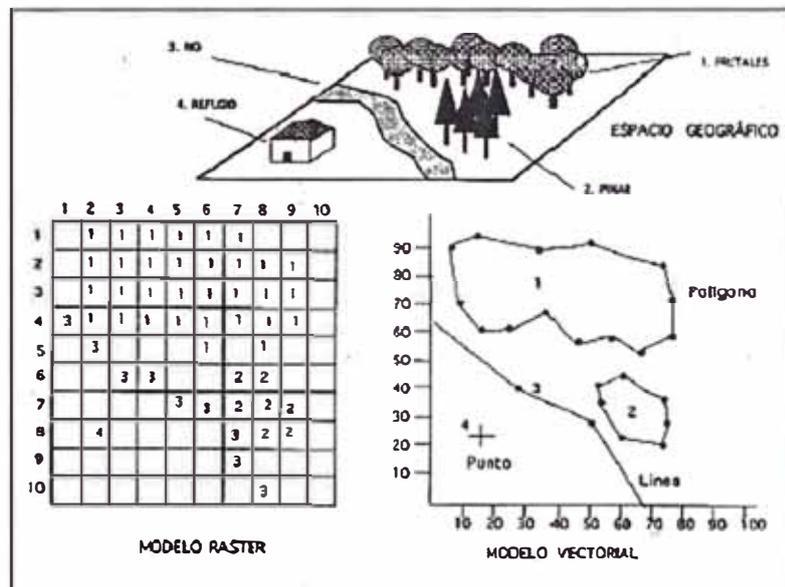


Figura N°1.1.- Diferencias de modelo vectorial y raster del mundo real

1.2.2. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Un Modelo Digital de Elevaciones es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

La importancia de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) radica en que pueden ser tratados numéricamente de forma sencilla y derivar de ellos una gran cantidad de información tanto cualitativa como cuantitativa. Los Modelos Digitales de Elevaciones se pueden representar de las siguientes maneras:

- Curvas de nivel, se trata de líneas, definidas como una sucesión de pares de coordenadas, que tienen como identificador el valor de la elevación en cada uno de los puntos de la línea.
- Red Irregular de Triángulos (TIN), a partir de un conjunto de puntos, en los que se conoce la elevación, se traza un conjunto de triángulos, formados por tripletas de puntos cercanos no colineales, formando un mosaico. En ocasiones se parte de las curvas de nivel que, tras descomponerse en un conjunto de puntos, genera una red irregular de triángulos. En este caso hay que tener en cuenta que puedan formarse triángulos a partir de puntos extraídos de la misma curva de nivel, por tanto con el mismo valor, darán lugar a triángulos planos.
- Formato raster, esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas.

El Modelo digital de Elevaciones en formato raster (ver figura N°1.2) es el más adecuado para la integración de las elevaciones en un Sistema de Información Geográfica ya que permiten obtener nuevos mapas a partir de ellos.



Figura N°1.2.- Modelo Digital de Elevaciones de un terreno en formato raster

1.2.3. Software SIG: ArcGIS Desktop 10

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), producido y comercializado por la empresa estadounidense Environmental Systems Research Institute (ESRI).

El ArcGIS Desktop 10, familia de aplicaciones SIG de escritorio, es uno de los software ampliamente utilizados, y es un conjunto de aplicaciones integradas por: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox. El ArcMap, es la aplicación central de ArcGIS Desktop, esta aplicación SIG se usa para todas las actividades relacionadas al mapeo, incluyendo cartografía, análisis de mapas y edición. El ArcCatalog ayuda a organizar y administrar todos los datos SIG, y el ArcToolbox es una aplicación sencilla que contiene muchas herramientas SIG para usar en el geoprocesamiento de datos.

Usando estas tres aplicaciones en conjunto se puede desarrollar cualquier actividad o tarea SIG, desde una muy simple hasta una muy avanzada, incluyendo mapeo, administración de datos, análisis geográfico, edición de datos y geoprocesamiento.

1.2.4. Aplicaciones SIG: Modelos de peligro, vulnerabilidad y riesgo

Un modelo de peligro está relacionado con la probabilidad que ocurra un suceso potencialmente dañino, y un modelo de vulnerabilidad se relaciona al daño potencial que causaría dicho suceso. El modelo de riesgo se construye mediante las combinaciones de los modelos de peligro y vulnerabilidad. La figura N°1.3 muestra los modelos de vulnerabilidad y riesgo a través del empleo de los Sistemas de Información Geográfica.

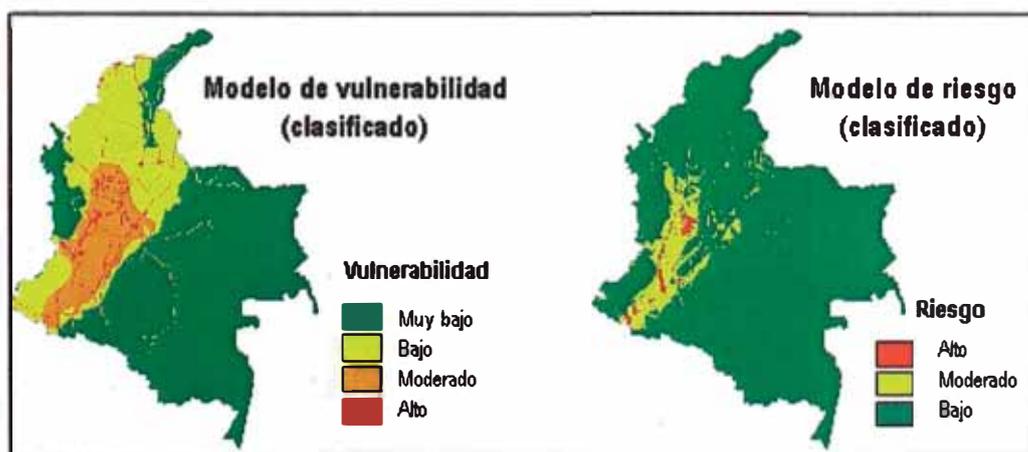


Figura N°1.3.- Modelos de vulnerabilidad y riesgo utilizando SIG

1.3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INUNDACIÓN

La metodología para el desarrollo de la evaluación de riesgos de inundación utilizando los SIG y el modelo hidráulico River2D se ha dividido en 4 fases:

- Fase de recolección y análisis de la información disponible
- Fase de estudio hidrológico
- Fase de la modelación hidráulica en el River2D
- Fase de la evaluación de riesgos de inundación

1.3.1. Fase de recolección y análisis de la información disponible

Esta fase comprende la adquisición de datos hidrométricos, topográficos, uso de suelo, batimetría del río y otros, que nos permita establecer una base sólida y consistente en el que se irán sustentando y desarrollando el resto de las fases. A continuación se describe la utilidad de la recopilación de cada dato para el desarrollo de la evaluación de riesgos de inundación:

- La información batimétrica y topográfica es necesaria para conocer la geometría del cauce de fondo y del terreno en las zonas de las llanuras de inundación. Para nuestro estudio se emplea la información de curvas de nivel con precisión de cada metro proporcionada por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT). Adicionalmente para ampliar la llanura de inundación se utiliza la imagen STRM (Shuttle Radar Topography Mision), en la que se puede obtener un MDE de la zona de estudio.
- Aparte de la geometría del cauce y de las llanuras de inundación, es necesario conocer la ubicación y la geometría de las obras hidráulicas existentes en el cauce del río (puentes, bocatomas, vertederos, etc.). Para nuestro estudio se identificó la estructura del puente Collana.
- La información de caudales máximos diarios históricos es importante para generar el análisis de máximas avenidas, que nos permita obtener el caudal máximo para el evento extremo que requiere nuestra evaluación de riesgos.
- La información recopilada de uso del suelo es utilizada para el análisis de vulnerabilidad ante el peligro de inundación, Para ello se utiliza la información catastral proporcionada por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT), escenas de imágenes satelitales Landsat e inspecciones de campo.

Todos los datos obtenidos en la etapa de recopilación deben ser cuidadosamente analizados y procesados de manera adecuada para poder ser incorporados en las diferentes fases del estudio.

1.3.2. Fase de estudio hidrológico

El estudio hidrológico se refiere al análisis de máximas avenidas, que consiste en estimar la magnitud del evento extremo asociado a un periodo de retorno.

Los datos de los caudales máximos diarios fueron recabados del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Se analizan caudales máximos diarios, comprendidas entre los años 1965-2010, para un total de 43 años y con esta información se realiza el análisis de máximas avenidas, este análisis se subdivide en las siguientes etapas:

a. Ajuste de la información hidrológica a una Distribución de Probabilidad

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. En la estadística existen diversas funciones de distribución de probabilidad teóricas que representan en forma satisfactoria el comportamiento de una variable hidrológica, en nuestro caso caudales máximos.

El cuadro N°1.1 resume para cada distribución, la función de densidad de probabilidad y las ecuaciones para estimar los parámetros de la distribución a partir de los parámetros estadísticos de la muestra.

Cuadro N°1.1.- Distribuciones de Probabilidad para el ajuste de información hidrológica

Distribución	Función de Densidad	Ecuaciones de los parámetro en función de los momentos de la muestra
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$\mu = \bar{x}, \sigma = S_x$
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2}$ donde $y = \log(x)$	$\mu_y = \bar{y}, \sigma_y = S_y$
Gamma de 2 parámetros	$f(x) = \frac{\lambda^\beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)}$ donde $\Gamma =$ función gamma	$\lambda = \frac{\bar{x}}{S_x^2}, \beta = \left(\frac{\bar{x}}{S_x}\right)^2$

Cuadro N°1.1.- (Continuación)

Distribución	Función de Densidad	Ecuaciones de los parámetro en función de los momentos de la muestra
LogPearson Tipo III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (y-\epsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(y-\epsilon)}}{\Gamma(\beta)}$ <p>donde $y = \log(x)$</p>	$\lambda = \frac{S_y}{\sqrt{\beta}}, \quad \beta = \left(\frac{2}{C_{s(y)}} \right)^2, \quad \epsilon = \bar{y} - S_y \sqrt{\beta}$
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}$	$\alpha = \frac{\sqrt{6} S_x}{\pi}, \quad \mu = \bar{x} - 0.5772 \alpha$

Fuente: Ven Te Chow, Maidment David, Mays Larry

Los valores de \bar{x} , S_x , C_s son la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría respectivamente. Estos son los parámetros estadísticos de la muestra.

Para conocer el mejor ajuste de una Distribución de probabilidad teórica con los datos de caudales máximos diarios se utiliza la prueba de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, esta prueba consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo, es decir:

$$\Delta = \max |F(x) - P(x)|$$

Donde:

Δ : Estadístico de Smirnov-Kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad teórica y la probabilidad empírica.

$F(x)$: Probabilidad de la distribución teórica

$P(x)$: Probabilidad experimental o empírica de los datos

Si Δ_0 es un valor crítico para un nivel de significancia α , se tiene que:

$$P [\max |F(x) - P(x)| \geq \Delta_0] = \alpha \quad \text{o} \quad P (\Delta \geq \Delta_0) = \alpha$$

El procedimiento para efectuar el ajuste, por el estadístico Smirnov-Kolmogorov es el siguiente:

- Calcular la probabilidad empírica o experimental $P(x)$ de los datos, para esto se utiliza la fórmula de Weibull:

$$P(x) = \frac{m}{n+1}$$

Donde:

P : Probabilidad experimental acumulada o frecuencia relativa empírica

m : número de orden

n : número de datos

- Calcular la probabilidad teórica $F(x)$, utilizando la ecuación de la función acumulada $F(x)$ de los modelos teóricos o tablas elaboradas para tal fin.
- Calcular las diferencias $F(x)-P(x)$ para todos los valores de x
- **Seleccionar la máxima diferencia:** $\Delta = \max|F(x)-P(x)|$
- **Calcular el valor crítico del estadístico Δ , es decir Δ_0 para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y n igual al número de datos.**
- **Comparar el valor estadístico Δ , con el valor crítico Δ_0 con los siguientes criterios de decisión:**

$\Delta < \Delta_0$: El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado

$\Delta \geq \Delta_0$: El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

b. Determinación del caudal máximo para el periodo de retorno

Con la función de distribución seleccionada de acuerdo a la prueba de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, se determina el caudal máximo para el periodo de retorno, aplicando los coeficientes de frecuencia:

$$Q_T = \bar{Q} + K_T S_Q$$

Donde:

Q_T : Caudal máximo asociado a un periodo de retorno

\bar{Q} : Caudal promedio de los datos históricos de caudales

S_Q : Desviación estándar de los datos históricos de caudales

K_T : Factor de frecuencia, depende de la distribución de probabilidad teórica y del periodo de retorno.

1.3.3. Fase de modelación hidráulica en el River2D

La modelación hidráulica permite calcular la elevación de los niveles de agua, las profundidades y las velocidades de flujo en cada uno de los nodos de cálculo definidos a lo largo del cauce considerado. Los nodos de cálculo son aquellos vértices de los elementos finitos triangulares, que contienen una posición georeferenciada, elevaciones y datos de alturas de rugosidad.

El cálculo hidráulico se realiza para el caudal máximo asociado a los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años determinados en el estudio hidrológico, para nuestra modelación hidráulica se utiliza un modelo bidimensional llamado River 2D. El modelamiento hidráulico en el software River2D comprende la interacción de tres programas: R2D_Bed, R2D_Mesh y River2D que se describe a continuación:

a. Generación del modelo hidráulico en el R2D_Bed

El programa R2D_Bed permite la representación exacta de los parámetros físicos del cauce del río y de la llanura de inundación: la elevación y la rugosidad.

En esta etapa se construye la batimetría y topografía del cauce y de la llanura de inundación del tramo de estudio con la ayuda de las herramientas del programa ArcGIS Desktop 10, utilizando como información los datos topográficos de curvas de nivel proporcionados por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT) y el modelo digital de elevaciones denominado SRTM (Shuttle Radar Topography Misión), que cuenta con una resolución espacial de 90 metros para Sudamérica, esto significa una precisión aceptable para una cartografía a la escala 1:100 000. Este modelo fue descargado de manera gratuita desde internet, a través de la interfaz de datos de las ciencias de la Tierra (Earth Science Data Interface ESDI) de la Universidad de Maryland.

Una vez construida la topografía adecuada en ArcGIS Desktop 10, se exporta la información de las curvas de nivel en puntos que deben contener: la coordenada x, coordenada y, elevaciones y alturas de rugosidad al programa R2D_Bed, para más detalle en la figura N°1.4 se muestra la información de entrada en el R2D_Bed.

N	X	Y	Z	R
1	405601.7037	8314536.287	3810	0.03
2	405601.8004	8314536.249	3810	0.03
3	405602.0662	8314536.187	3810	0.03
4	405602.6178	8314536.126	3810	0.03
5	405603.6985	8314536.1	3810	0.03
6	405605.4529	8314536.152	3810	0.03
7	405607.6272	8314536.288	3810	0.03
8	405610.1202	8314536.499	3810	0.03
9	405612.8908	8314536.775	3810	0.03
10	405615.8577	8314537.108	3810	0.03
11	405618.9499	8314537.486	3810	0.03
12	405622.0962	8314537.903	3810	0.03
13	405625.2254	8314538.346	3810	0.03
14	405628.2664	8314538.809	3810	0.03
15	405631.148	8314539.28	3810	0.03
16	405633.7991	8314539.751	3810	0.03
17	405636.1488	8314540.212	3810	0.03
18	405638.1251	8314540.654	3810	0.03
19	405639.6578	8314541.067	3810	0.03
20	405640.554	8314541.371	3810	0.03
21	405640.922	8314541.579	3810	0.03
22	405641.0705	8314541.709	3810	0.03
23	405641.1064	8314541.77	3810	0.03
24	405641.126	8314541.855	3810	0.03
25	405641.108	8314542.077	3810	0.03
26	405640.9458	8314542.507	3810	0.03
27	405640.4998	8314543.271	3810	0.03
28	405639.6202	8314544.481	3810	0.03
29	405638.4453	8314545.923	3810	0.03
30	405637.0422	8314547.539	3810	0.03
31	405635.4744	8314549.273	3810	0.03
32	405633.8131	8314551.069	3810	0.03
33	405632.1178	8314552.869	3810	0.03
34	405630.4609	8314554.617	3810	0.03
35	405628.9066	8314556.236	3810	0.03
36	405627.1016	8314557.73	3810	0.03
37	405625.1016	8314559.982	3810	0.03
38	405623.5236	8314559.951	3810	0.03
39	405622.0438	8314560.593	3810	0.03
40	405624.6356	8314561.431	3810	0.03
41	405624.2546	8314562.506	3810	0.03
42	405623.8895	8314563.3	3810	0.03
43	405623.5792	8314565.008	3810	0.03
44	405623.1622	8314566.279	3810	0.03
45	405622.7773	8314567.455	3810	0.03
46	405622.3633	8314569.457	3810	0.03
47	405622.0035	8314569.079	3810	0.03

Figura N°1.4.- Información de entrada al R2_Bed

Una vez ingresada la información de entrada se realiza la triangulación para obtener la representación de la topografía adecuada del tramo de estudio, quizás sea necesario la creación de líneas de corte (breaklines), las cuales se emplean en cualquier modelo topográfico para indicar cambios bruscos en la pendiente del terreno, como puede ser el pie y corona de un talud. Por eso deberían ir en la parte inferior y superior de las márgenes del río.

b. Generación del modelo hidráulico en el R2D_Mesh

El programa R2D_Mesh solo genera los datos de entrada para el programa River2D. El programa R2D_Mesh permite: definir el límite a modelar, las condiciones de borde del modelo hidráulico y genera la malla que será resuelta mediante el método de elementos finitos. La secuencia de trabajo en el R2D_Mesh para la generación de malla es de la siguiente manera:

- **Definición del límite:** Esto consiste en definir el área o sub área que será utilizada para modelar.
- **Definición de las condiciones de borde:** Estas condiciones de borde son el caudal total y el nivel de agua a la salida del área para modelar.
- **Discretización:** Consiste en dividir el área a modelar por un numero discreto de nodos, una densidad alta de nodos significa una resolución más fina y una exactitud mayor, pero un mayor esfuerzo de cálculo y tiempo.
- **Triangulación:** Genera la malla de elementos finitos triangulares a partir de los nodos insertados en la fase de discretización. Dependiendo de la colocación de los nodos, la triangulación puede ser aceptable.
- **Aplanado de malla:** Para obtener los triángulos más regulares en forma y obtener una transición más gradual entre los triángulos de diferentes tamaños se debe aplanar la malla.
- **Corrección en áreas críticas del modelado:** El objetivo es proporcionar una densidad alta de nodos en áreas críticas dentro del dominio limitado, esto generalmente ocurre en zonas de cambios bruscos de pendiente.

La generación de la malla de elementos finitos es un proceso que consume mucho tiempo y requiere de gran cuidado para obtener unos buenos resultados.

c. Simulación del modelo hidráulico en el River2D

El objetivo de la modelación hidráulica es la determinación de los límites de las áreas de inundación. Por lo tanto, una vez generada la malla de elementos finitos, utilizamos el programa River2D, el cual realiza la corrida específica del modelo hidráulico previa selección de flujo a modelar (régimen permanente o impermanente), para nuestro estudio se selecciona un flujo de régimen permanente.

Como resultado de la modelación hidráulica se obtiene los valores simulados de niveles de agua y velocidades de flujo en todos los nodos de cálculo del cauce del río. Una vez obtenido los resultados en el River2D se exportan al ArcGIS Desktop 10 que servirán para la evaluación de riesgos de nuestra zona de estudio.

1.3.4. Fase de evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos ante inundación se basa en el enfoque desarrollado por Gilard (1996), este considera que el riesgo de inundación se divide en un análisis de peligro y vulnerabilidad.

El análisis de peligro consiste en clasificar el nivel de peligrosidad de inundación en la zona de estudio que será afectada, esto está en función de la intensidad y de la probabilidad de ocurrencia de la inundación:

$$\text{Peligro de inundación} = f(\text{intensidad} \times \text{probabilidad de ocurrencia})$$

Donde:

Intensidad : f (profundidad de agua, velocidad, duración)

Probabilidad : f (precipitaciones, tormentas, cambio climático)

La intensidad de una inundación está directamente relacionada con los parámetros hidráulicos: profundidad o producto de la profundidad por la velocidad del flujo. Los criterios utilizados para evaluar la intensidad de las inundaciones son diferentes en dependencia del tipo de inundación:

- **Inundaciones Rápidas o dinámicas:** Suele producirse en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas vertientes presentan fuertes pendientes, por efecto de lluvias intensas. Las crecidas son repentinas y de corta duración. Son éstas las que suelen producir los mayores estragos en la población, sobre todo porque el tiempo de reacción es prácticamente nulo.

- **Inundaciones Lentas o estáticas:** Se produce cuando lluvias persistentes y generalizadas, producen un aumento paulatino del caudal del río hasta superar su capacidad máxima de transporte. Entonces el río se sale de su cauce, inundando áreas planas cercanas al mismo. Las zonas que periódicamente suelen quedar inundadas se denominan Llanuras de Inundación.

Para determinar el nivel de intensidad de las inundaciones estáticas se considera la profundidad o altura del flujo, mientras que para inundaciones dinámicas se utiliza el producto de la velocidad por la profundidad del flujo. La tabla N°1.2 muestra los niveles de intensidad en función de los parámetros hidráulicos.

Cuadro N°1.2.- Nivel de intensidad de la inundaciones

Niveles de Intensidad	Profundidad de flujo (m)	Profundidad x velocidad(m ² /s)
Muy Alta	$H > 1.5m$	$H*V > 1.5m$
Alta	$0.5m < H < 1.5m$	$0.5m < H*V < 1.5m$
Media	$0.25m < H < 0.5m$	$0.25m < H*V < 0.5m$
Baja	$H < 0.25m$	$H*V < 0.25$

Fuente: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI)

En base a este criterio se determinará el peligro de inundación para los diferentes periodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años de la zona de estudio, esto se representará en mapas de peligro de inundación utilizando las herramientas del programa ArcGIS Desktop 10.

Para determinar el riesgo de inundación, debemos también realizar un análisis de mapas de vulnerabilidad. El análisis de la vulnerabilidad se realiza por el uso de un modelo binario, basándose en la presencia o ausencia de una inundación con determinada probabilidad de ocurrencia en un uso particular del suelo, es decir consiste en intersectar el mapa de uso de suelo de las llanuras de inundación con el área provocado por el evento de inundación, esto se representará en mapas de vulnerabilidad utilizando las herramientas del programa ArcGIS Desktop 10

Los resultados de estos dos análisis se combinan para la evaluación del riesgo de inundación, la siguiente figura N°1.5 muestra un enfoque de la metodología usada para la evaluación de riesgos de inundaciones a través de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica y del modelo hidráulico River2D.

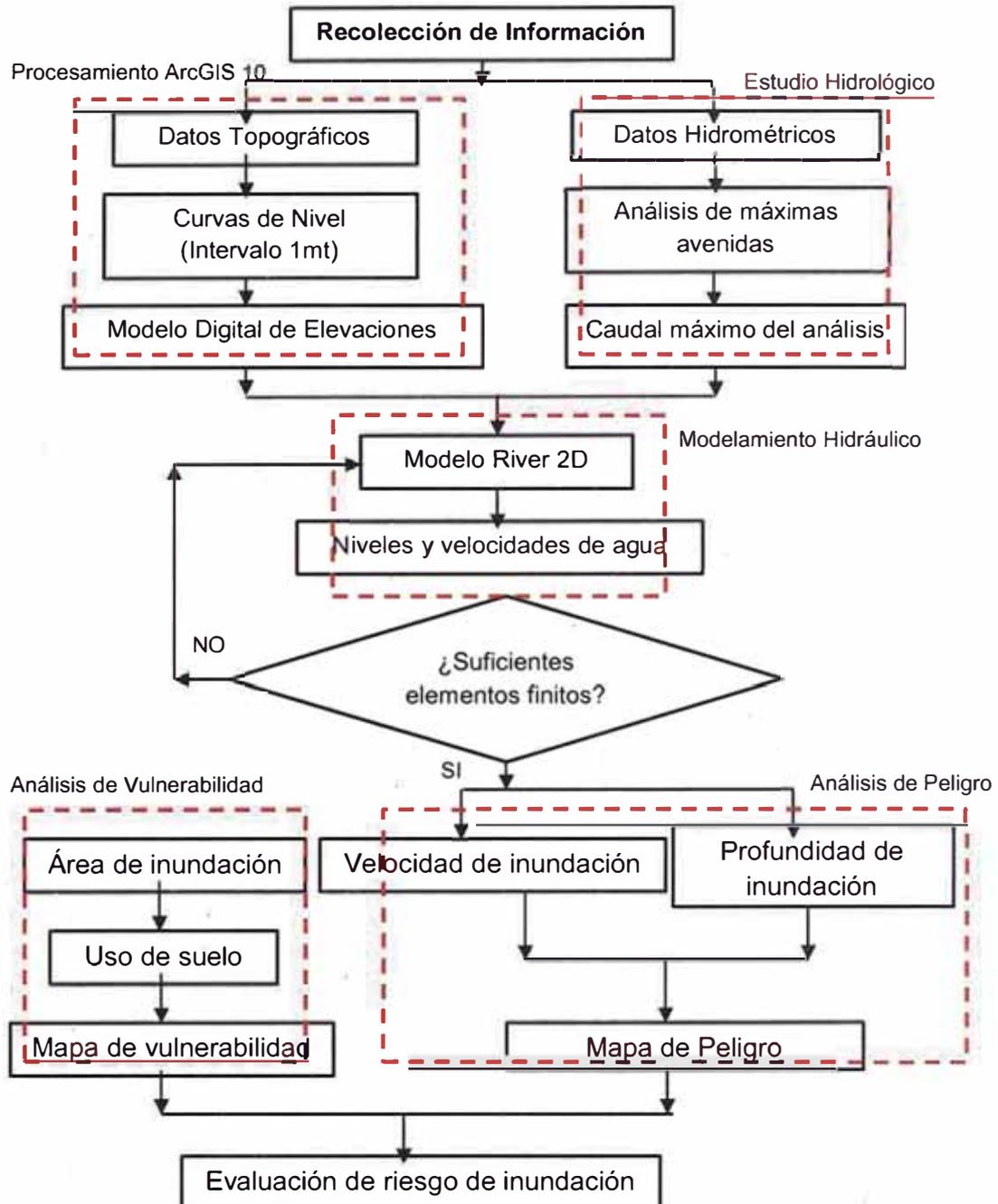


Figura N°1.5.- Metodología de evaluación de riesgo de inundación

Una vez realizado la evaluación de riesgos de inundación, se determinará el diseño adecuado de una medida de protección de inundación de la zona de estudio, para ello se debe elegir una llanura de inundación perteneciente a un periodo de retorno (probabilidad de ocurrencia), en función de las características de uso del suelo y de los registros de inundaciones históricas del río, para ello se revisó diferentes bibliografías y normas que nos permitan elegir la llanura de inundación adecuada

en función de las características de nuestra zona de estudio, que es netamente rural como se describirá en el capítulo 2.

