

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES
E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA SCADA:
APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLON

PRESENTADO POR:

OMAR BEDRIÑANA CARRASCO

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

DIRIGIDO POR:

ING. CRISTIAN CASTRO PÉREZ

AYACUCHO - PERU

JUNIO 2015

“SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA SCADA - APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RIO CHILLON”

RECOMENDADO : 17 DE ABRIL DEL 2015

APROBADO : 14 DE AGOSTO DEL 2015



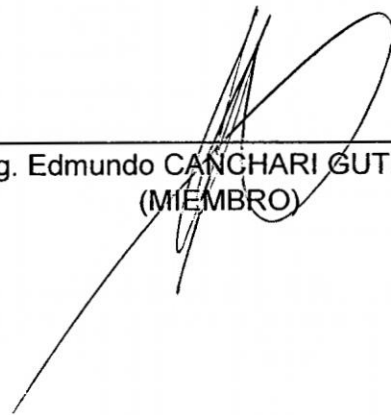
MSc. Ing. Carlos A. PRADO PRADO
(PRESIDENTE)



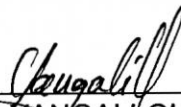
Ing. Jaime L. BENDEZU PRADO
(MIEMBRO)



Ing. Cristian CASTRO PEREZ
(MIEMBRO)

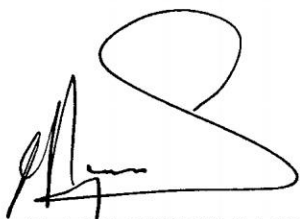


Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ
(MIEMBRO)



Ing. Floro N. TANGAL GUERRA
(SECRETARIO DOCENTE)

Según el acuerdo constatado en el Acta, levantado el 14 de agosto del 2015, en la Sustentación de Tesis presentado por el Bachiller en ciencias de la Ingeniería Civil Sr. Omar **BEDRIÑANA CARRASCO**, Con la Tesis Titulado “**SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA SCADA - APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RIO CHILLON**”, fue calificado con la nota de DIECISEIS (16) por lo que se da la respectiva APROBACION.




MSc. Ing. Carlos A. PRADO PRADO
(PRESIDENTE)



Ing. Jaime L. BENDEZU PRADO
(MIEMBRO)



Ing. Cristian CASTRO PEREZ
(MIEMBRO)



Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ
(MIEMBRO)



Ing. Floro N. YANGAZI GUERRA
(SECRETARIO DOCENTE)

Dedicatoria

*Con todo mi Cariño y Amor, para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y formarme con valores, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento: **Vidal y Honorata***

Agradecimientos

- Primeramente gracias a Dios, por darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas, enseñándome a encarar las adversidades y no desfallecer en el intento.
- A mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y más aun en mis duros años de carrera profesional y en especial quiero expresar mi más grande agradecimiento a mis padres que sin su ayuda hubiera sido imposible culminar mi profesión.
- A la Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga, por albergarme en sus aulas durante mi formación profesional.
- al Ing. Joel B. Ore Iwanaga, por orientarme en la Ingeniería Hidráulica y por darme la confianza y emprender este proyecto, que por razones ajenas a mi voluntad, no se ha logrado concluir en el plazo previsto, esperando que después de una larga espera se logre concretizar.
- Al Ing. Cristian Castro Perez, por sus enseñanzas en las aulas universitarias y por guiarme como asesor de la presente tesis.
- Al Ing. Jaime L. Bendezu Prado y demás docentes universitarios, por impartirnos sus conocimientos para enfrentar los problemas de la vida profesional.
- A mis compañeros de Aula de la Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga, por su amistad y gratos momentos vividos, especialmente para: Ebert Tinco, Willy Gomez, Pedro J. Cardenas, Hugo Ayala, Antonio Vilca, Heber Fernandez, Hernan Cerda.

Resumen

La presente tesis, pretende incorporar un sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones, mediante el control de lluvias y caudales en diferentes estaciones, los mismos que permitan predecir el hidrograma de avenidas generado en la parte alta de la cuenca, el mismo que debe ser transitado hasta el punto de aforo, que se encuentra en la Urbanización Sol de Carabaylo, y así mismo obtener información en tiempo real para alertar a la población asentada en ambas márgenes del río Chillón y estas sean advertidas con suficiente tiempo de la generación de una avenida extraordinaria y el posible desborde e inundación, e inmediatamente poner en marcha un plan de emergencia, que será establecido previamente.

Para el modelamiento Hidrológico e Hidráulico de la cuenca del Río Chillón y poder predecir con certeza los hidrogramas en los puntos de aforo, se aplicaran softwares de Sistema de Información geográfica (ArcGIS, extensiones HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS), que permitan un modelo más real de la variabilidad espacial del terreno, se utilizó estos softwares por ser de fácil acceso, y bastante difundidos en nuestro país.

Contenido

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
I INTRODUCCIÓN	1
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Generales	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Justificación e importancia del estudio	4
1.3.1. Aporte en forma directa	4
1.3.2. Aporte en forma indirecta	4
1.4. Planteamiento del trabajo realizado	5
1.4.1. Problema de la investigación	5
1.4.2. Definición del problema	5
1.4.3. Planteamiento final del problema	7
1.4.4. Relación del trabajado con otras investigaciones	7
1.5. Organización del estudio	8
1.5.1. Materiales y equipos	8
1.5.2. Diseño metodológico	8
1.5.3. Descripción del área de estudio	9

1.5.4.	Análisis de datos	9
1.5.5.	Estructura del trabajo	10
II	MARCO TEÓRICO	12
2.	Marco Teórico	13
2.1.	Estimación Satelital de Precipitaciones	13
2.1.1.	Introduccion	13
2.1.2.	Percepción Remota	14
2.1.2.1.	Satélites	14
2.1.2.2.	Sensores Remotos	16
2.1.3.	Satélites Meteorológicos	17
2.1.3.1.	GOES (Geostationary Operational Meteorological Satellite)	18
2.1.3.2.	TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)	18
2.1.4.	Programas de estimación de precipitación satelital	20
2.1.4.1.	Sistema PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks)	22
2.1.4.2.	Map server y Geo server HyDIS (Hydrologic Data and Information System)	23
2.1.5.	Medición de la Lluvia	24
2.1.5.1.	Redes meteorológicas	25
2.1.5.2.	Sistema radar	26
2.2.	Sistema SCADA para prevision de avenidas	27
2.2.1.	Introduccion	27
2.2.2.	Sistema SCADA	27
2.2.2.1.	Objetivos	28
2.2.2.2.	Funciones y Utilidades	28
2.2.2.3.	Ventajas	29
2.2.3.	Sistema de Alerta Temprana	31
2.2.4.	Requerimiento de Datos Para Prediccion en Tiempo Real	32

2.2.5.	Estructura del