Actualmente en el Perú la ley de aguas del año 1969 establece cualitativamente un área intangible llamada franja marginal, sin embargo no define un caudal específico que demarque los límites específicos de ésta, debido a este vacío en nuestra legislación se ha visto por conveniente revisar legislaciones de otros países y adecuarlas a nuestra realidad. La agencia de Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA, siglas en inglés) ha adoptado la avenida de 100 años como la avenida base para tomar medidas de gestión de las planicies de inundación para zonas pobladas. Por otra parte la Comisión Nacional de Agua de México (CONAGUA) considera la tabla N°1.3 para la elección de una avenida en función de la zona a proteger.

Cuadro N°1.3.- Periodo de retorno en función de la zona a proteger

Características de la zona a proteger	Periodo de retorno (T)
Terrenos agrícolas aislados sin posible pérdidas de vidas humanas	5 años
Zonas de riego, sin riesgo de pérdidas de vidas humanas	25 años
Zonas agrícolas poco pobladas	50 años
Zona industrial y urbana	500 años
Zona densamente poblada y ciudades	1,000 años

Fuente: Comisión Nacional de Agua (CONAGUA)

Para el diseño de nuestra medida de protección se utilizará la llanura de inundación perteneciente al periodo de retorno de 50 años (probabilidad 2%), debido a que nuestra zona de estudio tiene características similares a zonas agrícolas poco pobladas como se describirá en el capítulo II, el grado de protección contra inundación mencionado anteriormente es considerado razonable.

Haber realizado el diseño de nuestra medida de protección siguiendo las consideraciones del CONAGUA no implica que los territorios fuera del área de peligro especial de inundación estarán libres de inundaciones o daños causados por las mismas, por lo contrario este valor debe ser considerado como requerimiento mínimo.

CAPÍTULO II

ENTORNO FÍSICO Y CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. GENERALIDADES

El propósito del capítulo es describir y analizar el entorno físico y las características sociales, económicas, entre otras, de la situación actual del ámbito de estudio, afectadas por las inundaciones.

El ámbito de estudio está constituido por las comunidades y parcialidades campesinas del distrito de Taraco. En esta zona se produce las inundaciones por el desbordamiento de las aguas del río Ramis, las magnitudes y los efectos de las inundaciones dependen de las características de las crecientes que son generadas por lluvias intensas, generando daños en viviendas, vías de comunicación, producción agrícola, producción ganadera, etc.

2.2. ENTORNO FISICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.2.1. Ubicación Geográfica y Política

La zona de estudio, geográficamente se ubica entre las coordenadas Este de 394,460m a 400,000m y Norte de 8'309,174m a los 8'313,244m a una altitud promedio de 3,820 msnm (ver figura N°2.1)

Políticamente el área de estudio se ubica en el distrito de Taraco, provincia de Huancané, departamento de Puno, y limita con los siguientes distritos:

- Por el norte con los distritos de Huancané y Samán (provincia de Azángaro)
- Por el sur con el distrito de Pusi (provincia de Huancané)
- Por el este con el distrito de Huancané y el Lago Titicaca
- Por el oeste con el distrito de Samán (provincia de Azángaro)

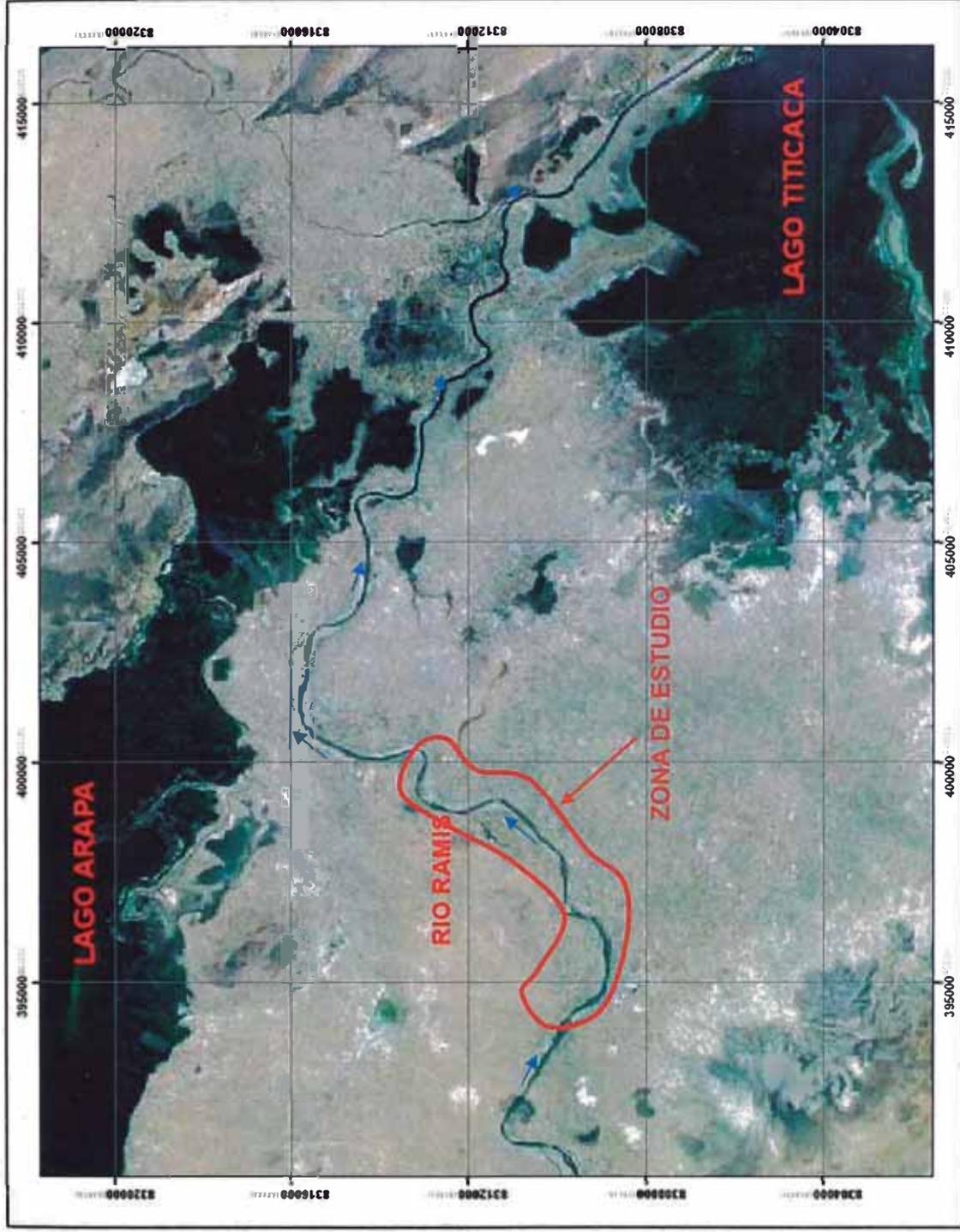


Figura N°2.1.- Ubicación geográfica de la zona de estudio

2.2.2. Climatología

El clima general corresponde al tipo seco y frío, debido a la presencia del Lago Titicaca y del Lago Arapa que crea microclimas, dando lugar a que se formen dos periodos climatológicos definidos.

Durante los meses de abril a noviembre se tiene un periodo seco, con un clima frígido principalmente por la noche, con descensos de temperatura muy fuertes, por lo que se da el fenómeno común denominado heladas; en el día es soleado y tibio, pero con vientos intensos y precipitaciones esporádicas.

Durante los meses de diciembre a marzo se tiene un periodo con fuertes precipitaciones pluviales, acompañado de tempestad, nevadas y granizo. Las variables climáticas más importantes que se describen son: temperatura, precipitación y evaporación.

a. Temperatura

La información de temperatura máxima, media y mínima de la zona de estudio, se ha obtenido de la estación meteorológica de Taraco. La temperatura promedio anual registrada es de 7.79°C durante los años de 1994 hasta 2010, donde las temperaturas promedio máxima y mínima anual están alrededor de los 16.08°C y -0.51°C respectivamente (ver cuadro N°2.1).

Cuadro N°2.1.- Promedio multianual (1994-2010) de temperatura máxima, media y mínima de la estación meteorológica de Taraco

Mes	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Mínima (°C)
Enero	15.34	10.24	5.12
Febrero	15.38	10.14	4.94
Marzo	15.35	9.61	3.82
Abril	15.88	7.94	-0.04
Mayo	16.09	5.56	-4.96
Junio	15.38	3.91	-7.57
Julio	15.29	3.66	-8.21
Agosto	15.92	5.04	-5.81
Setiembre	16.75	7.34	-2.07
Octubre	17.22	9.40	1.61
Noviembre	17.54	10.14	2.74
Diciembre	16.82	10.53	4.26
Promedio	16.08	7.79	-0.51

Fuente: Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del Río Ramis

b. Precipitación

El periodo de lluvias de mayor magnitud comienza a partir del mes de diciembre y se prolonga hasta marzo. El periodo seco (invierno), comprende los meses de mayo a agosto.

Las precipitaciones pluviales alcanzan un promedio anual de 558.94 mm/año y muestra una variación de la precipitación media mensual desde 1.32 mm hasta 129.68 mm durante los años de 1991 hasta 2010 obtenidas de la estación meteorológica de Taraco (ver cuadro N°2.2).

c. Evaporación

El término evaporación se refiere, en climatología, al agua transferida a la atmósfera a partir de las superficies libres de agua.

La información de evaporación de la zona de estudio, se ha obtenido de la estación meteorológica de Taraco. La evaporación total anual es de 1,442.80mm y muestra una variación de la evaporación media mensual desde 100.3mm hasta 130.1mm durante los años de 1996 hasta 2010 (ver cuadro N°2.2).

Cuadro N°2.2.- Variables climatológicas - promedio multianual estación meteorológica de Taraco

Mes	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
Enero	129.68	112.3
Febrero	106.73	100.3
Marzo	89.44	113.6
Abril	30.32	119.1
Mayo	6.69	130.1
Junio	5.07	122.3
Julio	1.32	122.7
Agosto	6.53	125.3
Septiembre	18.93	119.4
Octubre	40.18	124.6
Noviembre	41.87	129.6
Diciembre	82.18	123.5
Total	558.94	1,442.8

Fuente: Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del Río Ramis

2.2.3. Topografía

El terreno del área de estudio es irregular, pues muestra elevaciones y planicies, siendo la mayor parte llana. La parte llana tiene una pendiente suave cuyo promedio es del 0.5%.

Para la obtención del modelo digital de elevaciones (MDE) de la zona de estudio se emplea la información de curvas de nivel con precisión de cada metro proporcionada por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT) y para ampliar la llanura de inundación se utiliza la imagen STRM (Shuttle Radar Topography Mision), que tiene una resolución espacial de 90m y fue descargado de forma gratuita desde internet, a través de la interfaz de datos de las ciencias de la Tierra (Earth Science Data Interface ESDI) de la Universidad de Maryland.

El MDE de la zona de estudio en formato raster se basó en la información antes mencionada y del procesamiento con el programa ArcGIS Desktop 10, esto se muestra en el plano P-1 del anexo 4.

2.2.4. Geología y Estratigrafía

En la situación Geológica Regional se distingue una variada gama de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuyas edades varían desde las épocas primarias hasta períodos relativamente cercanos. Los afloramientos que ocupan mayores extensiones en el área pertenecen al Cenozoico y siguen el orden descendente a las unidades correspondientes al Mesozoico y Paleozoico.

La región ha estado sometida, a través de diversos periodos geológicos, a movimientos orogénicos y epirogenéticos actualmente testificados por el número de fallas existentes en sus áreas. Asimismo intensos, procesos estructurales, debido a esfuerzos de comprensión y tensión, han originado estructuras complejas sobre escurrimientos, sinclínoríos, grandes fallas, etc.

Los suelos confortantes de la zona de estudio presentan una distribución típica de depósitos aluviales-residuales, mostrando un perfil estratigráfico casi homogéneo y pueden ser clasificados según el cuadro N°2.3 como de tres tipos:

- Arcilla inorgánica, arcilla limosa, arcilla arenosa de baja plasticidad (CL)
- Limos inorgánicos, arena fina arcillosa o limosa de poca plasticidad (ML)
- Arena limosa (SM)

Cuadro N°2.3.- Clasificación de suelos

Descripción		Símbolo del Grupo
Material de grano grueso(más del 50% del material tiene dimensiones mayores que la malla del tamiz N°200)	Grava (más del 50% de la fracción gruesa tiene dimensiones de grava)	GW: grava bien graduada, grava arenosa GP: grava mal graduada, grava arenosa. GM: grava limosa, grava arenosa limosa
	Arena (más del 50% de la fracción gruesa tiene dimensiones de arena)	SW: arena bien graduada, arena y grava. SP: Arena mal graduada, arena y grava. SM: Arena limosa SC: Arena arcillosa
Material de grano fino (más del 50% del material tiene dimensiones menores que la malla del tamiz N°200)	Limo, arcilla (Limite Liquido<50)	ML: Limos inorgánicos, arena fina arcillosa o limosa de poca plasticidad CL: Arcilla inorgánica, arcilla limosa, arcilla arenosa de baja plasticidad.
	Limo, arcilla (Limite Liquido>50)	MH: Limos inorgánicos de alta plasticidad. CH: Arcilla inorgánica de alta plasticidad OH: Arcilla orgánica de alta plasticidad.
Terrenos altamente orgánicos	Pt: Turba y otros suelos altamente orgánicos	

Fuente: Braja M. Das

2.2.5. Geomorfología

El área de estudio se encuentra en la unidad geomorfológica denominada altiplano, que es una planicie sin muchos rasgos fisiográficos que se ubica alrededor de los 3,500 hasta los 4,900 msnm con algunas colinas bajas, dentro de estas se localiza la sub-unidad denominando depresión central del Lago Titicaca.

En el altiplano cerca a la desembocadura al Lago Titicaca, los ríos son meandricos como el río Ramis que se forma por la confluencia de los ríos Azángaro y Ayaviri. En la zona de estudio la evolución geomorfológica local, está relacionada con tres sistemas: Antrópico, Fluvial y Sedimentario.

a. Sistema Antrópico: Está constituido por las construcciones y modificaciones efectuadas en la superficie tales como: edificaciones urbanas y vías de acceso.

b. Sistema Fluvial: Está constituido por el cauce fluvial del río Ramis, las terrazas aluviales de relieve plano con poca inclinación y depósitos aluviales.

c. Sistema Sedimentario: Está constituido por geo formas originadas por la erosión realizada por cualquier tipo de movimiento de masas tendente siempre a hacer desaparecer las diferencias de nivel muy relacionada con la composición litológica.

2.2.6. Geodinámica externa

Los fenómenos de geodinámica externa observados en la zona de estudio son ocasionados principalmente por el río Ramis que se desplaza en forma meándrica, a lo largo de un cauce irregular, generando efectos de inundación.

Este fenómeno se agrava en épocas de avenida (grandes precipitaciones pluviales) debido al incremento de su caudal y su tendencia meándrica, por cuanto mayor es su volumen y velocidad, incrementando su poder erosivo originando el socavamiento de los costados del río en ambos flancos.

2.3. USO ACTUAL DE SUELOS

La mayoría de espacios aledaños al cauce del río se encuentran como terrenos de cultivo para forraje o pastoreo con presencia de pastizales típicos de la sierra altoandina. En los tramos de relieve plano se encuentran terrenos con cultivos de corto periodo vegetativo y terrenos con pastos naturales destinados a la ganadería.

Las tierras presentes de acuerdo a su uso se pueden dividir en cuatro tipos:

2.3.1. Zona de pastizal y cultivo de secano

Es la zona destinada al uso agrícola (secano) y ganadero. Ocupa la mayor parte de la zona de estudio con desarrollo de sembrío de pastizales y cultivos tales como: papa, cebada, avena, quinua, cañihua, y a la crianza de ganado vacuno generalmente (ver figura N°2.2)

2.3.2. Zona urbana

Es el área plana con desarrollo urbano, las viviendas en esta zona reúnen las condiciones mínimas para ser edificadas y en el que posteriormente su uso pueda desarrollarse adecuadamente. Estas condiciones se refieren fundamentalmente a las dotaciones de agua y energía eléctrica, la evacuación o eliminación de aguas residuales, y posee vías de acceso para interconectarse a otras ciudades.



Figura N°2.2.-Tierras destinadas al uso agrícola y ganadero

2.3.3. Zona rural

Se refiere a la agrupación de viviendas esparcidas en el distrito de Taraco con desarrollo de actividad agrícola y ganadera en su entorno. Asimismo sus viviendas no cuentan con las condiciones mínimas para ser edificadas (ver figura N°2.3)



Figura N°2.3.- Viviendas de la zona rural en el distrito de Taraco

2.3.4. Tierra estéril

Es aquella área en la que no se realiza actividad agrícola o ganadera, por ejemplo, en la zona de estudio tenemos el cerro Hujino ubicado en la comunidad de Collana del distrito de Taraco (ver figura N°2.4), el cual tiene una importancia arqueológica por encontrarse chullpas (antiguas torres funerarias) que probablemente sean de época pre incas, por lo cual le confieren una intangibilidad por conservación del patrimonio arqueológico.



Figura N°2.4.-Cerro Hujino de la comunidad de Collana

En base a estos diferentes tipos de uso del suelo se genera un mapa temático de nuestra área de estudio. Para esto se utiliza la información de catastro proporcionada por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT) y además se usó una escena del satélite Landsat ETM, (path/row: 2/70) del 22 de junio de noviembre del 2006. La imagen fue descargada de manera gratuita desde internet, a través de la interfaz de datos de las ciencias de la Tierra (Earth Science Data Interface ESDI) de la Universidad de Maryland, que posee una resolución espacial de 30m.

Actualmente, el empleo de las imágenes satelitales de teledetección ha demostrado ser una fuente rentable de valiosa información para numerosas aplicaciones. La teledetección es un proceso a través del cual se obtiene información a distancia (sin contacto con los objetos) sobre las características de la superficie terrestre, mediante el sensor y registro de la energía emitida o reflejada por la tierra.

El análisis de la imagen satelital se realizó con el programa Environmental Visualization Images (ENVI), de esta manera la imagen fue corregida. ENVI (Environment for Visualizing Images) es un sistema de procesamiento avanzado de imágenes diseñado para elaborar análisis globales a partir de imágenes tomadas tanto desde satélite como de avión. Proporciona un potente entorno, innovador y de trato amigable para visualizar y tratar imágenes de cualquier talla y tipología en una amplia gama de plataformas hardware.

Una vez corregida la imagen satelital, se generó el mapa de uso del suelo a través del programa ArcGIS Desktop 10. La figura N°2.5 muestra la clasificación del tipo de uso del suelo del área de estudio, esta información es muy valiosa para el análisis de vulnerabilidad que se realizará posteriormente.

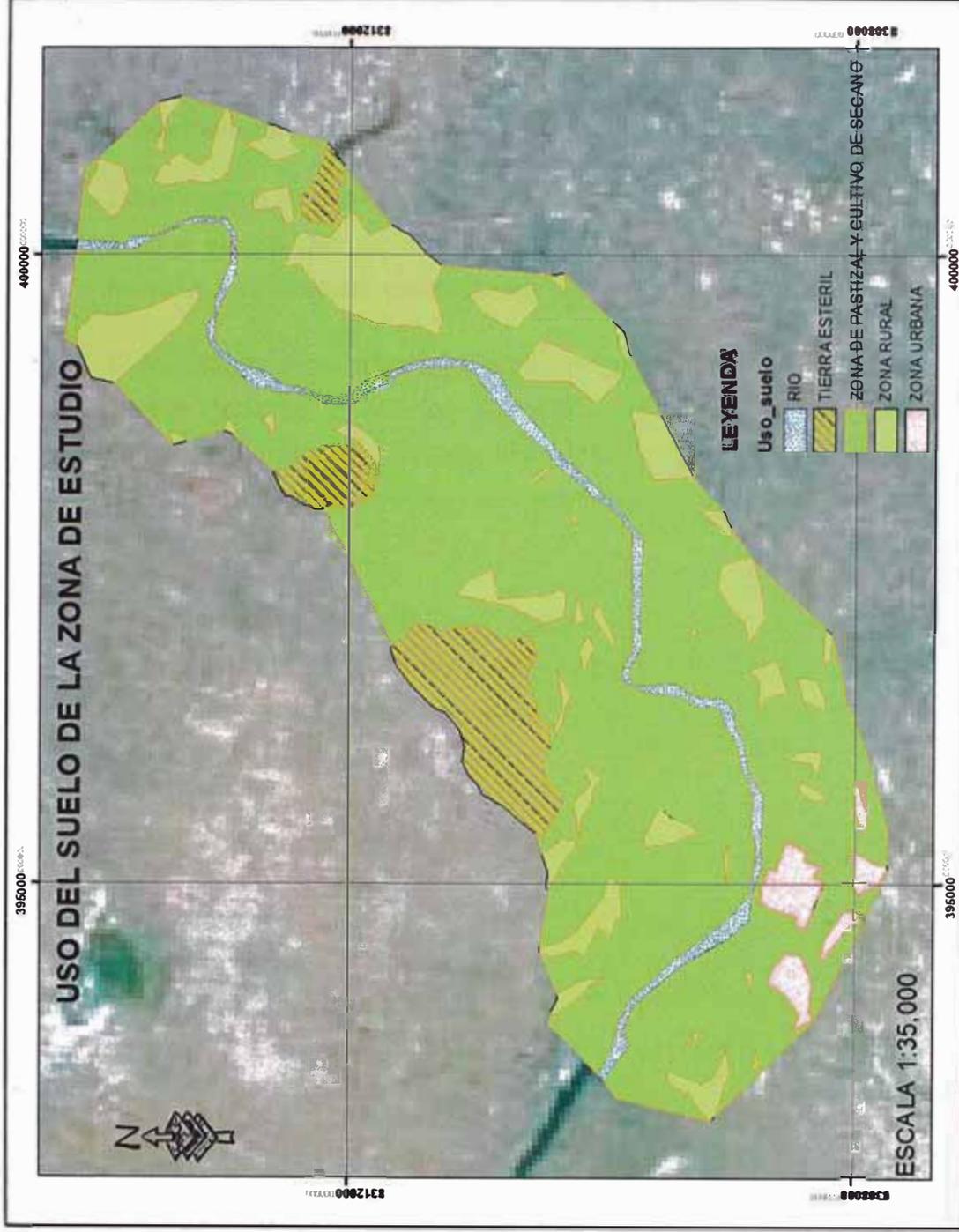


Figura N°2.5.- Uso del suelo de la zona de estudio

2.4. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS Y SOCIOECONÓMICAS

2.4.1. Actividades económicas

Las principales actividades económicas son la agricultura y ganadería en mayor porcentaje, pero también se practica la artesanía e industria.

a. Agricultura

La agricultura se basa en el uso intensivo de la mano de obra generalmente familiar y en el escaso uso de insumos agroquímicos, es decir el trabajo es todavía con métodos tradicionales y de subsistencia.

El sistema de producción agrícola se encuentra orientado al mantenimiento de los suelos mediante la rotación de cultivos, este consiste en alternar cultivos de diferentes familias y con necesidades nutritivas diferentes en un mismo lugar durante distintos ciclos para disminuir los problemas con las plagas y las enfermedades.

La agricultura se desarrolla mayoritariamente bajo el régimen de cultivos en seco, lo que hace a la agricultura vulnerable a los cambios climáticos. Entre los principales cultivos tenemos: la papa, haba, quinua, cañihua, cebada y forrajes (ver cuadro N°2.4)

Cuadro N°2.4.-Producción Agrícola (Ha) del distrito de Taraco

Cultivo	Producción Agrícola (Ha)
Alfalfa	3856.36
Avena Grano	959.26
Avena Forrajera	2838.99
Cebada Forrajera	1927.00
Cebada Grano	447.14
Papa	1869.22
Quinua	1282.41
Habas	846.15
Cañihua	201.5
Otros	2677.96
Total	16,905.99

Fuente: Ministerio de Agricultura

b. Ganadería

La ganadería se desarrolla fundamentalmente en base a la crianza del ganado vacuno, ovino y porcino, cuyo factor limitante es el mejoramiento genético. Únicamente se han realizado incorporaciones de mejores razas para el ganado vacuno y ovino, en el ganado vacuno se ha introducido la raza Brown Swiss para la producción de leche y en el ganado ovino se ha mejorado con la implantación de la crianza de la raza Hampshire Dow para la producción de carne. El cuadro N°2.5 muestra la producción ganadera del distrito de Taraco

Cuadro N°2.5.- Producción Ganadera del distrito de Taraco

Tipo de Ganado	Producción Ganadera
Vacuno	57,195
Ovino	59,903
Equino	5,029
Aves	15,259
Cuyes	9,763
Porcino	10,859

Fuente: Gobierno Regional de Puno

c. Artesanía

La población especialmente de la zona rural son expertos fabricantes de textiles, consistentes en el tejido de mantas o llicllas multicolores de lana de oveja y lana sintética como frazadas, ponchos, etc., como también el extraordinario tejido de Bayeta como chompas y muchísimas prendas más como figuras y adornos de su identidad.

d. Industria

Taraco, al ser considerado como la cuenca lechera del Altiplano, es uno de los productores de queso andino mejorado, debido a que la mayoría de sus pobladores se dedican a la ganadería, como es la crianza de la raza Brown Swiss, lo cual permite la existencia de materia prima (leche) para la elaboración de quesos y en menor escala se produce Yogurt.

2.4.2. Características Demográficas

La población del área de estudio es netamente rural, según el censo del año 2007 la población total del distrito de Taraco corresponde a 14,657 habitantes.

El cuadro N°2.6 muestra la tasa de crecimiento y la población estimada para el año 2013 del distrito de Taraco a partir de los datos del censo del año 1993 y censo del año 2007, la cual presenta una disminución de la población para el año 2013.

Cuadro N°2.6.- Población y tasa de crecimiento intercensal anual del distrito de Taraco

Distrito	Población 1993	Población 2007	Tasa de crecimiento	Población Estimada 2013
Taraco	15,817	14,657	-0.54%	14,186

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2007

Esta estimación realizada por el INEI para el 2013 demuestra que los pobladores de la zona tratan de emigrar a otros lugares en búsqueda de mejores oportunidades, ya que el Estado no soluciona los problemas de este sector rural.

2.4.3. Características de las viviendas

Debido a que la población es netamente rural, el material de construcción de las viviendas básicamente es de material rustico, es decir, paredes de adobe, techos de calamina y piso de tierra, pero existe un pequeño sector urbano en la que el material de construcción de sus viviendas es de concreto.

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática las viviendas del distrito de Taraco están construidas de adobe en un 98.85%, ladrillo en un 0.43% y piedra con barro en un 0.28% de un total de 3,986 viviendas (ver cuadro N°2.7).

Cuadro N°2.7.- Material de las viviendas

Material	Taraco	%
Ladrillo	17	0.43%
Adobe	3,940	98.85%
Piedra con barro	11	0.28%
Otro	18	0.44%
Total	3,986	100%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2007

2.4.4. Servicios básicos de las viviendas

El servicio básico de las viviendas para la población de nuestra área de estudio se caracteriza por una gran deficiencia en los servicios de agua, desagüe y electrificación. A continuación se describen las diferentes formas de servicios de agua, desagüe y electrificación de las viviendas del distrito de Taraco realizada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática en el 2007.

a. Servicio de Agua

En el cuadro N° 2.8 observamos que el 78.02% de la población consume agua de pozo, el 0.03% posee una red pública fuera de la vivienda y el 4.51% consume agua de río, acequia o manantial. Cuando ocurre una inundación, sea en el margen derecho o izquierdo del río Ramis, la población tiene que consumir agua contaminada, puesto que el agua del río Ramis trae consigo residuos, que son producto de la minería informal realizada en la cuenca alta del río.

Cuadro N°2.8.- Abastecimiento de agua de las viviendas

Abastecimiento de agua	Taraco	%
Red pública dentro de la vivienda	2	0.05%
Red pública fuera de la vivienda	1	0.03%
Pilón de uso público	3	0.07%
Camión-cisterna	2	0.05%
Pozo	3,110	78.02%
Río, acequia o manantial	180	4.51%
Otros	688	17.27%
Total	3,986	100%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2007

b. Servicio de Desagüe

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática el servicio higiénico es dividido en seis categorías, de los cuales en el distrito de Taraco, el 66.08% de las viviendas tiene un pozo ciego o letrina, el 26.77% de las viviendas no posee, el 6.89% posee en pozo séptico (ver cuadro N°2.9).

Cuadro N°2.9.- Servicio higiénico de las viviendas

Servicio Higiénico	Taraco	%
Red Publica dentro de la vivienda	0	0.00%
Red Publica fuera de la vivienda	0	0.00%
Pozo séptico	275	6.89%
Pozo ciego/letrina	2,634	66.08%
Rio, acequia o manantial	10	0.26%
No tiene	1,067	26.77%
Total	3,986	100%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2007

c. Servicio de Electrificación

Respecto a la tenencia de alumbrado eléctrico de las viviendas, el 75.97% de estas posee. Sin embargo un 24.03% carece del servicio (ver cuadro N°2.10).

Cuadro N°2.10.- Alumbrado eléctrico de las viviendas

Alumbrado eléctrico	Taraco	%
Si tiene alumbrado publico	3,028	75.97%
No tiene alumbrado publico	958	24.03%
Total	3,986	100%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2007

CAPITULO III

ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

3.1. INTRODUCCION

En este capítulo se realiza el estudio hidrológico e hidráulico del río Ramis que corresponde al tramo de estudio. El estudio hidrológico corresponde al análisis de máximas avenidas y el estudio hidráulico consiste en simular el desarrollo del comportamiento del perfil hidráulico del río Ramis para los diferentes caudales, cuya finalidad es obtener los niveles de la superficie de agua en el río ante una inundación.

Esta simulación hidráulica implica la aplicación de un modelo bidimensional, el software utilizado es el River 2D, desarrollado por la Universidad de Alberta en Canadá.

3.2. ESTUDIO HIDROLOGICO

3.2.1. Descripción de la cuenca del río Ramis

La cuenca del río Ramis, afluente del Lago Titicaca, se encuentra ubicada en la parte norte del departamento de Puno, Perú y geográficamente se ubica entre las latitudes 69°25'28.46" a 71°06'36.24" Oeste y entre las longitudes 15°26'35.33" a los 14°03'25.10" Sur, en una altitud que varía entre los 3,802 msnm, en la desembocadura al lago, y hasta los 5,694 msnm en el nevado Ananea.

Hidrográficamente pertenece a la cuenca del lago Titicaca y limita por el norte con la cuenca del río Inambari, por el sur con la cuenca del río Coata, por el este con las cuencas de los ríos Huancané y Suches, y por el oeste con la cuenca del río Vilcanota.

En la figura N°3.1 se muestra la cuenca del río Ramis, la cual está dividida en 2 subcuencas que conforman un área total de 14,306.55 Km².

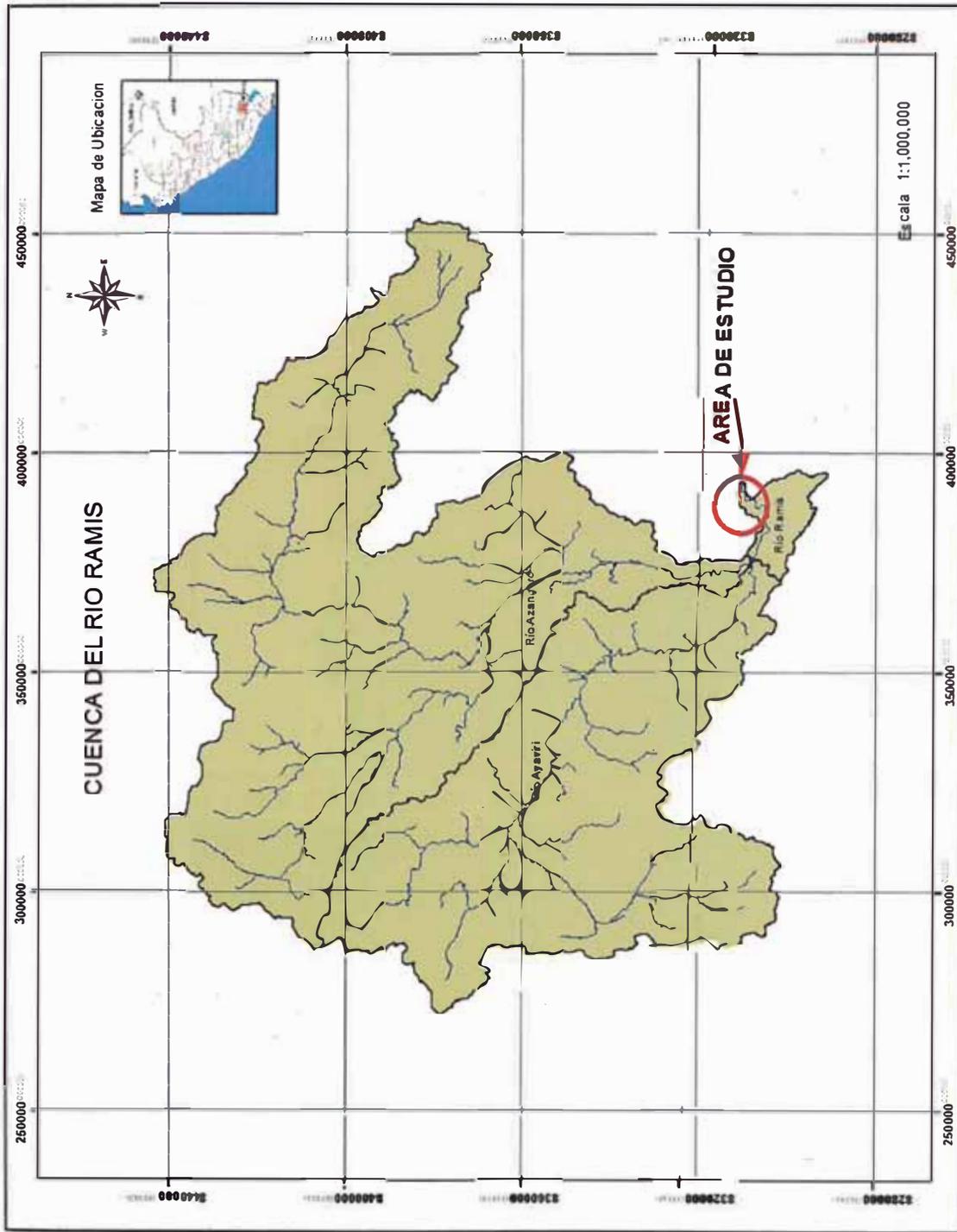


Figura N°3.1.- Cuenca del río Ramis

Además en la figura N°3.2 se muestra la ubicación de la cuenca del río Ramis en la región Puno y el área de estudio.



Figura N°3.2.- Ubicación de la cuenca del río Ramis en la región Puno

3.2.2. Análisis de máximas avenidas del río Ramis

a. Generalidades

La información usada en los estudios es la de la estación hidrométrica que se localiza en la zona del Puente Ramis, ubicado a una latitud $15^{\circ}15'06''$ Sur, longitud $69^{\circ}52'17''$ Oeste y altitud de 3813 msnm, aproximadamente a unos 7.5 Km de la

desembocadura del río en el Lago Titicaca, de la cual se obtuvo la información de los caudales máximos diarios desde un periodo de 1965-2010.

Con esta información se realiza el análisis de frecuencia de máximas avenidas, en la cual el caudal es considerado como una variable aleatoria continua, que permite evaluar su distribución estadística, el cual puede ser ajustado a una distribución de probabilidad teórica.

b. Prueba de Bondad de Ajuste de la Información Hidrológica

El cuadro N°3.1 se muestra los caudales máximos diarios registrados en la estación hidrométrica Puente Ramis durante un periodo de 43 años.

Cuadro N°3.1.- Caudales máximos diarios (m³/s) durante 1965-2010

Año	Qmax
1965	342.5
1966	270.6
1967	260.2
1968	289.0
1969	175.2
1970	404.8
1971	554.0
1972	331.4
1973	442.5
1974	623.5
1975	405.0
1976	362.0
1977	494.5
1978	442.0
1979	346.5
1980	346.8
1981	426.0
1982	406.2
1983	118.0
1984	464.2
1985	411.9
1986	480.0
1987	260.0
1988	392.0
1989	256.6
1990	135.4
1991	151.0
1992	285.5
1993	336.0
1994	418.0
1996	406.9

Cuadro N°3.1.- (Continuación)

Año	Qmax
1997	391.6
2000	418.0
2001	434.7
2002	395.1
2003	484.2
2004	495.4
2005	426.9
2006	369.3
2007	441.8
2008	246.7
2009	215.2
2010	331.2
Media (\bar{Q})	364.84
D. estándar(S_Q)	110.38

Fuente: SENAMHI

Con el fin de obtener la función de probabilidad que mejor se ajusta a la muestra se aplica la prueba de bondad Smirnov-Kolmogorov. El análisis de la prueba de bondad de ajuste se muestran en el anexo 1B y los estudios indican que la función de probabilidad que mejor se ajusta a la muestra es la función Gumbel.

c. Cálculo de Máximas Avenidas con diferentes periodos de retorno

El periodo de retorno (T_r) se define como el intervalo promedio de tiempo en años, dentro del cual un evento de magnitud x puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Así, si un evento igual o mayor a x , ocurre una vez en T años, su probabilidad de ocurrencia P , es igual a 1 en T_r casos, es decir:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T_r} \quad (3.1)$$

El caudal máximo para diferentes periodos de retorno (Q_T) de una distribución de probabilidad puede representarse como la media \bar{Q} mas una desviación con respecto a la media, está desviación es igual al producto de la desviación estándar (S_Q) y el factor de frecuencia (K_T):

$$Q_T = \bar{Q} + K_T S_Q \quad (3.2)$$

El factor de frecuencia (K_T) depende del periodo de retorno (T_r) y de la función de distribución, para la función Gumbel el factor de frecuencia es:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \right\}$$

Aplicando la ecuación (3.2) se encuentra los caudales para los diferentes periodos de retorno para la distribución Gumbel como se muestra en el cuadro N°3.2

Cuadro N°3.2.- Caudales máximos para los periodos de retorno

Periodo de retorno (T_r)	Factor de frecuencia (K_T)	Caudal (m^3/s)
5	0.719	444.26
10	1.305	508.84
25	2.044	590.44
50	2.592	650.97
100	3.136	711.06

Fuente: Elaboración Propia

3.3. ESTUDIO HIDRAULICO

3.3.1. Generalidades

La zona de estudio se desarrolla en la cuenca baja del río Ramis entre los lagos Arapa y Titicaca, en una zona principalmente rural con grandes áreas destinadas a la agricultura y ganadería, en donde existe una pendiente suave, prácticamente plana. Estas zonas presentan un alto nivel freático en los meses de avenida debido a la excesiva recarga proveniente de las lluvias que dañan las áreas de cultivos, estas lluvias también generan las elevaciones en el nivel de los lagos Arapa y Titicaca. La evacuación de aguas hacia el río se dificulta por la escasa diferencia de nivel que existe en las proximidades del río.

Por estas características, en esta zona existen dos tipos de inundaciones: las inundaciones de evolución lenta, que resultan de la elevación del nivel de los lagos Titicaca y Arapa, y las inundaciones de evolución relativamente rápida, que suceden en las riberas del río Ramis, cuando la capacidad de transporte es insuficiente en el canal principal. Esto significa que los mayores daños ocurren por simultaneidad de ambos tipos de inundación, por ello se hace necesario conocer los niveles del lago Titicaca. En su historia el nivel del lago Titicaca alcanzó su máximo valor en abril de 1986 (3812,47 msnm) y su mínimo valor en diciembre de 1943

(3806,10 msnm). Todas estas características peculiares de la zona de estudio involucran buscar una solución compleja, que integre la protección contra inundaciones y garantice un desarrollo agrícola y ganadero de esta zona, que son sus principales actividades económicas. Históricamente algo similar realizaron los holandeses en el siglo XII a través del modelo agrícola Polder al recuperar áreas situadas a las orillas del mar, que se hallan a su mismo nivel o inferior, para darles de esta forma un aprovechamiento agrícola.

La presente tesis estudia el río Ramis en una longitud de 12 Km aproximadamente que se dividirá en cuatro tramos para el modelamiento en el River2D, en la figura N°3.3 se muestran los 4 tramos de estudio del río Ramis que está comprendida entre las sección de inicio A y sección final B.

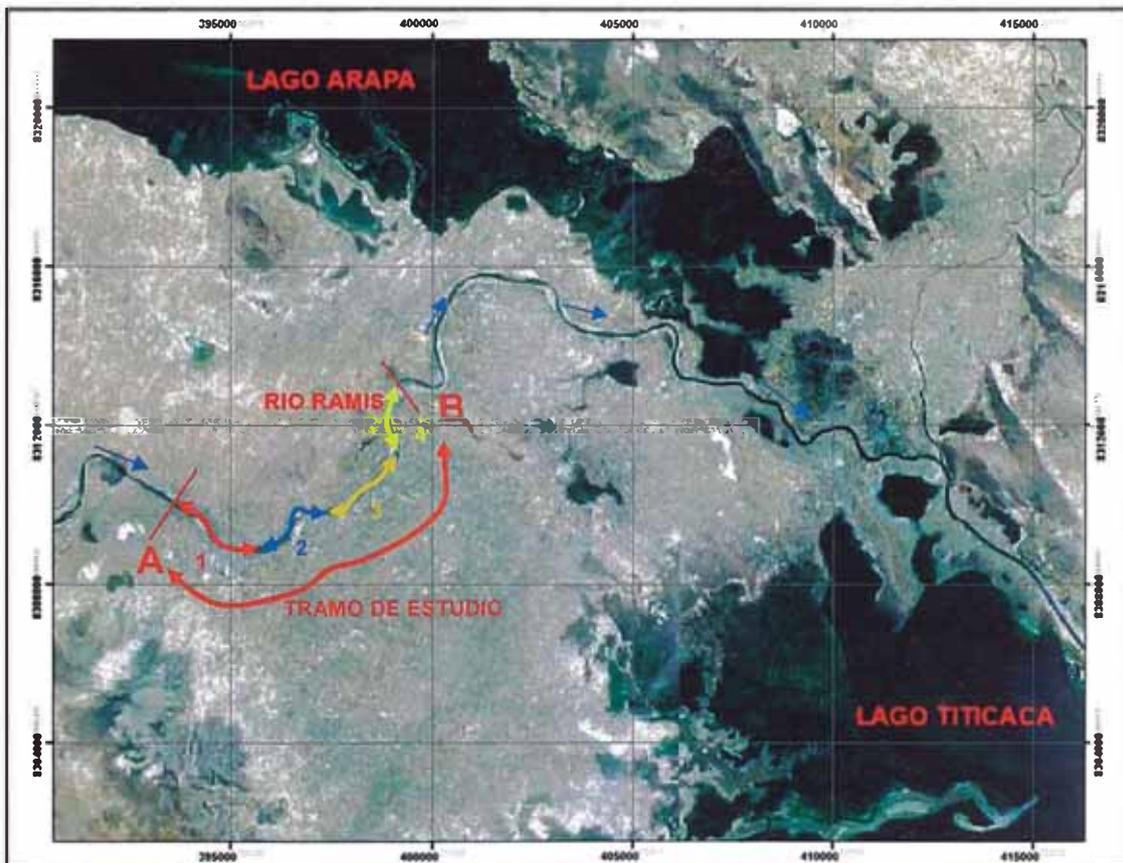


Figura N°3.3.- Tramos de estudio del río Ramis

El cuadro N°3.3 muestra las coordenadas del tramo de estudio del río Ramis comprendidas entre las sección A (aguas arriba) y la sección B (aguas abajo).

Cuadro N°3.3.- Coordenadas del tramo de estudio del río Ramis

Tramo de Estudio	Coordenadas Geográficas	
	Longitud	Latitud
Sección A	69°58'58.81"O	15°17'30.04"S
Sección B	69°55'49.28"O	15°14'34.81"S

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Descripción del modelo hidráulico River2D

El modelo hidráulico a usar es el modelo River2D, el cual es un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en profundidad mediante elementos finitos desarrollado por la Universidad de Alberta en Canadá. Emplea el modelo de elementos finitos de Petrov-Galerkin que es numéricamente mucho más estable que el empleado por otros modelos.

El programa es gratuito y se encuentra en la página web: www.river2d.ca. La fundamentación teórica en la que se basa el River2D son los principios físicos de conservación de masa y la cantidad de movimiento en sus dos direcciones "x" e "y".

a. Ecuación de Conservación de Masa

Consideremos una columna imaginaria en un flujo de río, formado por un elemento rectangular en planta de dimensiones " Δx " y " Δy ", y que se extiende a través de una profundidad de agua "H" como se muestra en la figura 3.4. La conservación de masa para este volumen de control dice que: "La tasa de cambio del volumen del agua del elemento en el tiempo es igual a la tasa neta del flujo del agua del elemento a través de los lados"

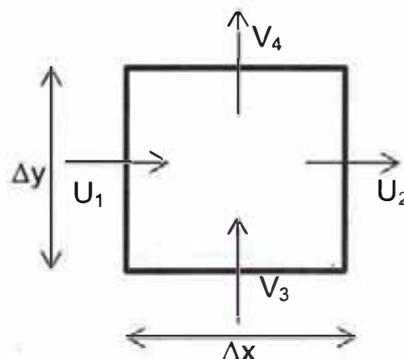


Figura N°3.4.- Elemento rectangular de dimensiones Δx y Δy

$$\frac{\Delta x \Delta y \Delta H}{\Delta t} = H_1 U_1 \Delta y - H_2 U_2 \Delta y + H_3 V_3 \Delta x - H_4 V_4 \Delta x \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{H_1 U_1 - H_2 U_2}{\Delta x} + \frac{H_3 V_3 - H_4 V_4}{\Delta y}$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} + \frac{\Delta(HU)}{\Delta x} + \frac{\Delta(HV)}{\Delta y}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

La ecuación 3.3 de conservación de masa nos da una relación para la profundidad y las dos componentes de la velocidad para cada punto en el flujo.

b. Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento

Consideremos las fuerzas que actúan en el elemento rectangular de dimensiones “ Δx ” e “ Δy ” descrito anteriormente (ver figura N°3.5). La conservación de la cantidad de movimiento en la dirección x para este volumen de control dice que: “La tasa de cambio de la cantidad de movimiento en x del elemento en el tiempo es igual a la tasa neta de entrada de la cantidad de movimiento en x por los lados del elemento más la fuerza neta que actúa en el elemento en la dirección x”

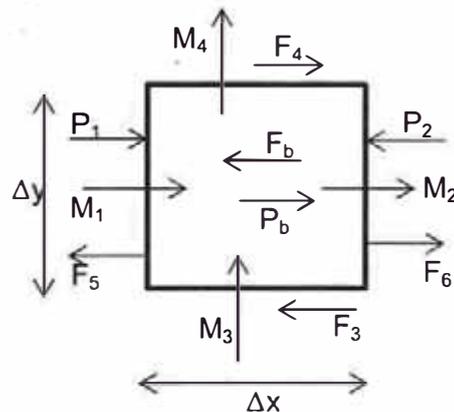


Figura N°3.5.- Fuerzas que actúan en el elemento rectangular

$$\frac{\Delta M_x}{\Delta t} = (M_1 - M_2) + (M_3 - M_4) + (P_1 - P_2) + P_b - F_b + F_4 - F_3 + F_6 - F_5 \quad (3.4)$$

Donde:

P_1, P_2 : Fuerzas de presión en los lados del elemento

P_b : Fuerza de presión debido a la pendiente del fondo

M_1, M_2 : Cantidad de movimiento del flujo en la dirección del componente

M_3, M_4 : Cantidad de movimiento en "x" llevados por el componente de velocidad transversal

F_b : Fuerza de fricción del fondo

F_3, F_4 : Fuerzas cortantes transversales debido a la turbulencia

F_5, F_6 : Fuerzas normales debido a la turbulencia

La razón de cambio de la cantidad de movimiento puede ser evaluada como:

$$\frac{\Delta M_x}{\Delta t} = \rho \Delta x \Delta y \frac{\Delta(HU)}{\Delta t}$$

Asumiendo que las velocidades son constantes a través de la profundidad, la cantidad de movimiento en la dirección del componente son:

$$M_1 = \rho \Delta y H_1 U_1^2, M_2 = \rho \Delta y H_2 U_2^2$$

La cantidad de movimiento en x llevados por los componentes de velocidad transversal son:

$$M_3 = \rho \Delta x H_3 U_3 V_3, M_4 = \rho \Delta y H_4 U_4 V_4$$

Para la suposición de distribución de presión hidrostática, las fuerzas de presión pueden ser evaluadas en términos de profundidad como:

$$P_1 = \rho g \Delta y \frac{H_1^2}{2}, P_2 = \rho g \Delta y \frac{H_2^2}{2}, P_b = \rho g \Delta x \Delta y H S_{0x}$$

Donde:

S_{0x} : Pendiente del fondo en la dirección x

La cortante en el fondo y lados del elemento puede expresarse como esfuerzos cortante multiplicadas por las áreas:

$$\begin{aligned} F_b &= \tau_{bx} \Delta x \Delta y & F_3 &= \Delta x H_3 \tau_{xy3} & F_4 &= \Delta x H_4 \tau_{xy4} \\ F_5 &= \Delta y H_5 \tau_{xx5} & F_6 &= \Delta y H_6 \tau_{xx6} \end{aligned}$$

Sustituyendo estas fórmulas en la ecuación 3.4 y después de algunos pasos matemáticos, la ecuación de conservación de velocidad adquirida en x es obtenida como:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(Uq_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq_x)}{\partial y} + \frac{g}{2} \frac{\partial(H^2)}{\partial x} = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \quad (3.5)$$

Donde: $S_{fx} = \tau_{bx} / (\rho g H)$ es la pendiente de fricción

Los términos de la pendiente de fricción dependen de los esfuerzos cortantes del fondo que a su vez se relacionan con la magnitud y dirección de velocidad promediada en la vertical. En la dirección x, por ejemplo:

$$S_{fx} = \frac{\tau_{bx}}{\rho g H} = \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{g H C_s^2} \quad (3.6)$$

Donde τ_{bx} es el esfuerzo cortante de fondo en la dirección X y C_s es el coeficiente de Chezy adimensional. Este coeficiente se relaciona con la altura de rugosidad absoluta del lecho (k_s) y la profundidad del flujo.

$$C_s = 5.75 \log \left(\frac{12H}{k_s} \right) \quad (3.7)$$

Para una profundidad de agua dada "H", los coeficientes de Manning (n) y k_s se relacionan mediante:

$$k_s = \frac{12H}{e^m} \quad (3.8)$$

$$m = \frac{H^{1/6}}{2.5n\sqrt{g}} \quad (3.9)$$

Los esfuerzos cortantes turbulentos transversales promediados en la vertical son modelados con formulación de viscosidad de remolinos de tipo Bousinessqui, por ejemplo:

$$\tau_{xy} = V_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

Donde V_t es el coeficiente viscosidad de remolinos.

De la misma manera en la dirección y, el proceso es el mismo y la ecuación resultante es similar, entonces la conservación de la cantidad de movimiento en y:

$$\frac{\partial qy}{\partial t} + \frac{\partial(Uqy)}{\partial x} + \frac{\partial(Vqy)}{\partial y} + \frac{g}{2} \frac{\partial(H^2)}{\partial y} = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \quad (3.11)$$

Donde:

H : Profundidad del flujo

U, V : Velocidades de profundidad promedio en las direcciones x e y respectivamente

- q_x, q_y : Intensidades de descarga que se relacionan a través de la componente velocidad ($q_x = HU, q_y = HV$)
- g : Gravedad
- ρ : Densidad del agua
- S_{0x}, S_{0y} : Pendientes del fondo en las direcciones x e y
- S_{fx}, S_{fy} : Pendientes de fricción en las direcciones x e y
- $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$: Componentes horizontales de esfuerzos turbulentos

3.3.3. Modelación numérica del River2D

a. Método de Elementos Finitos (MEF)

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales por medio de aproximaciones discretas. El método de elementos finitos, conocido como el método residual ponderado, supone que la zona de solución está compuesta de muchas subzonas interconectadas, las que se denominan elementos finitos. Estos elementos, los que pueden tomar formas simples (por ejemplo, líneas, triángulos, rectángulos, etc.), se ensamblan de diferentes maneras para representar la solución sobre una región cualquiera, este proceso se llama discretización.

La figura N°3.6 muestra dos ejemplos de discretización mediante los elementos finitos, la imagen del lado izquierdo discretiza una red de tuberías y la imagen del lado derecho muestra la discretización de un sistema continuo bidimensional.

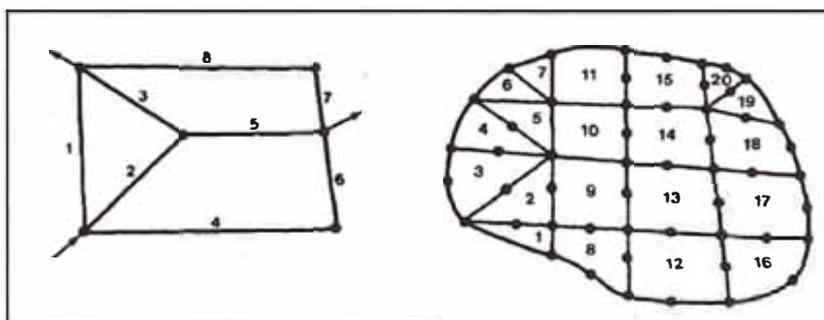


Figura N°3.6.- Ejemplos de discretización de elementos finitos

b. Discretización de las ecuaciones

Las ecuaciones de continuidad y de velocidad adquirida de profundidad promedio del flujo pueden escribirse en la forma abreviada como:

$$C(H, U, V) = 0$$

$$M_x(H, U, V) = 0$$

$$M_y (H, U, V) = 0$$

La idea es que las ecuaciones que gobiernan pueden ser resueltas aproximadamente por el uso de una "función prueba" que se especifica, pero tiene varios ajustes de los grados de libertad. Si nosotros introducimos las funciones de prueba para las variables H, U, y V; denotado por H^{\wedge} , U^{\wedge} , y V^{\wedge} , y las sustituimos en las ecuaciones, ellas no satisfarán las ecuaciones exactamente. Un residuo resultará como:

$$C (H^{\wedge}, U^{\wedge}, V^{\wedge}) = R_c$$

$$M_x (H^{\wedge}, U^{\wedge}, V^{\wedge}) = R_x$$

$$M_y (H^{\wedge}, U^{\wedge}, V^{\wedge}) = R_y$$

El objetivo es ahora hacer los residuos tan pequeño como sea posible. El aproximar al residual ponderado es multiplicar el residuo por una función ponderada, que es la función de prueba, integrando encima del área entera y colocar el resultado a cero. Para cada grado de libertad en la función de prueba, una separada función ponderada es usada para generar el mismo número de ecuaciones como de incógnitas. La ecuación de continuidad, para el ejemplo, se vuelve:

$$\int N_i C(H^{\wedge}, U^{\wedge}, V^{\wedge}) dA = 0 \quad (3.12)$$

Donde N_i es la i-ésima función de prueba. La integración encima del área sirve para reducir la distribución espacial a sólo una cantidad.

El primer paso es dividir el dominio en una serie de elementos finitos y escoger una buena función de prueba suficiente para que trabaje en diferentes situaciones. En tal caso, las aproximaciones son propiamente interpolaciones. Las funciones de prueba o interpolación pueden ser escritas para cada punto como:

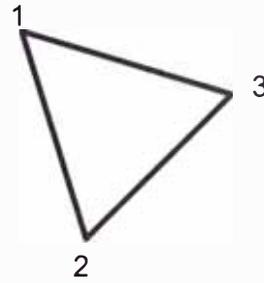
$$H^{\wedge} = \sum_{i=1}^n N_i \times H_i \quad (3.13)$$

Estas funciones de interpolación son consideradas a ser locales en ellos sólo se extienden de un nodo particular cerca a los nodos vecinos. Fuera de esa área, ellos son cero, por ejemplo la función de interpolación para un elemento finito triangular es la siguiente:

$$H^{\wedge} = N_1(x,y)H_1 + N_2(x,y)H_2 + N_3(x,y)H_3 \quad (3.14)$$

$$N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y)$$

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_m - x_m y_j \\ b_i &= y_j - y_m \\ c_i &= x_m - x_j \end{aligned} \quad A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_i & x_j & x_m \\ y_i & y_j & y_m \end{vmatrix}$$



Donde i, j, m son permutaciones cíclicas de los vértices 1, 2, 3 del triángulo.

La operación de integración presentada en la ecuación 3.9 es llevada a cabo como una suma de integrales del elemento en el método de elementos finitos, esto permitirá describir el comportamiento de un elemento individual. Para un triángulo lineal, con tres nodos, un total de nueve integrales son requeridas (la combinación de tres funciones básicas con tres funciones de prueba), aun cuando hay miles de otros nodos.

Luego de haber analizado las ecuaciones individuales (por elementos) estas se pueden combinar o ensamblar para crear la ecuación matricial global y luego incorporar las condiciones de borde.

c. Método de Solución

Las ecuaciones no lineales pueden ser resueltas por métodos implícitos o explícitos. En el River2D, se emplea el método implícito de Newton-Raphson. Supongamos que tenemos un sistema de ecuaciones no lineales del tipo:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

⋮

⋮

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Estas ecuaciones pueden ser representadas por $F(x)=0$. Para solucionar este sistema de ecuaciones mediante el algoritmo del método de Newton-Raphson se utiliza la siguiente expresión:

$$x^n = x^{n-1} - J^{-1}(x^{n-1})F(x^{n-1}) \quad (3.15)$$

Donde:

x^{n-1} : Solución en la iteración anterior al n-esimo

x^n : Solución en la iteración n-esimo

J^{-1} : Representa la matriz inversa del Jacobiano, que está dado por:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

La ecuación 3.12 se realizara tantas veces hasta que converja la solución con una tolerancia aceptable.

3.3.4. Modelamiento hidráulico del río Ramis con el River2D

El modelamiento hidráulico en el software River2D comprende la interacción de tres programas: R2D_Bed, R2D_Mesh y River2D.

a. Trabajo en el R2D_Bed

Los dos factores físicos para trabajar en el R2D_Bed son las: cotas y la rugosidad del cauce del río Ramis y de la llanura de inundación.

La información batimétrica y topográfica para la realización del modelo hidráulico fue proporcionada por la Dirección de Estudios del Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT), con una precisión de las curvas de nivel de cada metro. Asimismo para construir y ampliar la llanura de inundación se utilizó la escena del modelo digital de elevaciones STRM (path/row: 2/70) de resolución espacial de 90 m obtenido desde internet, a través de la interfaz de datos de las ciencias de la Tierra (Earth Science Data Interface ESDI) de la Universidad de Maryland.

El plano P-1 del anexo 4 muestra el modelo digital de elevaciones del río Ramis y de la llanura de inundación utilizada en el modelamiento hidráulico.

El otro factor físico importante es el coeficiente de Manning (n), este coeficiente depende de muchos factores como: la aspereza de la superficie, vegetación, irregularidades del canal, alineamiento del canal, obstrucciones y otros. Para nuestro estudio se determina este valor a partir de la ecuación propuesta por Cowan:

$$n=(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4)m_5 \quad (3.16)$$

Donde:

- n_0 : Valor que depende de la aspereza
- n_1 : Valor que depende de las irregularidades
- n_2 : Valor que toma en cuenta las variaciones de forma de la sección transversal
- n_3 : Valor que depende de las obstrucciones
- n_4 : Valor que toma en cuenta la vegetación
- m_5 : Factor que toma en cuenta los meandros

Los valores apropiados de n_0 , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 y m_5 pueden seleccionarse en el cuadro N°3.4 de acuerdo a las condiciones dadas. Estos valores se seleccionaron en función a la inspección de campo realizada al río Ramis. Aplicando la ecuación (3.12) determinamos el coeficiente de Manning:

$$n = (0.02+0.005+0+0+0.005) \times 1$$

$$n = 0.03$$

Cuadro N°3.4.- Valores para el cálculo del coeficiente de Manning

Superficie de canal	Tierra	n_0	0.020
	Roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
Irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderada		0.010
	Severa		0.020
Variación de la sección	Gradual	n_2	0.000
	Ocasional		0.005
	Frecuente		0.010-0.015
Efecto de obstrucción	Despreciable	n_3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Bajo	n_4	0.005-0.010
	Medio		0.010-0.025
	Alto		0.025-0.050
	Muy alto		0.050-0.100
Intensidad de meandros	Menor	m_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Fuente: Ven Te Chow

Para las llanuras de inundación con pastizales sin matorrales con pasto corto se recomienda un valor del coeficiente de Manning entre 0.025 a 0.035 (referencia Ven Te Chow). Para el estudio se tomara un valor de 0.03 para la llanura de inundación.

Cabe mencionar que este parámetro, debe ingresarse como altura de rugosidad absoluta (k_s). A fin de expresar las rugosidades para un correspondiente coeficiente de Manning, para ello se utiliza las ecuaciones (3.8) y (3.9). De esta manera se obtuvo el valor de rugosidad absoluta de 0.229m para el modelo hidráulico.

Con estos dos parámetros físicos se obtiene la representación del cauce del río Ramis y de la llanura de inundación, los mismos que deberán ser ingresados al programa R2D_Bed a través de un archivo de bloc de notas, el cual debe contener las características de cada nodo, es decir, número de punto, coordenadas (x, y), elevación (cotas) y altura de rugosidad (k_s), esto se realizó con la ayuda del ArcGIS Desktop 10.

Una vez ingresado los datos, se realiza la triangulación para obtener la representación de la topografía adecuada del tramo de estudio, quizás sea necesario la creación de líneas de corte (breaklines), las cuales se emplean en cualquier modelo topográfico para indicar cambios bruscos en la pendiente del terreno, como puede ser el pie y corona de un talud. Por eso deberían ir en la parte inferior y superior de las márgenes del río Ramis.

La figura N°3.7 muestra la topografía del primer tramo del cauce del río Ramis obtenida en el R2D_Bed, en donde se diferencia el cauce principal de la llanura de inundación en el río Ramis y la figura N°3.8 muestra la altura de rugosidad asociado al tramo de estudio.

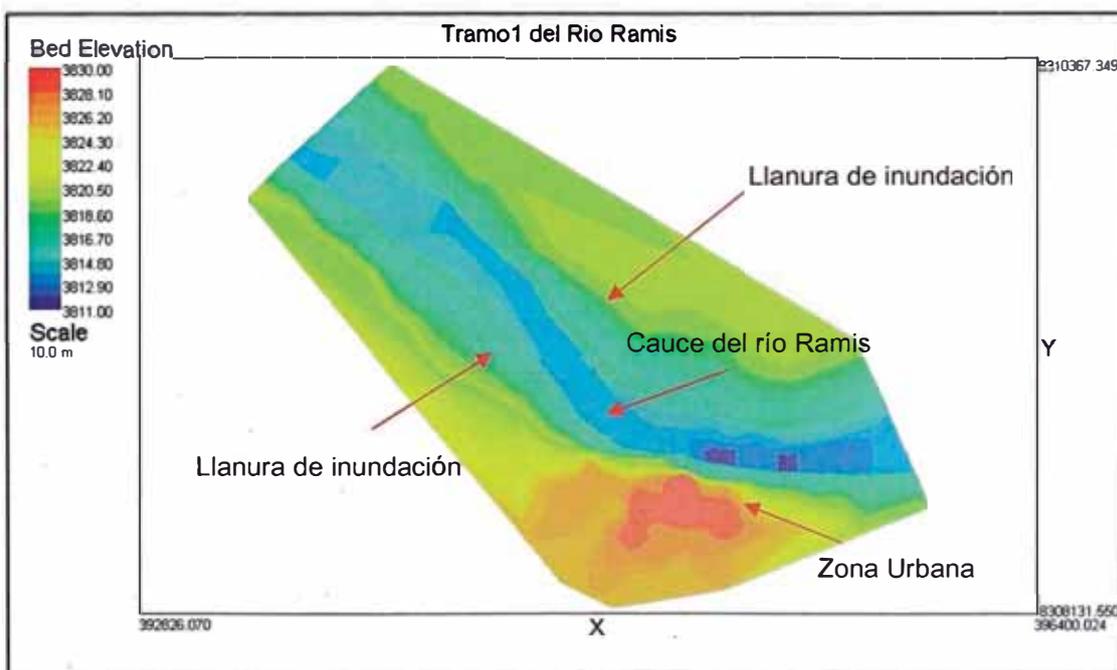


Figura N°3.7.- Topografía del primer tramo del río Ramis en el R2D_Bed

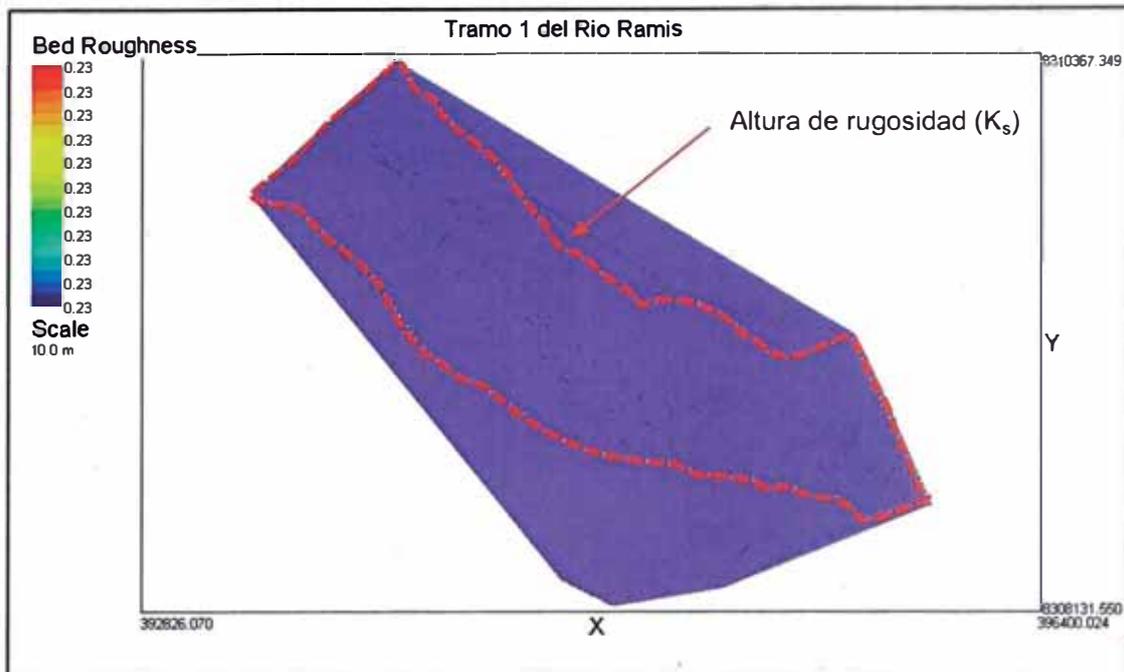


Figura N°3.8.- Altura de rugosidad del primer tramo del río Ramis en el R2D_Bed

b. Trabajo en el R2D_Mesh

El trabajo en R2D_Mesh consiste en generar la malla de elementos finitos triangulares, y se realiza de la siguiente manera:

Definición del límite: El primer paso para la generación de la malla de elementos finitos es determinar el área a modelar, la figura N°3.9 muestra el límite del primer tramo que será modelado en el río Ramis, de la misma manera se realiza para los tres tramos restantes del análisis hidráulico.

Definición de la condición de Borde: Una vez definido nuestra área a modelar, determinamos las condiciones de borde: condiciones aguas arriba (caudales) y las condiciones aguas abajo (elevaciones de niveles de agua). Las condiciones de borde aguas arriba para nuestro estudio son los caudales que se obtuvieron en el cuadro N°3.2 para los diferentes periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Las condiciones de borde aguas abajo se determinaron con el HEC-RAS, partiendo del hecho que el nivel máximo histórico del lago Titicaca para el análisis es de 3812,47 msnm, estos resultados se muestran en el anexo 2A. La elevación del nivel de agua obtenido en el HEC-RAS en la sección B (sección aguas abajo del tramo de estudio) se muestra en el cuadro N°3.5. Con esta información se ingresa las

condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo para el tramo de estudio del río Ramis.

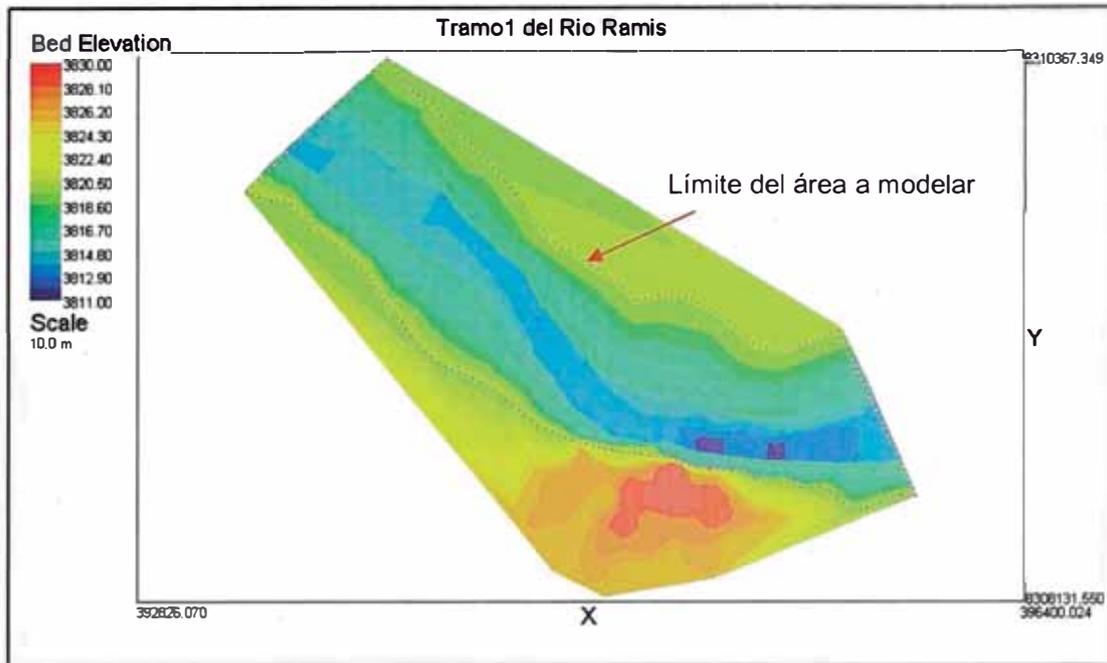


Figura N°3.9.- Limite del área a modelar en el primer tramo

Cuadro N°3.5.- Elevaciones del nivel de agua para los periodos de retorno obtenidos con el HEC-RAS

Periodo de retorno (T_r)	Caudal(m^3/s)	Elevación del nivel de agua (msnm)
5	444.26	3814.57
10	508.84	3814.82
25	590.44	3815.12
50	650.97	3815.33
100	711.06	3815.53

Fuente: Elaboración Propia

Discretización: El siguiente paso es generar nuestra malla de elementos finitos, las mallas empleadas para los 4 tramos de estudio están compuestas por elementos de forma de triángulos equiláteros de 15 m en las zonas del cauce principal y la llanura de inundación, se adoptaron estos tamaños a fin de capturar los patrones geométricos del cauce del río Ramis con una adecuada resolución.

Triangulación: Una vez realizada la discretización se procede a la triangulación, generación de los elementos triangulares que conforman la malla de elementos finitos.

Aplanado de malla: El aplanado se realiza con el fin de mejorar la distribución de los nodos y formar triángulos más regulares en las zonas del modelamiento, pero esto a su vez genera una alteración en la densidad del mallado, es decir, afecta el valor QI (Quality Index). El QI (Quality Index) es un índice de calidad de malla que puede ser utilizado como una guía aproximada, el valor de QI es el valor mínimo del "triángulo de calidad" para todos los triángulos generados, esta calidad se define como la relación de área de un triángulo a área de la circunferencia circunscrita (circunferencia que pasa a través de los tres puntos del triángulo), esto en función a la relación correspondiente para un triángulo equilátero. Por lo tanto, una malla ideal está formado por triángulos equiláteros que tendrían un QI de 1, pero mallas reales tendrían un QI de menos de 1. Los valores aceptables típicos para QI pueden estar en el orden de 0.15 a 0.5. Para este modelamiento nuestro QI está entre 0.20 y 0.30, que son valores aceptables.

El cuadro N°3.6 muestra las características de la malla generada en cada uno de los cuatro tramos de la modelación hidráulica, en donde observamos la cantidad de nodos, la cantidad de elementos finitos y los valores del QI (Quality Index)

Cuadro N°3.6.- Características de la malla generada en los 4 tramos del río Ramis

Tramo del río Ramis	Número de nodos	Número de elementos finitos	Quality Index(QI)
Tramo 1	13,197	25,822	0.20
Tramo 2	14,490	28,421	0.25
Tramo 3	15,043	29,570	0.30
Tramo 4	14,680	28,939	0.22

Fuente: Elaboración Propia

Corrección en áreas críticas del modelado: La corrección de las áreas críticas se realiza a través de la colocación de mayor cantidad de nodos en áreas que son necesarias por presentar cambios bruscos en sus factores físicos: cotas y rugosidades, esto es importante para obtener resultados confiables.

En la figura 3.10 se muestra la malla generada en el primer tramo, la cual está bien distribuida y densa debido a que los nodos fueron colocados con un espaciamiento entre ellos de 15m.

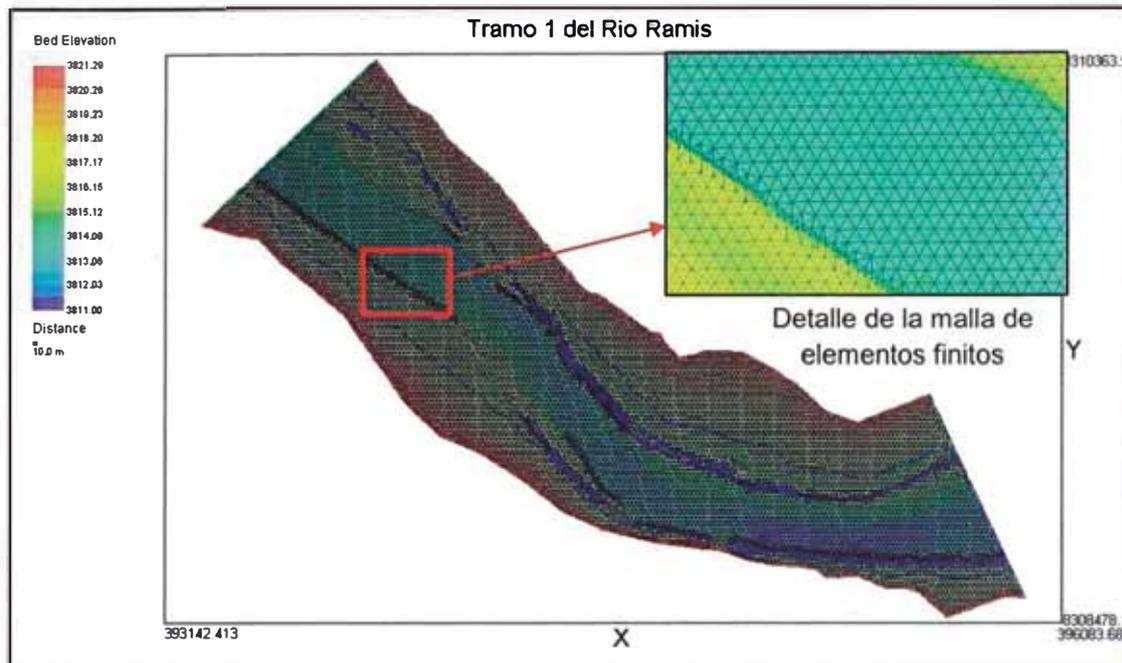


Figura N°3.10.- Malla generada en el primer tramo del río Ramis en el R2_Mesh

c. Trabajo en el River 2D

Una vez generada la malla de elementos finitos, utilizamos el programa River2D, el cual realiza la corrida específica del modelo hidráulico previa selección de flujo a modelar (régimen permanente o impermanente), para nuestro estudio se considera un flujo en régimen permanente. Asimismo el River2D nos muestra diversos resultados como: el nivel de superficie de agua, profundidad de agua, velocidad del flujo, número froude, descarga de intensidad X (q_x), descarga de intensidad Y (q_y), velocidad de corte, entre otros.

Los resultados del análisis hidráulico obtenido con el River 2D como son: la elevación del nivel de agua y las velocidades de flujo en los 4 tramos se muestran en el anexo 2B en formato raster. Finalmente para la evaluación de riesgos esta información será exportada al programa ArcGIS Desktop 10.

CAPITULO IV

GESTION DE RIESGOS

4.1. INTRODUCCION

En el presente capítulo se realiza la gestión de riesgos, el cual consiste en identificar el peligro de inundación, analizar la vulnerabilidad o puntos críticos de desborde y luego con estos dos conceptos podremos evaluar el riesgo de nuestra zona de estudio ante una inundación del río Ramis.

Por último se propone una medida de protección con el fin de reducir el impacto de las inundaciones, esta solución también involucra la utilización y mejoramiento de las tierras naturales para la agricultura y ganadería que son las actividades económicas de esta zona para ello se utilizará el modelo agrícola Polder desarrollado por lo holandeses desde el siglo XII.

4.2. EVALUACION DE RIESGO DE INUNDACION

4.2.1. Riesgo de inundación

El riesgo de inundación es la probabilidad de pérdida de los elementos a sufrir daños dependiendo del uso de suelo en una determinada zona debido a la presencia de una inundación. La metodología empleada para la evaluación de riesgos se basa en el enfoque desarrollado por Gilard (1996), este considera que el riesgo de inundación se divide en un componente de peligro y vulnerabilidad, para ello definiremos los conceptos de peligro y vulnerabilidad:

Peligro: El peligro está en función de la probabilidad de ocurrencia de la inundación y de su intensidad. La intensidad a su vez se puede definir en función de la profundidad y la velocidad del agua, así como de la duración de las inundaciones.

Vulnerabilidad: Es el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de la inundación de una magnitud dada. Es la facilidad como un elemento (viviendas, áreas agrícolas, áreas ganaderas, entre otros) puede sufrir daños.

Una vez analizado el peligro de inundación al que está expuesta el área de estudio, y realizado el análisis de vulnerabilidad, se procede a la conjunción de éstos para calcular el riesgo del área de estudio.

4.2.2. Análisis de peligro

Como se describió en el capítulo 1, para la determinación del nivel de peligrosidad se utiliza el cuadro N°1.2 del Instituto Nacional de Defensa Civil. Para este análisis de peligro se considera los criterios de las inundaciones estáticas (función de la profundidad de flujo) y los criterios de las inundaciones dinámicas (función del producto de profundidad y velocidad). Basados en los resultados del análisis hidráulico para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años mostrados en el anexo 4 se realiza el análisis de peligro. El cuadro N°4.1 muestra el nivel de peligro en hectáreas para una inundación del tipo estático y el cuadro N°4.2 muestra el nivel de peligro en hectáreas para una inundación del tipo dinámico.

Cuadro N°4.1.- Análisis de peligro estático

Periodo de Retorno	Nivel de Peligro (Ha)				Área Total inundada(Ha)
	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	
5 años	201.62	87.45	36.46	34.49	360.02
10 años	217.46	116.31	46.23	40.28	420.28
25 años	230.78	162.09	62.17	39.77	494.81
50 años	245.89	183.66	55.72	39.00	524.27
100 años	278.51	181.05	49.37	32.62	541.55

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N°4.2.- Análisis de peligro dinámico

Periodo de Retorno	Nivel de Peligro (Ha)				Área Total inundada(Ha)
	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	
5 años	154.62	53.67	31.39	120.34	360.02
10 años	165.79	58.03	46.74	149.72	420.28
25 años	174.27	75.22	63.90	181.42	494.81
50 años	180.48	94.62	76.19	172.98	524.27
100 años	184.56	125.90	74.19	156.90	541.55

Fuente: Elaboración Propia

Las figuras N°4.1 y N°4.2 representan el nivel de peligrosidad de una inundación ocurrida por el desborde del río Ramis del tipo estático y dinámico para los diferentes periodos de retorno respectivamente. En la figura N°4.1 podemos observar que el área de inundación presenta un nivel de peligro del tipo estático muy alto y alto, mientras que el nivel de peligro bajo es casi constante para los diferentes periodos de retorno, en cambio en la figura N°4.2 nos muestra que el área de inundación presenta un nivel de peligro del tipo dinámico de muy alto a bajo, esto debe ser por la presencia de velocidades pequeñas generadas en ciertas zonas ya que el flujo es subcrítico.

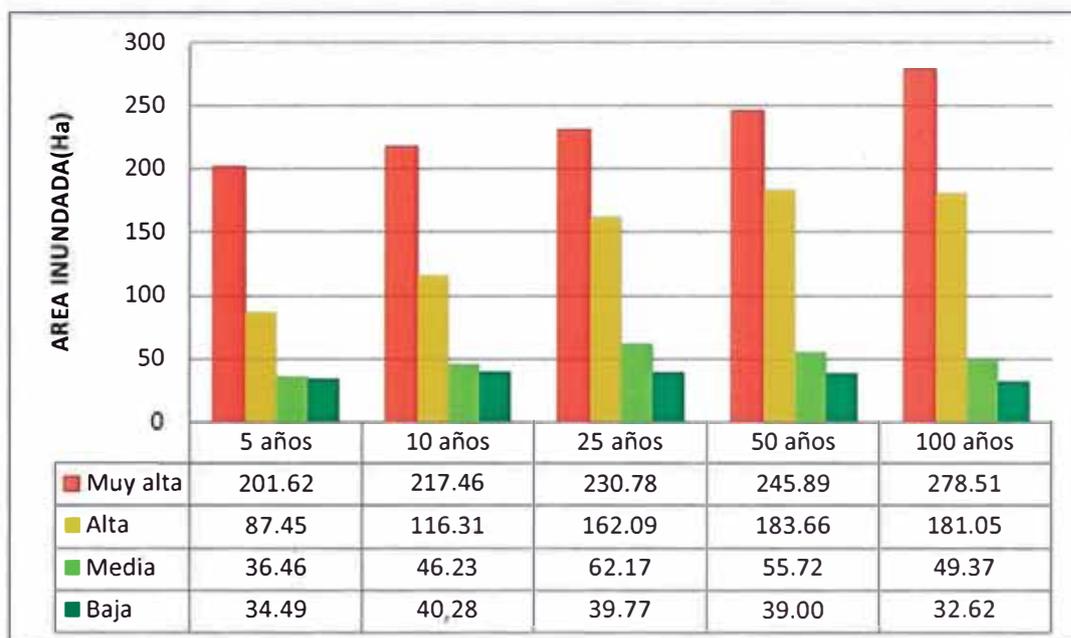


Figura N°4.1.- Análisis de peligro estático (Plano N°2, 3, 4, 5 y 6)

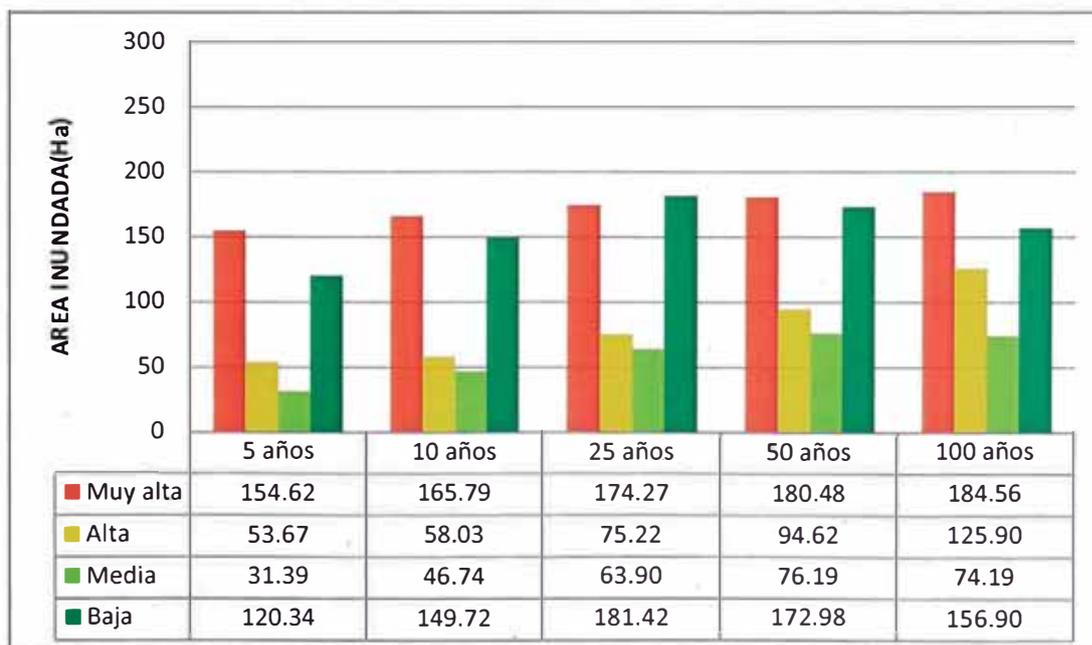


Figura N°4.2.- Análisis de peligro dinámico (Plano N°7, 8, 9, 10, 11 y 12)

Los mapas de peligro de inundación del tipo estático y dinámico del área de estudio para los diferentes periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años se presentan en el anexo 4.

4.2.3. Análisis de vulnerabilidad

Para realizar el análisis de vulnerabilidad intersectamos el área inundada con el uso del suelo del área de estudio, esto se realiza para los diferentes periodos de retorno. El cuadro N°4.3 muestra las áreas inundadas (Ha) en función del uso del suelo, en la cual podemos observar que las áreas de pastizal y cultivo presentan un alto nivel de vulnerabilidad con más del 50% del área inundada, mientras que el área rural presenta un nivel de vulnerabilidad baja.

Cuadro N°4.3.- Análisis de vulnerabilidad

Periodo de Retorno	Uso de Suelo (Ha)					Área Total inundada(Ha)
	Rio	Tierra Estéril	Zona de pastizal y cultivo	Zona Rural	Zona Urbana	
5 años	90.98	0.00	258.31	10.73	0.00	360.02
10 años	90.98	0.00	317.39	11.91	0.00	420.28
25 años	90.98	0.00	388.88	14.95	0.00	494.81
50 años	90.98	0.00	416.24	16.84	0.21	524.27
100 años	90.98	0.00	431.47	18.47	0.63	541.55

Fuente: Elaboración Propia

La figura N°4.3 muestra que las áreas afectadas por las inundaciones son las zonas destinadas a los pastizales y cultivos y las zonas rurales. Todo esto involucra que los principales daños producto de una inundación del río Ramis son ocasionados a la población netamente rural, tanto por afectar sus viviendas como sus principales actividades económicas que son la agricultura y ganadería.

Los mapas de vulnerabilidad de los diferentes periodos de retorno 5,10, 25, 50 y 100 años se muestran en el anexo 4.

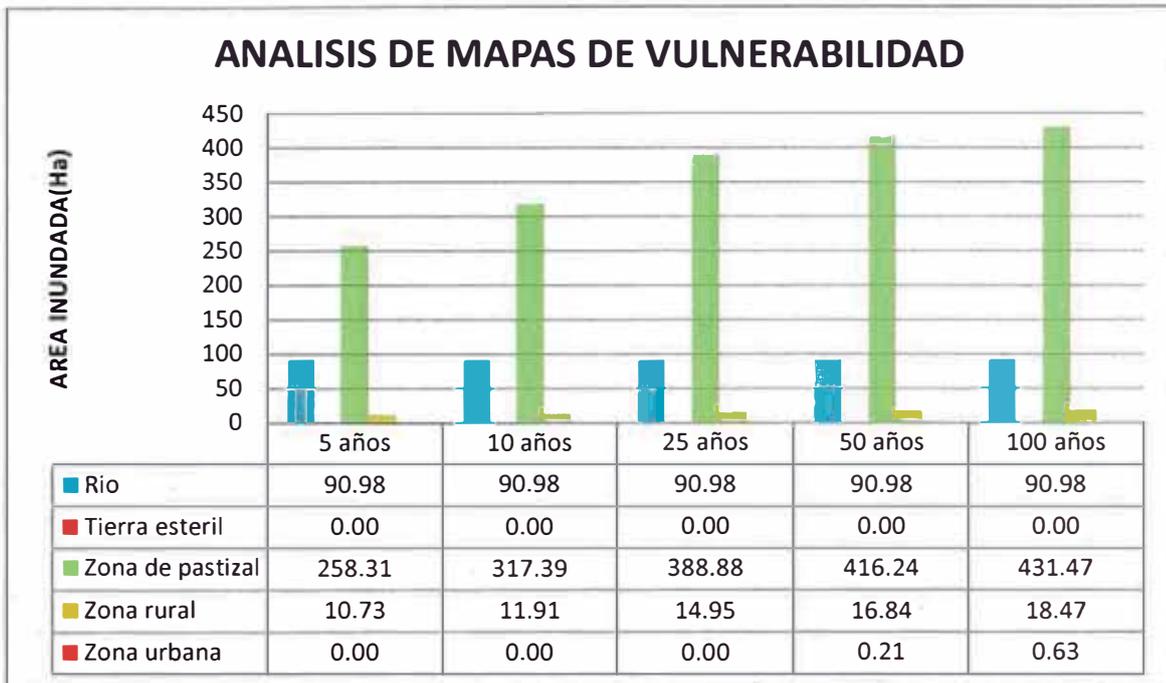


Figura N°4.3.- Análisis de mapas de vulnerabilidad

4.2.4. Evaluación del riesgo

La combinación del análisis de peligro y vulnerabilidad nos permitirá observar el riesgo que presenta la zona de estudio a la ocurrencia de una inundación para los diferentes periodos de retorno que se consideran para la evaluación del estudio.

La figura N°4.4 muestra que para una inundación del tipo estático se tiene una tendencia de riesgo alto en la zona rural para los diferentes periodos de retorno.

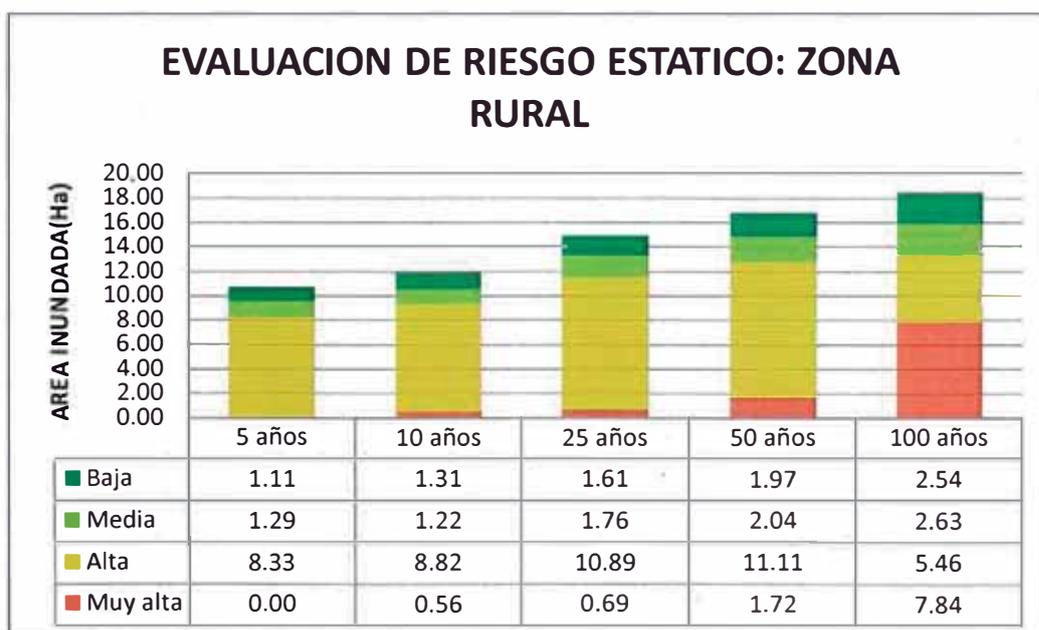


Figura N°4.4.- Evaluación de riesgo del tipo estático de la zona rural

También la figura N°4.5 muestra que para una inundación del tipo estático se tiene una tendencia de riesgo alto y muy alto en la zona de pastizal y cultivo para los diferentes periodos de retorno.

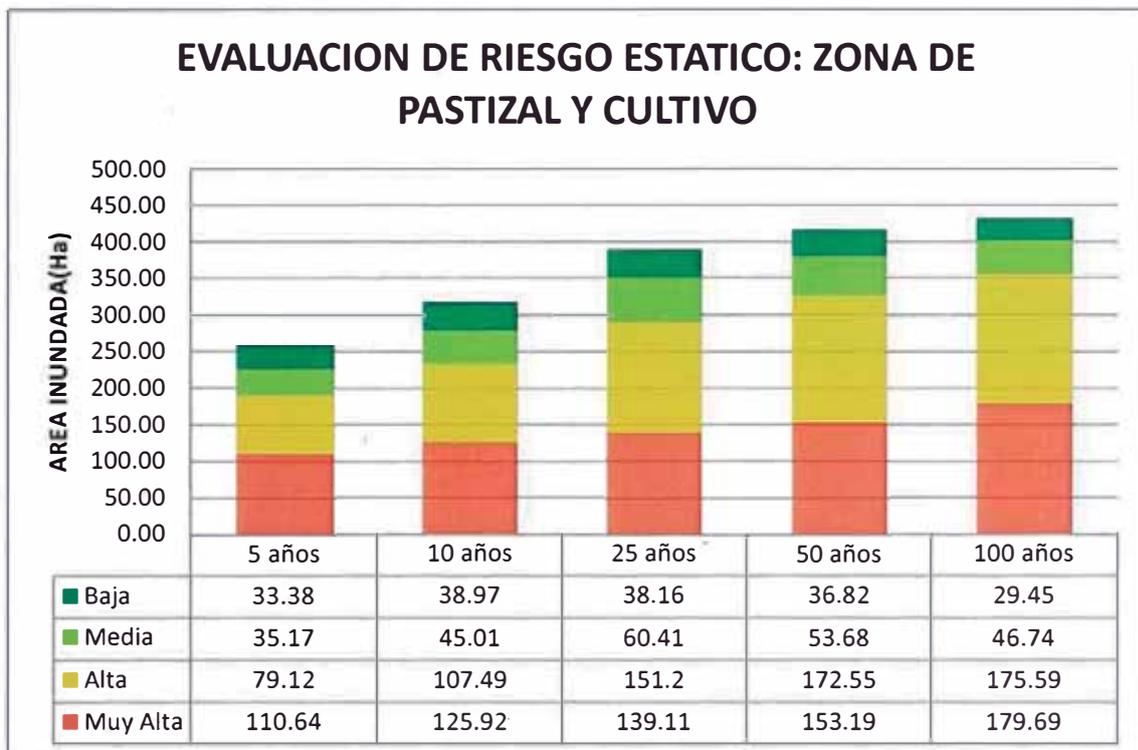


Figura N°4.5.- Evaluación de riesgo del tipo estático de la zona de pastizal y cultivo

También se realiza la evaluación de riesgo para una inundación del tipo dinámico, la figura N°4.6 muestra que se tiene una tendencia de riesgo bajo a medio en la zona rural para los diferentes periodos de retorno.

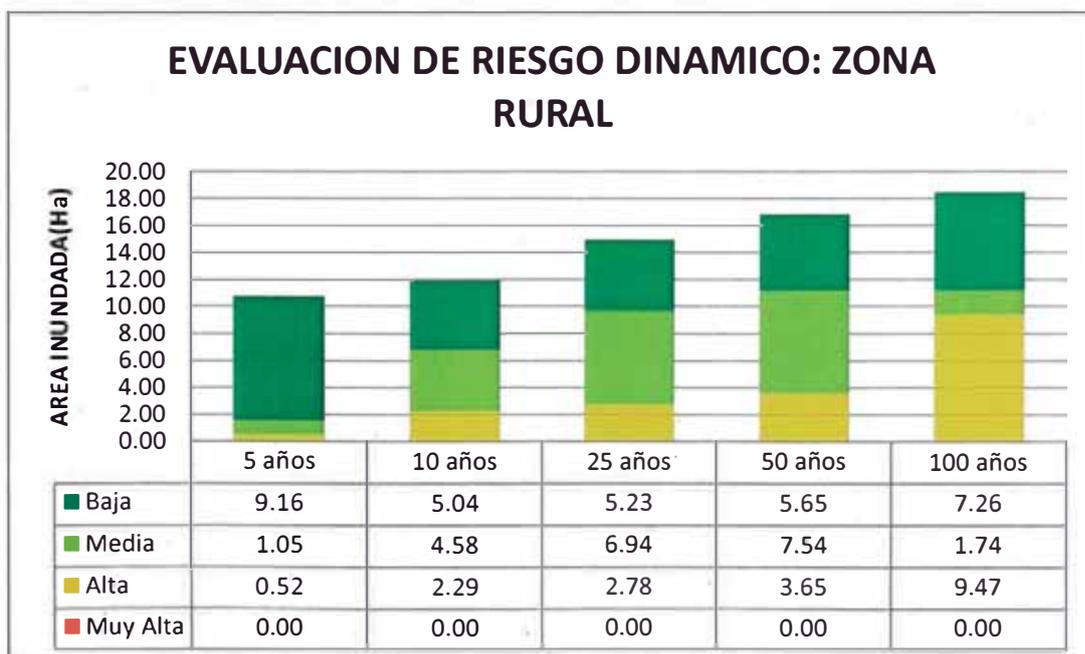


Figura N°4.6.- Evaluación de riesgo del tipo dinámico de la zona rural

Además la figura N°4.7 muestra que para una inundación del tipo dinámico se tiene una tendencia de riesgo alto a bajo en la zona de pastizal y cultivo para los diferentes periodos de retorno.

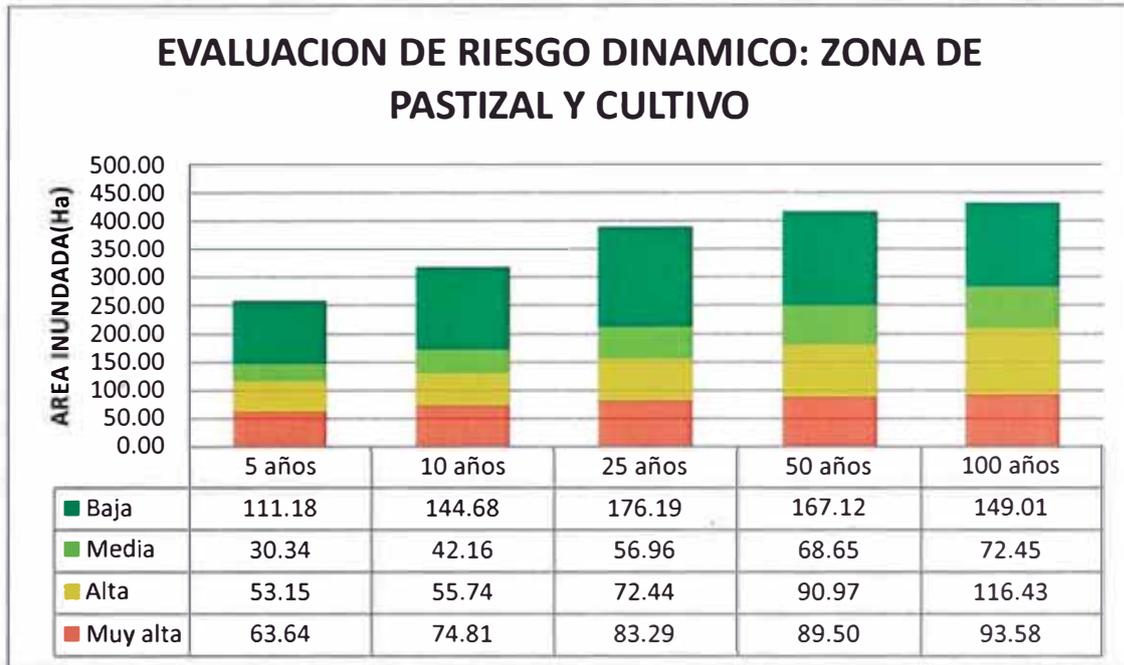


Figura N°4.7.- Evaluación de riesgo del tipo dinámico de la zona de pastizal y cultivo

En base a estos resultados obtenidos de la evaluación de riesgo, debemos enfocarnos en una solución integral que a su vez permita el desarrollo agrícola y ganadero que posee esta zona. Los mapas de riesgo para la zona de pastizal y cultivo de los dos tipos de inundación (estático y dinámico) para cada uno de los diferentes periodos de retorno 5,10, 25, 50 y 100 años se muestran en el anexo 4.

4.3. MEDIDA DE PROTECCIÓN ANTE EL RIESGO DE INUNDACIÓN

4.3.1. Generalidades

Los valles del río Ramis son zonas productivas y densamente pobladas de áreas agrícolas y ganaderas, pues presentan ventajas naturales: fácil disponibilidad de agua, suelos de granos finos, alta retención de capacidad de agua y cuenta con un suministro de agua para las plantas por capilaridad ascendente del nivel freático. Estas ventajas naturales tienen su inconveniente inherente, cuando el río está en crecida el agua rebasa las llanuras de inundación produciendo a menudo daños considerables, asimismo el nivel freático puede estar tan cerca de la superficie de modo que produce anegamiento, por ello es necesario un sistema de drenaje que

permita el desarrollo de los cultivos, esto conlleva a la búsqueda de una medida de protección más íntegra como el denominado "Sistema Polder".

La palabra Polder es un término holandés, que define las superficies terrestres ganadas al mar, que se hallaban a su mismo nivel o inferior, para darles de esta forma un aprovechamiento agrícola, pero en general este término se aplica a todos los terrenos húmedos (como marismas, lagos y llanuras aluviales) que han sido desecados con fines agrícolas, industriales o portuarios.

4.3.2. Sistema Polder

Un sistema Polder se define como una zona de baja altitud recuperada, que posee un elevado nivel de agua subterránea, que se ha aislado del régimen hidrológico y donde se puede controlar los niveles de agua (superficial y subterráneo). El aislamiento se logra por medio de diques, el control de agua esencialmente es por drenaje, bajo ciertas condiciones en combinación con el riego. Las características de un sistema Polder son las siguientes:

- Un Polder es una zona bien delimitada, que no es atravesado por un curso de agua exterior, solo el agua producida por la lluvia es recolectada.
- No hay escurrimiento libre como en una cuenca natural, pero en la desembocadura existe una estructura de control (esclusa o estación de bombeo) que permite controlar el flujo de salida.

El sistema Polder se compone de un conjunto de diques que delimitan su área, y al interior de este se realiza un sistema adecuado de control de agua: drenaje y riego. A continuación se describen las características de los componentes de un sistema Polder:

- Diques de Protección
- Sistema de drenaje
- Sistema de Riego

La figura N°4.8 muestra el esquema de un sistema Polder, en la cual se observa el dique de protección y su sistema de control de aguas (drenaje y riego).

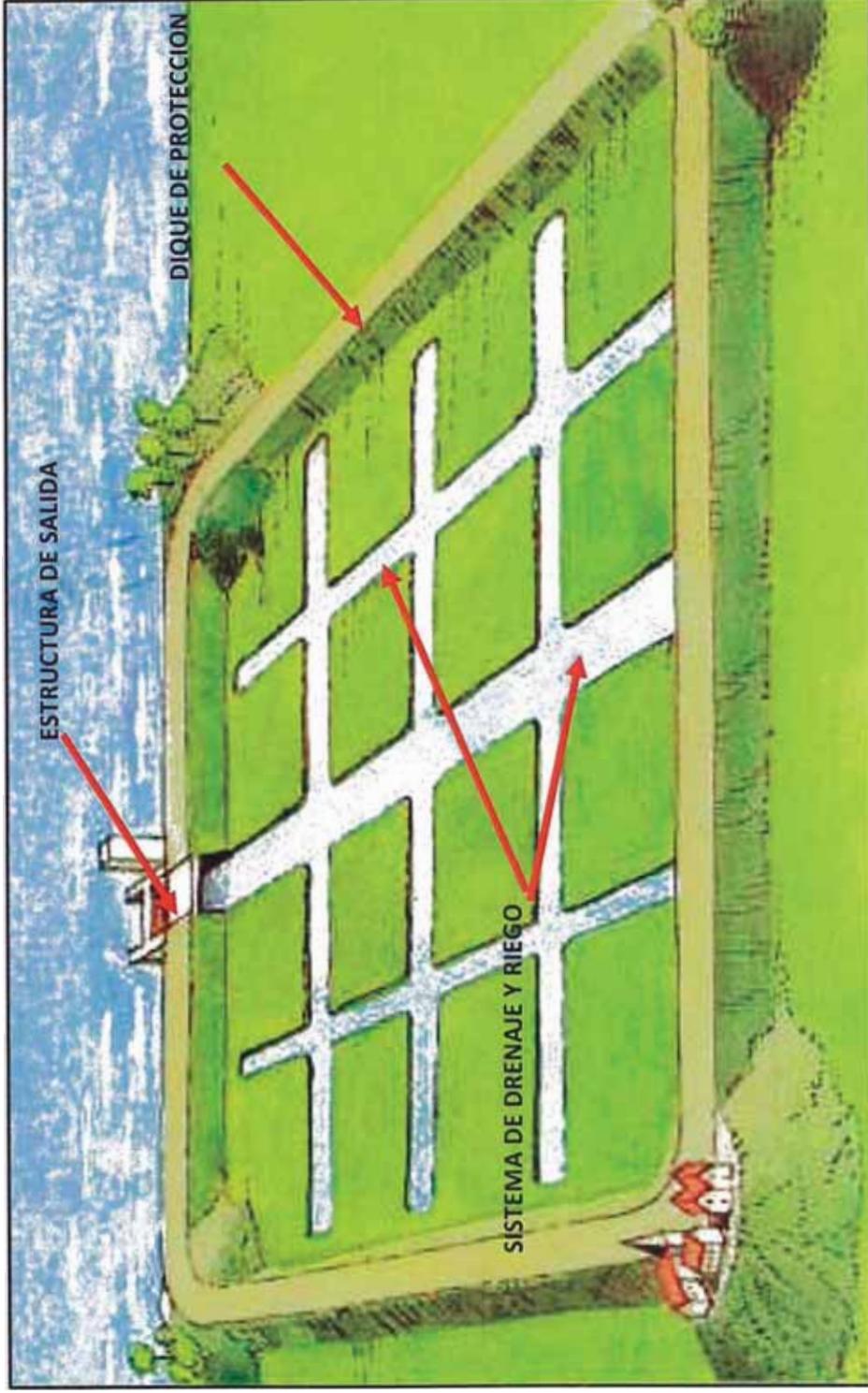


Figura N°4.8.- Esquema de un Sistema Polder

a. Diques de Protección

Los diques son estructuras que evitan que el agua salga del cauce e inunde extensas áreas (ver figura N°4.9). Generalmente los diques están conformados de tierra o de concreto armado.

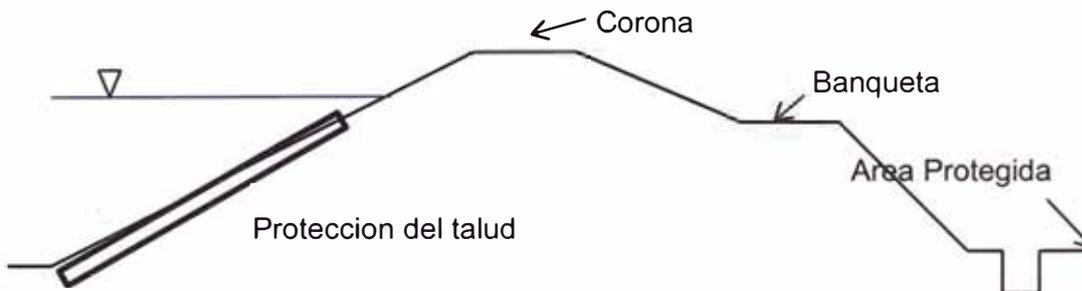


Figura N° 4.9.- Ejemplo de un dique típico

Existen diversos factores que influyen en el diseño de los diques:

- El tipo de suelo de cimentación, en lo posible deberán evitarse los subsuelos débiles en la construcción de los diques, tales como arenas y suelos pocos cohesivos ya que la corriente puede erosionar el suelo y provocar fallas.
- Los estudios de filtración son también importantes ya que esto hace que la ladera mojada del dique sea menos estable y además puede producir tubificación, es decir que las partículas de arena son removidas por el agua de infiltración hasta llegar cerca del talón del dique, estos conductos cada vez se van haciendo más grandes y largos hasta producir el colapso del dique. Para prevenir la filtración es necesario que el dique cuente con una parte de material impermeable y se recomienda también la construcción de filtros.
- El material usado para su construcción, que comúnmente es la tierra y la arena, este debe seleccionarse adecuadamente, de tal manera que tenga una compactación, elasticidad, e impermeabilidad óptima que eviten las fallas por deslizamiento o deformaciones del suelo.
- El nivel de agua alcanzado en la avenida de diseño, esto determina la altura del dique. Hay que considerar que para esta elección es necesario hacer un estudio de la relación beneficio-costos, es muy difícil predecir con exactitud la máxima avenida probable, es por esto que al establecer la altura de diseño

uno debe sopesar los posibles daños que podría ocasionar una avenida mayor a la supuesta.

- El grado de protección, este depende de la importancia del área a proteger, así un área agrícola tendrá un menor grado de protección que una ciudad.

Se recomienda que los diques se encuentren a una buena distancia del cauce principal por dos motivos: para evitar la socavación y para tener mayor capacidad de descarga.

b. Control de agua: Drenaje

El drenaje consiste en remover el exceso de agua proveniente de la precipitación, filtraciones, etc. Además el drenaje es también un requisito previo para el control de la calidad de agua en el suelo con respecto a la salinidad. El objetivo del drenaje es el control de la profundidad de inundación en los campos y el exceso de escorrentía producida por la precipitación que se lleva a cabo a través de la superficie. Además es importante el control del nivel de agua subterránea.

El sistema de drenaje de un Polder consiste en 3 componentes: el sistema de drenaje parcelario, el sistema principal de transporte y la estructura de salida. La figura N°4.10 muestra los componentes de un sistema de drenaje de un Polder.

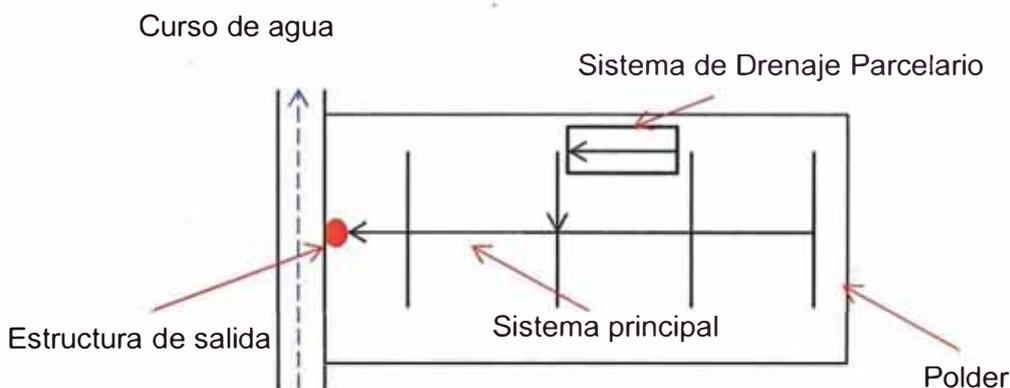


Figura N° 4.10.- Componentes del sistema de drenaje

El sistema de drenaje parcelario es aquel cuya misión es de controlar la profundidad del agua del nivel freático, de tal manera que permita el desarrollo de los cultivos. Este flujo debe ser diseñado en función del tipo de cultivo, es decir depende de la profundidad radicular (ver figura N°4.11). En el diseño de un sistema de drenaje parcelario, uno de los factores más importantes es el espaciamiento de los drenes.

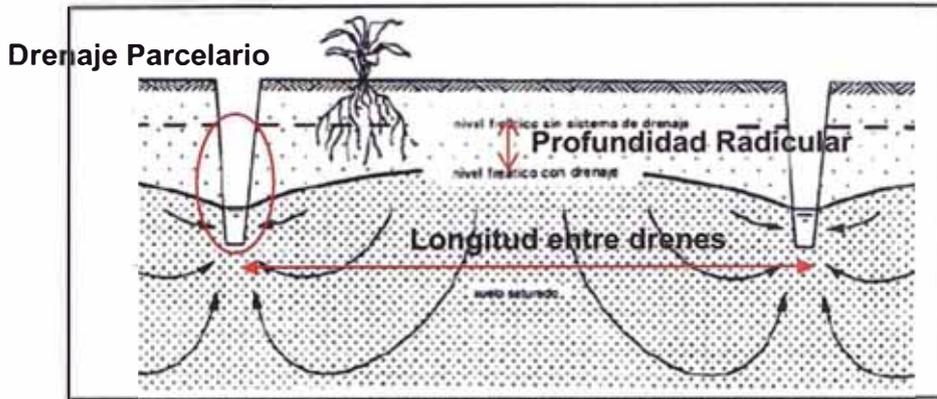


Figura N° 4.11.- Sistema de drenaje parcelario

El sistema principal tiene la función de transportar el agua fuera de la zona a drenar. Este sistema principal está constituido por drenes colectores y drenes principales (ver figura N°4.12)

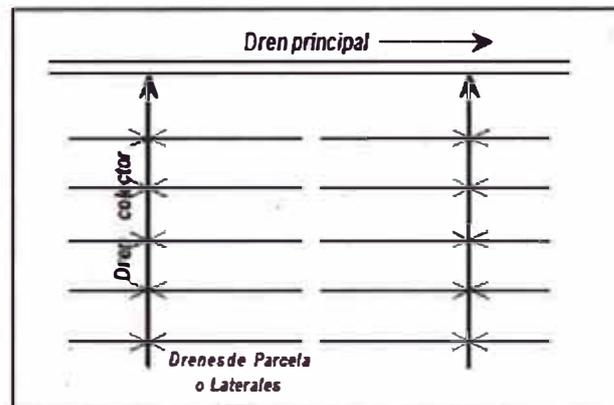


Figura N° 4.12.- Sistema de drenaje principal

La estructura de salida consiste en controlar a través de una esclusa o estación de bombeo el exceso de agua que luego será eliminada del Polder, por ejemplo los holandeses a partir del siglo XI utilizaron el molino de viento para elevar el agua de las zonas bajas del Polder.

Los molinos de viento usados con el fin de bombear agua (aerobombas) se componen por: el rotor eólico, la transmisión, el sistema de seguridad y la torre de soporte (ver figura N°4.13).

- Los rotores eólicos utilizados en aerobombas, generalmente deben estar provistos de muchas palas debido a que son equipos de baja velocidad y requieren de fuerzas altas para realizar la función de bombeo. Es por esto que un rotor multipala puede llegar a tener 12, 18, 24 o aún 36 palas.

- La transmisión en una aerobomba es aquella que toma el movimiento giratorio del eje del rotor y lo convierte en un movimiento lineal de ascenso y descenso para pulsar la bomba de pistón.
- Los sistemas de seguridad permiten a los rotores eólicos tener la capacidad de girar para encarar el viento en caso de que este cambie su dirección y al mismo tiempo protegerse de intensidades de viento muy altas que pueden causar sobrecargas excesivas a la torre, a la transmisión y al rotor.
- Las torres conocidas como autoportantes, son las que soportan todo el peso del rotor eólico, la transmisión y las fuerzas transmitidas por la acción del viento y del bombeo de agua.

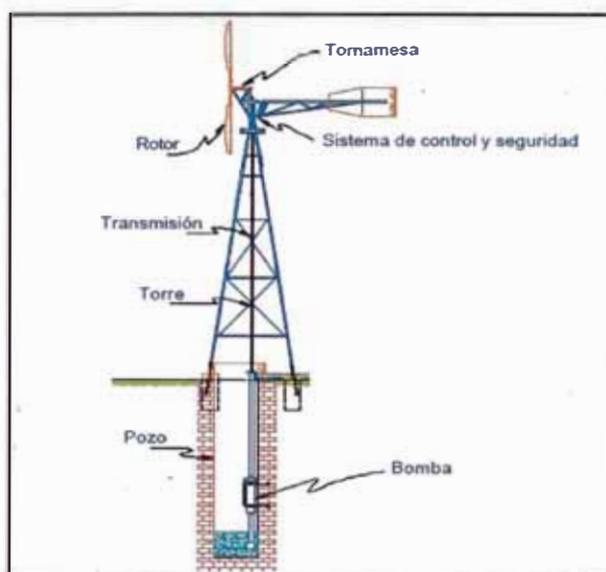


Figura N° 4.13.- Componentes del molino de viento

c. Control de agua: Riego

Las características principales de los sistemas de riego en Polder son:

- El agua de riego es suministrada desde afuera, es decir, desde el río hacia el Polder, en un nivel bajo con respecto a la elevación del terreno de modo que el agua no puede fluir por gravedad a las parcelas o campos.
- La pendiente del terreno en estas áreas es muy pequeña o incluso inexistente, prácticamente plana.
- La existencia de una interrelación de un sistema de riego y drenaje, es decir la posibilidad de existir un sistema separado o combinado de ambos.

Los sistemas Polder requieren una red ramificada de canales para el drenaje, y en ocasiones resulta práctico utilizar la misma red para fines de riego, dado que la capacidad de los canales de irrigación son por lo general mucho menor que la capacidad de los canales de drenaje. Este sistema es muy utilizado y su ventaja es obvia, que sólo se requiere un sistema de canales y que la operación es simple.

En el diseño de los canales de riego un elemento importante es la velocidad que se adopta, por ejemplo la velocidad máxima permitida en limos y arcillas aluviales son alrededor de 0.8 a 1.5 m/s dependiendo del contenido de sedimento del agua, la profundidad del canal y otros factores. Sin embargo, tales altas velocidades no se pueden alcanzar en zonas de nivel como en un Polder, más importante es la velocidad mínima admisible. Cuando el agua es clara existe el peligro de que el crecimiento de la vegetación acuática genere obstrucción de los canales, para evitar esto la velocidad en los canales no debe ser inferior a 0.75 m/s y la profundidad no menor que 0.5m. En los canales muy profundos (3m y más) velocidades menores son permisibles.

4.3.4. Diseño del sistema Polder para el área de estudio

Debido a que nuestra zona de estudio presenta ciertas características agrícolas y ganaderas para un mejor desarrollo, y frecuentemente ha sufrido daños por el desborde del río Ramis se ha optado por plantear como una solución la construcción de un Sistema Polder.

En la presente tesis se realizará el diseño de un Polder, para ello en la figura N°4.14 se muestra las ubicaciones de los Pólderes, solo diseñaremos el Polder N°1 cuya área es de 315.74 Ha, se eligió este por contener la mayor parte de la población rural y mayor área inundada.

Como se mencionó y justifico en el capítulo 1, para el diseño de nuestra medida de protección se utilizará una inundación perteneciente al periodo de retorno de 50 años (probabilidad 2%), sin embargo esto no implica que los territorios fuera del área de inundación no están libres de inundaciones o daños causados por las mismas, por lo contrario este valor debe ser considerado como requerimiento mínimo.

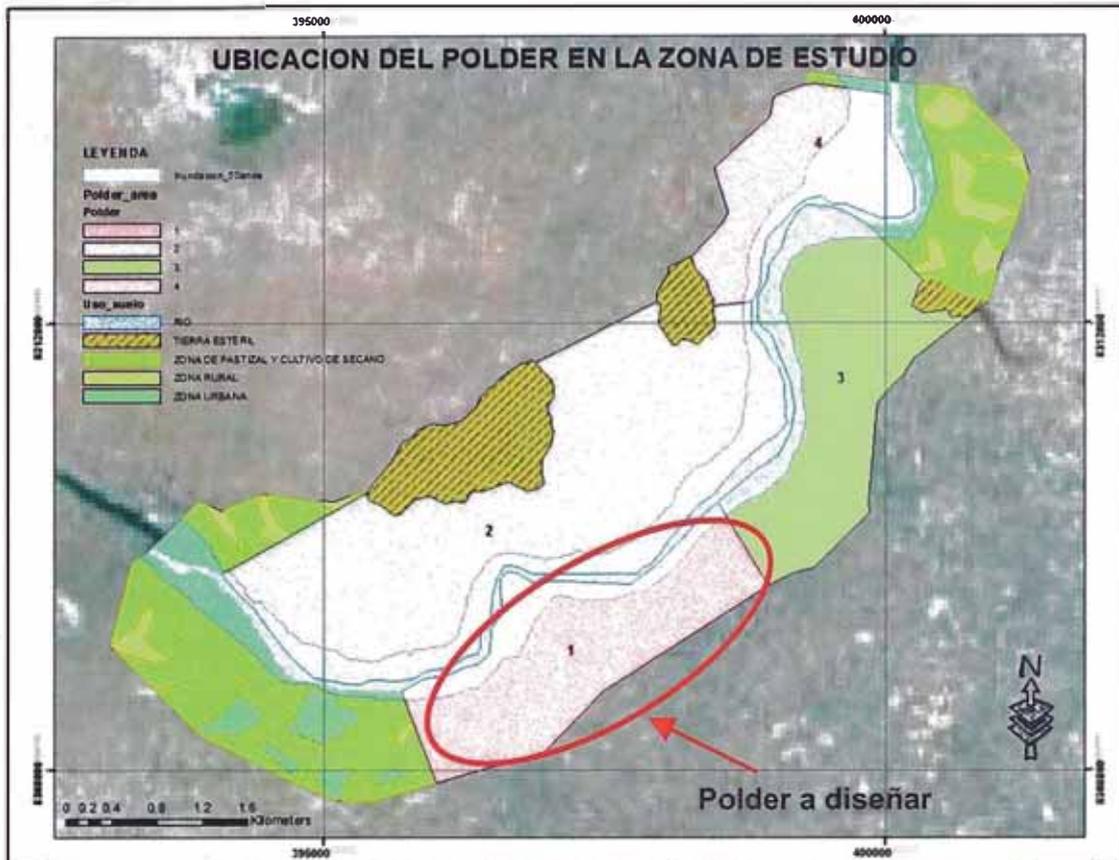


Figura N°4.14.- Ubicación de la zona intervenida para ser polderizada

a. Diseño del Dique

El diseño del dique se realiza para un caudal de diseño de 50 años igual a $650.97 \text{ m}^3/\text{s}$, y se separa en las siguientes etapas:

Determinación de la altura del Dique: La altura necesaria del dique se obtiene sumando la altura del máximo nivel de agua y un valor adicional llamado borde libre, este representa una altura de seguridad. El borde libre varía según las características climatológicas, de caudal, y de la zona a proteger. El cuadro N°4.4 muestra la altura de borde libre según la descarga calculada.

Cuadro N°4.4.- Borde libre recomendado según la descarga de diseño

Descarga de diseño(m^3/s)	Borde Libre (m)
Menos de 200	0.60
200-500	0.80
500-2000	1.00

Fuente: Textbook for group Training course in River and dam Engineering River Bureau, Ministry of construction, JICA

En base al Cuadro N°4.4 nos corresponde un borde libre de 1.00m debido a que el caudal de diseño es de $650.97 \text{ m}^3/\text{s}$.

Diseño de corona del Dique: El ancho de la corona se diseña de acuerdo a las características de cada río y de cada sección. El cuadro N°4.5 muestra el ancho de la corona según la descarga de diseño.

Cuadro N°4.5.- Ancho de corona según la descarga de diseño

Descarga de diseño(m ³ /s)	Ancho de corona (m)
Menos de 500	3.00
500-2000	4.00

Fuente: Textbook for group Training course in River and dam Engineering
River Bureau, Ministry of construction, JICA

En base al Cuadro N°4.5 nos corresponde un ancho de corona de 4.00m debido a que el caudal de diseño es de 650.97m³/s. Para el dique en contacto con el río Ramis se utilizará un ancho de corona de 4.00m y para los otros diques laterales se utilizará un ancho de 3.00m.

Determinación de los Taludes Laterales: La pendiente adecuada de los taludes del dique se determina teniendo en cuenta el material de construcción del dique. En el cuadro N°4.6 se dan recomendaciones para los taludes de diques de tierra homogéneos, de acuerdo al material que se utiliza en el terraplén.

Cuadro N°4.6.- Talud laterales en función del tipo de material

Clasificación de los suelos	Talud de agua	
	Arriba	Abajo
GW,GP,SW,SP	No adecuado	No adecuado
GC,CM,SC,SM	1V:2.5H	1V:2H
CL,ML	1V:3H	1V:2.5H
CH,MH	1V:3.5H	1V:2.5H

Fuente: Textbook for group Training course in River and dam Engineering
River Bureau, Ministry of construction, JICA

El material disponible de la zona está constituido por suelos del tipo ML, CL y SM; para este tipo de suelos es recomendable como se muestra en el cuadro N°4.6 un talud de 1:3 aguas arriba y de 1:2.5 aguas abajo para el dique en contacto con el río y para los diques laterales se tendrá un talud de 1:2.5 en ambos lados.

Relleno Estabilizador: Como la cimentación está compuesta por materiales limo arenosos saturados es recomendable la construcción de un relleno estabilizador, para la elección de la pendiente de este relleno se utilizara el cuadro N°4.7. En base a este cuadro el relleno recomendado es de 1:3 y se colocara en el talud de aguas abajo hasta la mitad de la altura total del dique.

Cuadro N°4.7.- Taludes recomendados para los rellenos estabilizadores para presas construidas sobre cimentaciones saturadas de limo y arcilla

Consistencia	# Promedio de golpes por pie a una profundidad de la cimentación igual a la altura de la presa	Grupo de suelos	Taludes para diferentes alturas de presa	
			20 pies	10 pies
Blanda	Menor de 4	Pruebas y análisis especiales de suelos requeridos		
Mediana	De 4 a 10	SM	3:1	3:1
		SC	3:1	3:1
		ML	3:1	3:1
		CL	3:1	3:1
		MH	3 1/2:1	3:1
		CH	4:1	3:1
Firme	De 11 a 20	SM	3:1	3:1
		SC	3:1	3:1
		ML	3:1	3:1
		CL	3:1	3:1
		MH	3:1	3:1
		CH	3:1	3:1
Dura	Más de 20	SM	3:1	3:1
		SC	3:1	3:1
		ML	3:1	3:1
		CL	3:1	3:1
		MH	3:1	3:1
		CH	3:1	3:1

Fuente: Diseño de Presas pequeñas
Bureau of Reclamation

Revestimientos: En la proximidad de la zona de estudio existen canteras de rocas, por lo que se colocará un enrocado aguas arriba del dique en contacto con el río para prevenir los deslizamientos y la erosión. Para la determinación del tamaño adecuado de la piedra requerida se ha usado el método de Maynard, cuya ecuación es la siguiente:

$$\frac{D_{50}}{y_0} = CF^3 \quad (4.1)$$

Donde:

D_{50} : Diámetro medio del enrocado

F : Numero de froude

C : Coeficiente del cuadro 4.8

y_0 : Altura de agua

Cuadro N°4.8.- Coeficiente para el diseño de enrocado de protección (Maynord)

Talud	Factor de Seguridad	Coeficiente C
1:3 o menor	1.0	0.22
1:3 o menor	1.5	0.25
1:3 o menor	2.0	0.28
1:2	1.0	0.26
1:2	1.5	0.30
1:2	2.0	0.32

Fuente: Hydraulics Factors in Bridge Design
R.V. Farraday, F.G. Charlton

El método recomienda multiplicar la velocidad media por un factor de 2 al calcular el número de Froude. Entonces para el número de Froude tenemos que $F=v/(g \cdot y_0)^{0.5}$, para $g=9.8\text{m/s}^2$, $y_0=1.58\text{m}$, y $v=3.60\text{m/s}(1.80 \times 2)$ obtenemos $F=0.91$ y utilizando $C=0.25$ aplicando la ecuación (4.1):

$$D_{50}=y_0CF^3=1.58 \times 0.25 \times 0.91^3=0.297\text{m}$$

En base al resultado teórico nos da un diámetro medio de 0.297m, pero dadas las condiciones de la zona de estudio se utilizará un diámetro medio (D_{50}) de 0.3m. Para determinar la longitud que debemos prolongar el revestimiento en el cauce del río para la protección del pie se determina la profundidad de socavación. El revestimiento se prolongará una longitud de $1.5d_g$ (d_g es la profundidad de socavación general) en el cauce horizontal y una longitud d_g para la vertical del cauce, siguiendo la pendiente del talud.

Para el presente estudio se ha calculado la socavación general (d_g) y para su determinación se ha utilizado el método de Lischtvan – Lebediev, el valor a calcularse viene a ser el descenso del fondo durante la avenida, a consecuencia del arrastre de sedimentos para la corriente. Para suelos granulares se tiene que:

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.68 D_m^{0.28} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad (4.2)$$

$$d_g = H_s - H_0 \quad (4.3)$$

Donde:

H_s : Profundidad del flujo o tirante después de ocurrida la socavación, se mide desde el nivel del agua cuando pasa la avenida hasta el nivel del fondo del cauce erosionado.

- H_o : Profundidad inicial existente en una línea vertical predeterminada de la sección, medida desde el nivel del agua cuando pasa la avenida y el nivel del fondo del cauce registrado durante la estación de estiaje en metros. ($H_o = y$)
- β : Coeficiente de frecuencia, este valor está en función del período de retorno (Tr) correspondiente al caudal de diseño, el cual se evalúa de la siguiente manera:

$$\beta = 0.7929 + 0.0973 \text{ Log } (Tr)$$

- x : Exponente variable que depende de peso volumétrico seco (γ_s) del material cohesivo, su valor se determina a través del cuadro N°4.9
- α : Coeficiente de sección o de distribución de gasto y se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{Q_d}{H_m^{\frac{5}{3}} B_e \mu}$$

Donde:

Q_d : Caudal de diseño (m^3/s)

H_m : Tirante medio (m), y es igual $\text{Área}/B_e$

B_e : Ancho efectivo del canal, descontando todos los obstáculos (m)

μ : Coeficiente de contracción, ver cuadro N°4.10

Cuadro N°4.9.- Valores de x y $1/(x+1)$ para suelos no cohesivos

D(mm)	x	1/(x+1)	D(mm)	x	1/(x+1)
0.05	0.43	0.70	15.00	0.33	0.75
0.15	0.42	0.70	20.00	0.32	0.76
0.50	0.41	0.71	25.00	0.31	0.76
1.00	0.40	0.71	40.00	0.30	0.77
1.50	0.39	0.72	60.00	0.29	0.78
2.50	0.38	0.72	90.00	0.28	0.78
4.00	0.37	0.73	140.00	0.27	0.79
6.00	0.36	0.74	190.00	0.26	0.79
8.00	0.35	0.74	250.00	0.25	0.80
10.00	0.34	0.75	310.00	0.24	0.81

Fuente: Manual de Obras Civiles
Comisión Federal de Electricidad-México

Cuadro N°4.10.- Coeficiente de contracción “μ”

V(m/s)	Distancia entre luz o pilas, estribos u obstáculos a la corriente(m)											
	10	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
<1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	0.94	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2.0	0.93	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
2.5	0.90	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
3.0	0.89	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.5	0.87	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
>4.0	0.85	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

Fuente: Manual de Obras Civiles
Comisión Federal de Electricidad-México

Para este estudio se ha tomado la sección más crítica que corresponde a los siguientes datos:

$$\begin{aligned}
 Q_d &= 650.97 \text{ m}^3/\text{s} & H_m &= 3.19 \text{ m} \\
 H_0 &= 5.66 \text{ m} & B_e &= 100 \text{ m} \\
 D_m &= 0.8 \text{ mm} & \mu &= 1 \\
 x &= 0.404 & \beta &= 0.97
 \end{aligned}$$

Primero obtenemos el valor de $\alpha=0.94$, luego reemplazando estos valores en la ecuación (4.2) obtenemos $H_s=10.53 \text{ m}$. Entonces la profundidad de socavación será igual a 4.87 m con lo que se procede a colocar la protección del pie del dique.

La figura N°4.15 muestra la sección típica del dique en contacto con el río y de los diques laterales, estos últimos no contarán con filtro ni enrocado de protección.

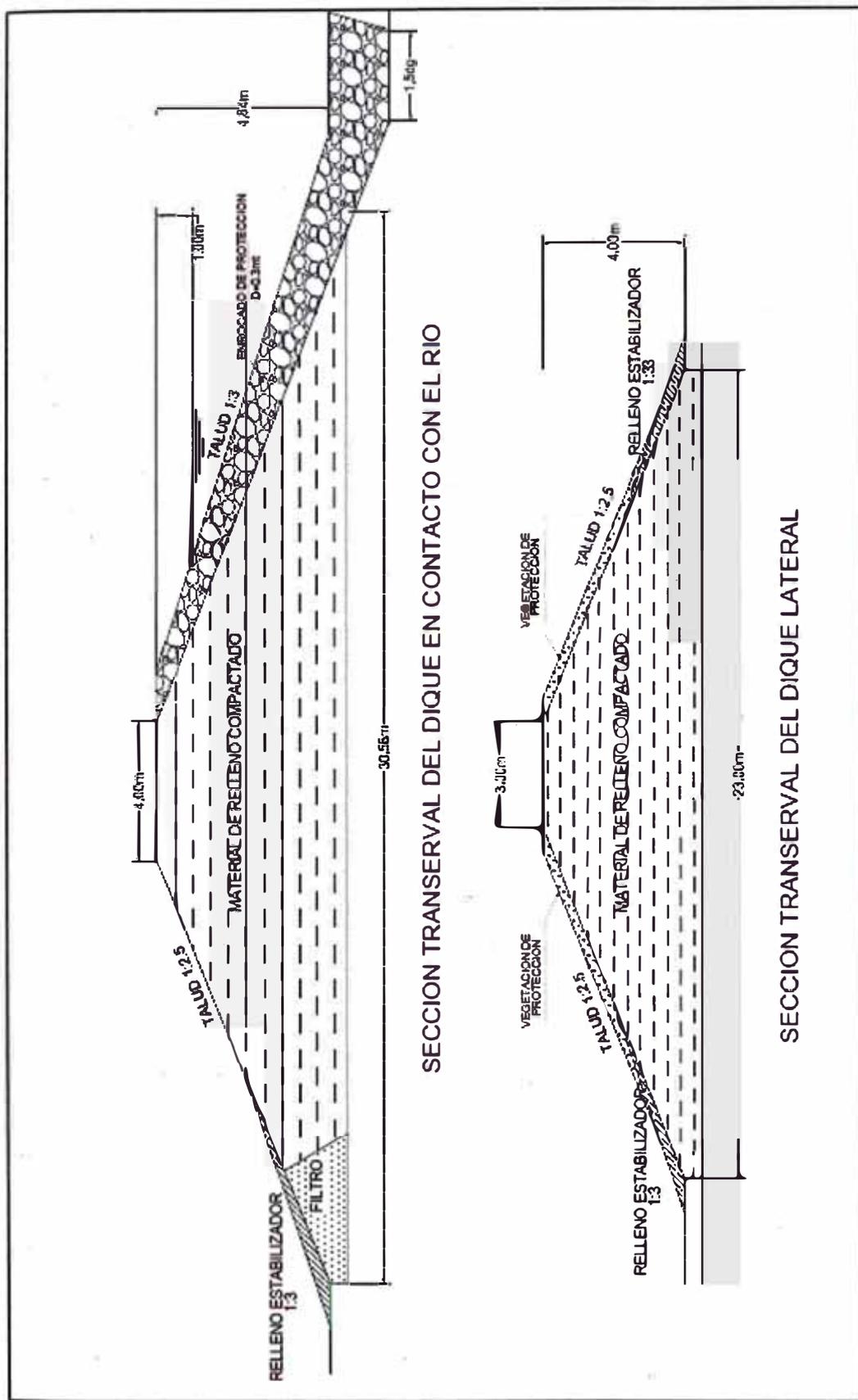


Figura N°4.15.- Secciones transversales del dique del Polder

b. Diseño del sistema de Drenaje

El diseño del sistema de drenaje lo conforman el sistema parcelario, el sistema principal y la estructura de salida (ver figura N°4.10):

Sistema Parcelario: En el caso de los cultivos que no necesitan estar inundados, el nivel del agua subterránea debe ser controlado para que el aire (oxígeno) se mantenga en la zona radicular. El nivel freático se mantiene normalmente a una profundidad de 1.0 a 1.5 m por debajo de la superficie, en caso de fuertes lluvias el nivel freático se elevará. El estándar de drenaje es que se permita que el nivel freático a subir no sea superior a 0.2 a 0.4 m por debajo de la superficie de la tierra y esta posición no se debe exceder. El cuadro N°4.11 muestra los espaciamientos y profundidades de drenes parcelarios más comunes en suelos no diferenciados.

Cuadro N°4.11.- Profundidades y espaciamientos de drenes, más comunes en suelos no diferenciados

Suelo	Espaciamiento(m)	Profundidad(m)
Arcilloso	10-17	1.00-1.15
Arcillo Limoso	13-23	1.00-1.15
Franco Limoso	20-33	1.15-1.30
Franco arenoso	33-40	1.30-1.50
Arenoso franco	33-67	1.30-1.65
Suelos irrigados	50-200	1.65-2.65

Fuente: Llerena Villaalpando Félix Alberto

Debido a que nuestra zona de estudio se encuentra en un suelo franco limoso se considera un espaciamiento de 30m entre los drenes parcelarios y una profundidad de 1.20m. La figura N°4.16 muestra el detalle del sistema parcelario de nuestro Polder.

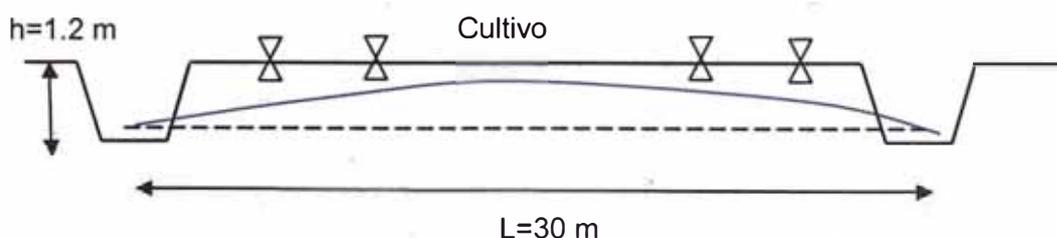


Figura N° 4.16.- Diseño del sistema parcelario

Sistema Principal: El sistema principal se compone de los drenes colectores y el dren principal. El diseño del sistema de drenaje se realiza para un caudal de diseño de 5 años según criterios agro-económicos recomendado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos y se separa en las siguientes etapas:

Escorrentía Superficial: Esta proviene de la precipitación, que no se infiltra y, escurre sobre la superficie del suelo. Para estimar la escorrentía se utiliza el método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (1985) mediante la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (4.4)$$

Donde:

P_e : Precipitación efectiva (mm)

P : Precipitación total (mm)

S : Infiltración Potencial (mm)

La información usada para el análisis de precipitación se obtuvo de la estación meteorológica de Taraco, ubicada a una latitud 15°18'18" Sur y una longitud 69°58'57" Oeste, de la cual se obtuvo la información durante un periodo de 1970-2011. El cuadro N°4.12 presenta la información de precipitación máxima en 24 horas en la estación meteorológica.

En base a esta información calculamos la precipitación máxima para un periodo de retorno de 5 años a través de la función de distribución Gumbel, ya que al realizar la prueba de bondad Smirnov-Kolmogorov es la que mejor se ajusta a la muestra. Aplicamos la ecuación del factor de frecuencia para obtener la precipitación máxima (P_T):

$$P = \bar{P} + K_T S_p \quad (4.5)$$

Donde:

\bar{P} : Precipitación media (mm)

K_T : Factor de frecuencia

S_p : Desviación estándar de los datos de precipitación

El factor de frecuencia (K_T) depende del periodo de retorno (T_r) y su valor es:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \right\} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{5}{5-1} \right) \right] \right\} = 0.719$$

Cuadro N°4.12.- Precipitación máxima de 24 horas (mm) durante 1970-2011 en la estación meteorológica de Taraco

Año	P _{max} (mm)	Año	P _{max} (mm)
1970	25.6	1991	26.8
1971	31.8	1992	43.0
1972	33.3	1993	20.4
1973	27.0	1994	34.2
1974	28.3	1995	66.4
1975	28.0	1996	22.4
1976	35.0	1997	52.2
1977	36.6	1998	55.8
1978	31.3	1999	23.6
1979	24.0	2000	26.0
1980	20.0	2001	28.0
1981	24.2	2002	20.4
1982	28.0	2003	24.6
1983	25.0	2004	43.0
1984	39.5	2005	64.0
1985	49.5	2006	48.8
1986	53.0	2007	46.8
1987	40.0	2008	28.6
1988	31.5	2009	50.2
1989	36.0	2010	21.4
1990	48.1	2011	23.6

Fuente: SENAMHI

Con este valor del factor de frecuencia calculamos la precipitación máxima al reemplazar en la ecuación (4.5)

$$P=34.90+0.719 \times 12.36=43.80\text{mm}$$

El valor de la infiltración Potencial (S) se calcula mediante la ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.6)$$

Esta ecuación 4.6 depende del sistema de unidades, por lo que el valor de S es en mm y CN es un número adimensional llamado número de curva, que varía de 0 a 100. El cuadro N°4.15 permite determinar el números de curva (CN) en función del tipo de suelo y uso de la tierra. Los cuadros N°4.13 y N°4.14 nos muestran el tipo de suelo y el uso de la tierra respectivamente, esto nos permitirá clasificar nuestra área de estudio para determinar el número de curva.

Cuadro N°4.13.- Tipo de suelo

Grupo de Suelo	Descripción
Grupo A	Suelos con alta capacidad de infiltración, arenas, gravas y loess profundos.
Grupo B	Suelos con capacidad de infiltración moderada, loess poco profundos, marga arenosa.
Grupo C	Suelos con capacidad de infiltración bajas, margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos generalmente con alto contenido de arcilla.
Grupo D	Suelos con muy baja capacidad de infiltración o en los que el nivel freático está cerca de la superficie. Suelos que aumentan de volumen cuando están mojados (suelos expansivos), arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Fuente: Sanchez San Roman, Francisco Javier

Cuadro N°4.14.- Uso de la Tierra

Uso de Tierra	Descripción
Barbecho	Tierra de cultivo que no se siembra. Las tierras que están en barbecho reciben generalmente algunas labores que contribuyen a reducir el grado de escorrentía, pero este es importante debido a la escasa cantidad de vegetación.
Cultivos en Hilera	Tierras sembradas de cultivos plantados formando hileras, lo que permite realizar labores agrícolas mientras otras plantas se desarrollan. Se pueden incluir en este grupo las siembras de la papa, el algodón, el maíz, el tomate, la betarraga, las frutas en general, almendras, viñas.
Cereales	Se incluyen en esta categoría las tierras dedicadas a cereales cuyo ciclo vegetativo puede desarrollarse durante el invierno tales como trigo, cebada, la avena y el centeno.
Rotación de Cultivo	Se refiere a la combinación de las dos anteriores. Praderas, prados y pastizales. A su vez se clasifican en: pobres(cobertura vegetal en menos del 50%), medias(moderado régimen de pastoreo), buenas(bajo un pastoreo ligero o con cobertura vegetal en más del 75% de la superficie) y muy buenos(se considera en este grupo a las praderas)
Plantaciones Regulares	Comprende las plantaciones regulares de árboles tales como chopos, eucaliptos, etc., los grupos son: pobre(no existe otro tipo de vegetación que la propiamente arbórea), medias(existe alguna vegetación además de la arbórea, sin embargo una parte importante del suelo carece de protección) y buenas(vegetación y materia vegetal no descompuesta cubren el terreno)
Masas Forestales	Se denominan así las superficies de terreno en las cuales se desarrolla vegetación leñosa arbórea o arbustiva, tales como el monte bajo, monte alto o los bosques. De acuerdo a la densidad de la vegetación se dividen en: muy espesas, espesas, medias, claras y muy claras.

Fuente: Sanchez San Roman, Francisco Javier

Cuadro N°4.15.- Números de Curva

Uso de la Tierra	Pendiente	A	B	C	D
Barbecho	≥ 3%	77	68	89	93
Barbecho	< 3%	71	78	82	86
Cultivos en hilera	≥ 3%	69	79	86	89
Cultivos en hilera	< 3%	64	73	78	82
Cereales de invierno	≥ 3%	63	75	83	86
Cereales de invierno	< 3%	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres	≥ 3%	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres	< 3%	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos	≥ 3%	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos	< 3%	52	67	76	79
Pradera pobre	≥ 3%	68	78	86	89
Pradera media	≥ 3%	49	69	78	85
Pradera buena	≥ 3%	42	60	74	79
Pradera muy buena	≥ 3%	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3%	46	67	81	88
Pradera media	< 3%	39	59	75	83
Pradera buena	< 3%	29	48	69	78
Pradera muy buena	< 3%	17	33	67	76
Plantaciones regulares Forestal pobre	≥ 3%	45	66	77	83
Plantaciones regulares Forestal medio	≥ 3%	39	60	73	78
Plantaciones regulares Forestal bueno	≥ 3%	33	54	69	77
Plantaciones regulares Forestal pobre	< 3%	40	60	73	78
Plantaciones regulares Forestal medio	< 3%	35	54	69	77
Plantaciones regulares Forestal bueno	< 3%	25	50	67	76
Masa forestal muy clara	No depende	56	75	86	91
Masa forestal clara	No depende	46	68	78	83
Masa forestal media	No depende	40	60	69	76
Masa forestal espesa	No depende	36	52	62	69
Masa forestal muy espesa	No depende	29	44	54	60
Rocas permeables	≥ 3%	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3%	91	91	91	91
Rocas impermeables	≥ 3%	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3%	93	93	93	93

Fuente: Sanchez San Roman, Francisco Javier

Para nuestro caso se consideran los siguientes datos:

Uso del suelo : Rotación de cultivos pobres

Pendiente : Menor al 3%

Tipo de suelo : Grupo D

Con esta información se entra en el cuadro 4.16, así el valor del número de curva es 83. Con el valor de CN, se calculó la infiltración potencial S

$$S = \frac{25400}{83} - 254 = 52.02 \text{mm}$$

Con el valor de S y P se obtiene la escorrentía superficial:

$$P_e = \frac{(43.80 - 0.2 \times 52.02)^2}{43.80 + 0.8 \times 52.02} = 13.06 \text{ mm}$$

Coefficiente de drenaje: El coeficiente de drenaje (C_d) indica el exceso de agua que debe ser removida y se expresa como un caudal por unidad de área (l/ha); se obtuvo mediante la ecuación:

$$C_d = 4.573 + 1.62 \times P_e \quad (4.7)$$

Para nuestro caso se obtiene un coeficiente de drenaje $C_d = 25.73 \text{ l/ha}$.

Caudal de diseño: El caudal de diseño es el volumen de agua que atravesará el dren para drenar un área determinada y en un tiempo determinado. El caudal de diseño se determinó con la ecuación:

$$Q = C_d A^{5/6} \quad (4.8)$$

Donde:

Q : Caudal (l/s)

A : Área (Ha)

C_d : Coeficiente de drenaje

Para nuestro caso el área del Polder es de 315.74 hectáreas, con esto calculamos el valor del caudal de diseño del dren principal:

$$Q = 25.73 \times 315.74^{5/6} = 3.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Determinación de la altura del Canal: La altura del canal se obtiene sumando la altura del máximo nivel de agua y un valor adicional llamado borde libre. En relación al caudal se tiene que a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ se tendrá un borde libre de 0.3 m con caudales mayores a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ se tendrá 0.4 m de borde libre (Villón 2009). Para canales en tierra se deja un borde libre igual a un tercio del tirante de agua.

$$h = y + \frac{y}{3} = \frac{4y}{3}$$

Determinación de los Taludes Laterales: La pendiente adecuada de los taludes del canal se determina teniendo en cuenta las características de los suelos. En el cuadro N°4.17 se dan recomendaciones para los taludes de canales en diferentes materiales.

Cuadro N°4.16.- Talud para secciones trapeziales en diferentes materiales

Características de los suelos	Talud para el canal	
	Poco profundo	Profundo
Roca en buenas condiciones	Vertical	1V:0.25H
Arcillas compactadas	1V:0.5H	1V:1H
Limos arcillosos	1V:1H	1V:1.5H
Limos arenosos	1V:1.5H	1V:2H
Arenas sueltas	1V:2H	1V:3H

Fuente: Trueba C. S.

De acuerdo a las características del suelo de la zona, formado por material limo arenoso se utilizara como se muestra en el cuadro N°4.16 un talud de 1:2 para el canal principal y para los secundarios(colectores) se utilizar un talud 1:1.5.

Pendiente admisible en canales de tierra: Se estableció una pendiente admisible en cada canal de 0.5-1.0% en función de la topografía y del tipo de suelo limo arenoso, para nuestro caso debido a la topografía se considera una pendiente de 0.5%.

Coefficiente de rugosidad: Se utilizó un coeficiente de 0.05 asumiendo que el canal o dren será bien mantenido (limpio) como se indica en el cuadro N°4.17.

Cuadro N°4.17.- Coeficiente de rugosidad según las condiciones del dren

Condición del dren	Valor de n
Muy limpio	0.022-0.030
Limpio	0.029-0.050
Con poca vegetación	0.040-0.067
Con moderada vegetación	0.050-0.100
Con exceso de vegetación	0.067-0.200

Fuente: Villón, 2004

Con esta información se calcula la geometría del canal principal trapezoidal para ello se utiliza la ecuación de Manning:

$$\frac{(b+zy)y}{(b+2)(1+Z^2y)^2} \frac{(Q-n)^3}{S^{1/2}}$$

Para el canal principal se tiene los siguientes datos:

$$\begin{aligned} Q &= 3.11 \text{ m}^3/\text{s} & n &= 0.05 \\ b &= 0.8 \text{ m} & S &= 0.005 \\ z &= 2 \end{aligned}$$

Con estos datos se obtiene un tirante de 1.08m, entonces la altura total del dren principal será $h=1.08+1.08/3=1.44\text{m}$. Para el dren colector se tendrá un ancho de 0.5m y una profundidad de 1.2m, la profundidad se determinó en base al sistema parcelario. La figura N°4.17 detalla las secciones del dren principal y de los drenes colectores:

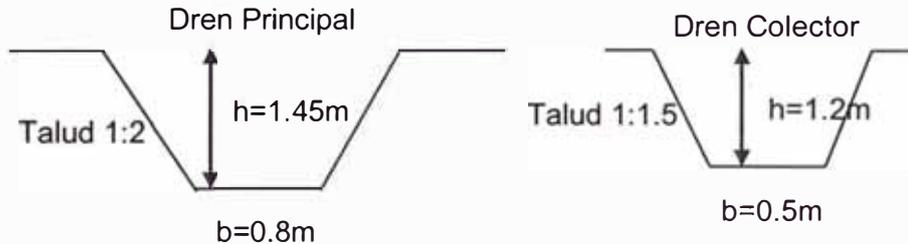


Figura N° 4.17.- Secciones del dren principal y dren colector

Estructura de Salida: La estructura de salida para drenar el agua al exterior de nuestro Polder será un molino de viento del tipo multipala americano (aerobomba), para ello debemos evaluar las características eólicas del lugar de estudio. Para establecer las velocidades básicas del viento se utiliza el mapa eólico del Perú, sin embargo; se debe tener en cuenta la variabilidad debida a las condiciones locales (topográficas, climáticas). En base a la figura N°4.18 le corresponde a la zona de estudio una velocidad de 4m/s.

Para el dimensionamiento del sistema de aerobombear se utiliza la siguiente relación, la cual determina la potencia eólica:

$$P=0.15 \times D \times V^3 \quad (4.9)$$

Donde:

P : Potencia eólica en vatios (W)

D : Diámetro del rotor del molino de viento (m^2)

V : Velocidad promedio del viento (m/s)

Esta potencia eólica generada por el viento debe ser igual a la potencia que se necesita para drenar el agua entonces igualamos las dos potencias para determinar el área del rotor:

$$0.15 \times D \times V^3 = \rho \times g \times H_b \times Q \quad (4.10)$$

Donde:

g : Constante de gravedad ($9.81\text{m}^2/\text{s}$)

ρ : Densidad del agua ($1000\text{Kg}/\text{m}^3$)

Q : Caudal a drenar (m^3/s)

H_b : Altura de bombeo (m/s)



Figura N°4.18.- Mapa eólico del Perú

Para nuestro caso el caudal a bombear será 1000l/h y la altura dinámica de bombeo es de 10m. Asimismo la velocidad del viento promedio de la zona es de 4m/s. Reemplazando estos datos en la ecuación 4.11 obtenemos el diámetro del rotor:

$$0.15 \times D \times 4^3 = 1000 \times 9.81 \times 10 \times 2.77 \times 10^{-4}$$

$$D = 2.83 \text{ m}$$

Utilizaremos un rotor de diámetro de 3m con un número de palas que puede oscilar entre 12 y 24 para obtener mayor solidez. Ahora determinamos las dimensiones de la bomba pistón, para ello usamos la siguiente ecuación:

$$Q = A_b \times L \times N \times n_{vol} \times i$$

Donde:

Q : Caudal de bombeo (m³/día)

Ab : Área de la bomba (m²)

L : Longitud de carrera del vástago (m)

N : Velocidad rotacional del rotor eólico medido en revoluciones por día

n_{vol} : Eficiencia volumétrica de la bomba

: Reducción de velocidad

Para nuestro caso se tiene los siguientes datos:

$$Q = 1000 \text{ l/h}$$

$$L = 70 \text{ mm}$$

$$N = 1 \text{ rps}$$

$$n_{\text{vol}} = 0.9$$

$$i = 1$$

Con estos datos determinamos el diámetro de la bomba:

$$2.77 \times 10^{-4} = A_b \times 0.07 \times 1 \times 0.9 \times 1$$

$$A_b = 4.39 \times 10^{-3}$$

Entonces el diámetro de la bomba es 0.058m, es decir una bomba de 3" de pistón.

c. Diseño del sistema de Riego

Evapotranspiración Potencial (ETP): Representa la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa, cubierta de hierba verde de 8 a 15 cm. de altura, que está creciendo activamente, que sombrea completamente el terreno y que no escasea de agua.

Para la determinación de la ETP se utiliza el método empírico de Thornthwaite. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Se calcula el índice de calor mensual "i" a partir de la temperatura media mensual (°C):

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

- Se calcula el índice de calor anual "I" sumando los 12 valores de i:

$$I = \sum i$$

- Se calcula la ETP mensual sin corregir mediante la siguiente ecuación:

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

Donde $a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0.49239$

d. Corrección para el número de días del mes y número de horas de sol:

$$ETP_{\text{corregida}} = ETP \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right)$$

El cuadro N°4.18 muestra los resultados de la evapotranspiración potencial mensual usando el método de Thornthwaite, la información de temperatura usada se presentó en el capítulo 2.

Cuadro N°4.18.- Evapotranspiración Potencial mensual mediante el método de Thornthwaite

Mes	Temperatura Media (°C)	Indice de Calor mensual (i)	ETP mensual sin corregir (mm/mes)	Días del mes	N° de horas de luz día	ETP mensual corregida (mm/mes)
Enero	10.24	2.96	57.19	31	11.0	54.18
Febrero	10.14	2.92	56.70	28	11.5	50.71
Marzo	9.61	2.69	54.05	31	11.3	52.59
Abril	7.94	2.01	45.61	30	11.0	41.81
Mayo	5.56	1.17	33.21	31	10.5	30.03
Junio	3.91	0.69	24.28	30	10.4	21.04
Julio	3.66	0.62	22.89	31	10.0	19.71
Agosto	5.04	1.01	30.43	31	10.3	26.99
Sep.	7.34	1.79	42.53	30	10.3	36.50
Octubre	9.40	2.60	53.00	31	10.4	47.46
Nov.	10.14	2.92	56.70	30	10.8	51.03
Dic.	10.53	3.09	58.63	31	11.0	55.54
I =		24.47				
a =		0.89				

Fuente: Elaboración Propia

Evapotranspiración Máxima (ETM): Representa la evapotranspiración en un cultivo determinado, en relación a la ETP, para lo cual se aplica coeficientes para cada cultivo de acuerdo a su periodo vegetativo (K_c):

$$ETM = K_c \times ETP \quad (4.11)$$

El coeficiente de cultivo (K_c) determinar los requerimientos de agua de un cultivo en cada etapa de su ciclo vegetativo. El Cuadro N°4.19 muestra para algunos cultivos el coeficiente de cultivo K_c promedio.

Cuadro N°4.19.- Valores de coeficiente de cultivo promedio K_c

CULTIVO	K_c	CULTIVO	K_c
Alfalfa	0.90	Lechuga	0.70
Alverja	0.89	Lenteja	0.79
Avena	0.80	Maíz	0.88
Berenjena	0.82	Papa	0.83
Caña de azúcar	0.95	Pimiento	0.83
Cebada	0.80	Trigo	0.80
Cebolla	0.90	Zanahoria	0.84
Col	0.86	Espinaca	0.73

Fuente: García Trisolini, Eduardo

Para nuestra área de estudio se contempla la siembra de varios cultivos, es decir se considera una parcela con 20% de papa, 40% de alfalfa y 40% de cebada.

$$K_{C \text{ promedio}} = 0.2 \times 0.83 + 0.4 \times 0.90 + 0.4 \times 0.80 = 0.846$$

Precipitación Efectiva (PE): Para el cálculo de la precipitación efectiva utilizaremos el método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos y la ecuación es la siguiente:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

El cuadro N°4.20 muestra la información de la precipitación total mensual mostrada en el capítulo 2, anteriormente se determinó el número de curva "CN" cuyo valor es de 83 para condiciones de humedad (AMC II).

Cuadro N°4.20.- Precipitación efectiva mensual mediante el método del número de Curva

Mes	Precipitación Total (mm)	Número de curva(CN)	Infiltración Potencial (mm)	Precipitación Efectiva (mm)
Enero	129.68	83	52.02	83.05
Febrero	106.73	83	52.02	62.55
Marzo	89.44	83	52.02	47.66
Abril	30.32	83	52.02	5.51
Mayo	6.69	67	125.10	3.15
Junio	5.07	67	125.10	3.79
Julio	1.32	67	125.10	5.54
Agosto	6.53	67	125.10	3.21
Septiembre	18.93	67	125.10	0.31
Octubre	40.18	83	52.02	10.84
Noviembre	41.87	83	52.02	11.86
Diciembre	82.18	83	52.02	41.62

Fuente: Elaboración Propia

Para las condiciones secas (AMC I) se utiliza la siguiente expresión:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

Obteniendo un valor de 67, con estos datos se calcula la infiltración potencial (S) a través de la ecuación (4.6) y posteriormente la precipitación efectiva (PE).

El cuadro N°4.21 muestra el cálculo de la demanda de agua de nuestro Polder para los cultivos de alfalfa, cebada y papa. La máxima demanda de agua ocurre en el mes de noviembre igual a 53.67l/s, en base a este valor podemos observar que la capacidad de la demanda de irrigación es mucho menor que la capacidad de drenaje, es por ello que se propone el uso del mismo sistema de drenaje que para el riego.

La figura N° 4.19 muestra el detalle de la red de canales del sistema de drenaje y riego y la ubicación de la estructura de salida (molino de viento).

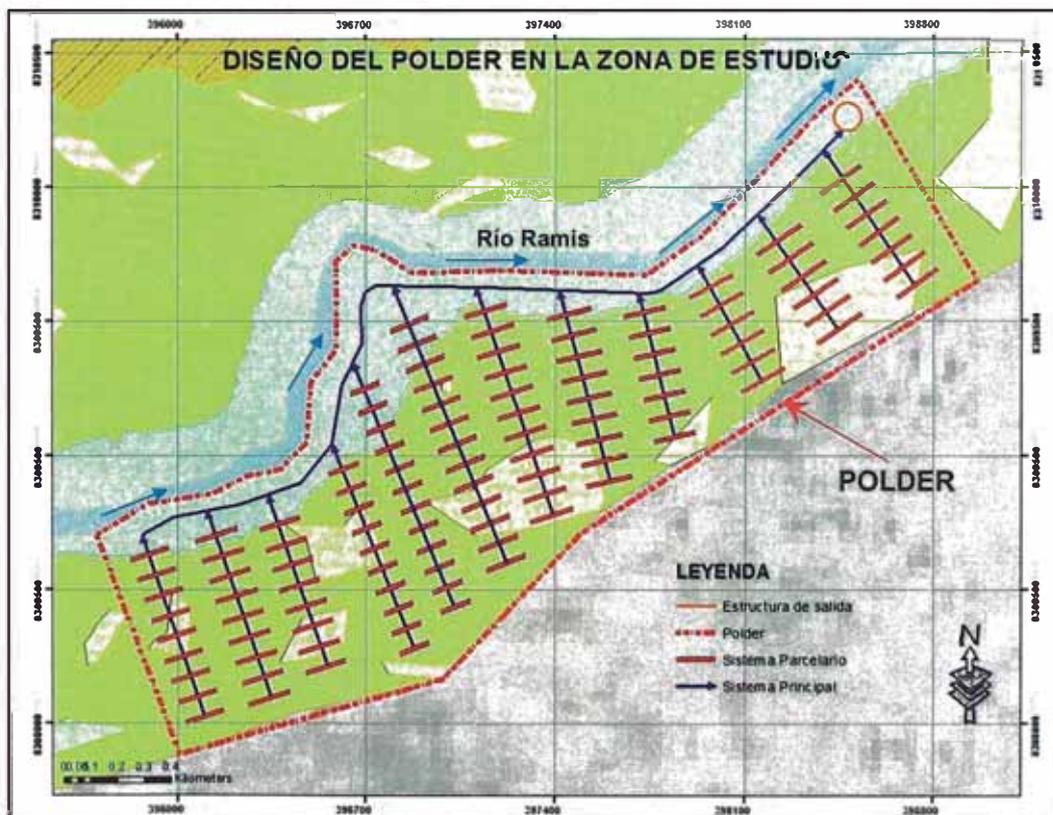


Figura N° 4.19.- Diseño del Polder en la zona de estudio

Cuadro N°4.21.- Cálculo de la Demanda de agua de la zona de estudio

Referencia/Mes	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abril	Mayo
ETP(mm)	21.04	19.71	26.99	36.50	47.46	51.03	55.54	54.18	50.71	52.59	41.48	30.03
Kc(alfalfa)	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
ETM(mm)	17.67	16.56	22.67	30.66	39.87	42.87	46.65	45.51	42.60	44.18	34.84	25.23
PE(mm)	3.79	5.54	3.21	0.31	10.84	11.86	41.62	83.05	62.55	47.66	5.51	3.15
Déficit(mm)	13.88	11.02	19.46	30.35	29.03	31.01	5.03	-37.54	-19.95	-3.48	29.33	22.08
Déficit al 70%(mm)	19.83	15.74	27.80	43.36	41.47	44.29	7.19	-	-	-	41.90	31.54
Demanda(m ³ /ha)	198.30	157.40	278.00	433.60	414.70	442.90	71.90	-	-	-	419.00	315.40
Modulo Riego(l/s/ha)	0.08	0.06	0.11	0.17	0.16	0.17	0.03	-	-	-	0.16	0.12
Caudal(l/s)	25.26	18.94	34.73	53.67	50.51	53.67	9.47	-	-	-	50.51	37.88

1. $ETM = K_c \times ETP$
2. $Déficit = ETM - PE$
3. $Déficit\ al\ 70\% = Déficit / 0.7$
4. $Demanda(m^3/ha) = Déficit\ al\ 70\% \times 10$
5. $Módulo\ de\ Riego\ (l/s/ha) = Demanda \times 1,000 / 2'592,000$
6. $Caudal(l/s) = Modulo\ de\ riego \times Área\ de\ riego$

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La evaluación de riesgos de la zona de pastizal y cultivo del área de estudio para una inundación del tipo estático tiene una tendencia de alta a muy alta para los diferentes periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años en promedio cuya predicción fue inferida a partir de la figura N°4.5, por otro lado para una inundación del tipo dinámico esta zona de pastizal y cultivo tiene una tendencia de riesgo de baja a muy alta para los diferentes periodos de retorno cuya predicción fue inferida a partir de la figura N°4.7.
- La evaluación de riesgos de la zona rural del área de estudio para una inundación del tipo estático tiene una tendencia alta para los diferentes periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años en promedio cuya predicción fue inferida a partir de la figura N°4.4, por otro lado para una inundación del tipo dinámico esta zona rural tiene una tendencia de riesgo de baja a media para los diferentes periodos de retorno cuya predicción fue inferida a partir de la figura N°4.6.
- El análisis de vulnerabilidad muestra que las zona de pastizal y cultivo son las principales áreas afectadas al generarse una inundación en el río Ramis, y esta vulnerabilidad se incrementa al aumentar el periodo de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años en promedio cuya predicción fue inferida a partir de la figura N°4.3. La zona rural también presenta una vulnerabilidad creciente pero muy lenta al aumentar los periodos de retorno, en cambio la zona urbana solamente se ve afectada para inundaciones de periodos de retorno altos como los de 50 y 100 años promedio.
- El análisis de peligro estático de la zona de estudio presenta un nivel de alto a muy alto, en cambio el análisis de peligro dinámico presenta un nivel de bajo a muy alto, y esta diferencia de los dos tipos de inundación se debe a la presencia de velocidades pequeñas con la que fluye el río Ramis al inundar el área de estudio.

- Los resultados de esta evaluación de riesgos de la zona de estudio indican que la superficie mayormente inundable es la zona de cultivo y pastizal, es decir son las actividades económicas de agricultura y ganadería las que principalmente son afectadas generando un retraso en la economía del distrito de Taraco, para solucionar estos problemas de inundación e incrementar el potencial agrícola y ganadero de la zona se ha considerado como la mejor alternativa de solución la construcción de un sistema Polder, esto permitirá evitar la inundación de las zonas estudiadas, controlar los niveles altos freáticos que dañan las zonas agrícolas, generando un mayor desarrollo agrícola y ganadero de esta región.
- En el presente estudio se ha diseñado un Sistema Polder en una área de 315.74 Ha obteniendo como resultados un dique de protección de 4m de ancho en la corona al contacto con el río Ramis, y un ancho de corona de 3m para el dique de protección lateral, asimismo se ha obtenido un sistema combinado de drenaje y riego, y se considerado como estructura de salida a un molino de viento, debido a que esta zona presenta ciertas condiciones eólicas aprovechables. Esta tesis busca ser el punto de partida para que el distrito de Taraco se convierta en una zona con potencial de desarrollo agrícola y ganadero, como lo alcanzaron los holandeses hace años. Por ello se debe continuar con estudios más minuciosos y detallados sobre esta zona ya que tiene ventajas naturales que deben ser explotadas como son: la topografía plana, la cercanía del río Ramis y la energía eólica de la zona.

5.2. RECOMENDACIONES

- A pesar de contar con información de curvas de nivel con una precisión de cada metro de la batimetría del río Ramis y de cierta parte de la llanura de inundación, la utilización de imágenes STRM para la ampliación de la llanura de inundación no es tan precisa, pero si es aceptable para un evaluación de riesgos de inundación, pero se debe tener en cuenta que una topografía con alta resolución dará mayor precisión a los resultados.
- Se recomienda continuar con el desarrollo de investigaciones de modelos numéricos bidimensionales ya que actualmente, la velocidad de cómputo y los programas de pre y post-proceso gráfico, con capacidad de generación

automática de mallas, hacen factible la modelación numérica en forma eficiente.

- Para la aplicación del sistema Polder en el distrito de Taraco se requiere la utilización de las aguas del río Ramis, por ello se recomienda a las autoridades realizar una gestión exhaustiva de políticas ambientales para frenar la contaminación del río Ramis debido a la explotación minera informal de distintos sectores de la cuenca alta, esto ha ocasionado perjuicios a los agricultores y regantes de la zona. Esto debe parar para permitir un desarrollo agrícola y ganadero del distrito de Taraco.
- Para mejorar la precisión del modelo hidráulico es necesario realizar el monitoreo de los niveles de agua a lo largo del río y evaluar cuantitativamente la sensibilidad e incertidumbre de los resultados del modelo. También es recomendable que los gobiernos locales, luego de un evento de crecida, realicen un mapeo rápido de las zonas afectadas por inundaciones, este tipo de información será muy útil a futuro en la validación de los mapas de inundación obtenidos del modelo hidráulico.

BIBLIOGRAFÍA

A. VOLKER, "Reclamation and Polders" Instituto Internacional de Hidráulica e Ingeniería Ambiental. The Hague 1982.

ALFARO ABANTO, Tomas. "Tratamiento de cauce del río para el control de Inundaciones en la cuenca Santa". Autoridad Nacional del Agua (ANA), Lima – Perú, 2011.

APARICIO MIJARES, Francisco Javier. "Fundamentos de Hidrología de Superficie". Grupo Noriega Editores Limusa. México 1989.

ARIS MARFAI, Muh "GIS Modelling of river and tidal flood hazards in a Waterfront city" Tesis del Instituto Internacional de Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra Enschede, Países Bajos, 2003. Consultado 15-03-13 Disponible: http://www.itc.nl/library/papers_2003/msc/ereg/marfai.pdf

CHEREQUE MORAN, Wendor. "Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil". Concytec. Lima, Perú 1989.

CHOQUEHUANCA SOLORZANO, Néstor Emilio. "Evaluación de Riesgos de inundaciones basados sobre GIS y modelamiento hidráulico del río Vilcanota entre los distritos de Pisac y Calca". IMEFEN, Lima -Perú, 2012

COMISION NACIONAL DEL AGUA. "Manual para el Control de Inundaciones". Comisión Nacional del Agua, Coyoacán – México, 2011.

ELERA MORENO, Germán Alonso. "Modelación numérica del río Piura utilizando River 2D, entre los puentes Cáceres e Integración". Tesis para Titulación Profesional – Universidad de Piura-FIC Civil, 2005.

GARCIA TRISOLINI, Eduardo. "Manual de pequeñas irrigaciones" Fondo Perú-Alemania, Lima-Perú, 2008.

GUERRERO BOHORQUEZ, Carlos & ZAVALA CARRION, Bilberdo. "Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Ramis". INGEMMET, Boletín N°30 Serie C- Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima – Perú, 2006.

HAJI SHIRONOSHITA, Susana "Plan de Defensa contra Inundaciones". Tesis para Titulación Profesional UNI - FIC Civil, 1992.

INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL. "Manual de estimación de riesgo ante inundaciones fluviales". Instituto Nacional de Defensa Civil, Lima – Perú, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES. "Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del Río Ramis". Ministerio de Agricultura, Puno-Perú, 2008.

MARTINEZ GARCIA, Pedro. "Metodología para el estudio de avenidas en Ramblas de cuencas mediterráneas utilizando Sistemas de Información Geográfica y modelos semidistribuidos". Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena-Colombia 2007.

MEZA SANABRIA, Daniel. "Proyecto de Irrigación por Bombeo de las Pampas de Taraco (Puno)". Tesis para Titulación Profesional UNI -FIC Civil, 1963.

PALOMINO CUYA, Daly Grace. "Zonificación de áreas inundables utilizando Sistemas de Información Geográfica – tramo final del río Chillón". Tesis para Titulación Profesional UNI – FIC Civil, 2001

VEN TE CHOW. "Hidráulica de Canales Abiertos". McGraw-Hill Interamericana. Santa Fe de Bogotá, Colombia 1994.

VEN TE CHOW, MAIDMENT David, MAYS Larry. "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill Interamericana. Santa Fe de Bogotá, Colombia 1994.

VICENTE MONTALVO, Israel "Análisis Hidrológico aplicando el sistema de información geográfica y comparación de modelos en la cuenca del río Crisnejas". Tesis para Titulación Profesional UNI - FIC Civil, 2011.

VILLON BEJAR, Máximo. "Hidrología Estadística". Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola. Lima-Perú 2005.

VILLON BEJAR, Máximo. "Drenaje". Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola. Lima-Perú 2007.

VILLON BEJAR, Máximo. "HEC-RAS Ejemplos". Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola. Lima-Perú 2011.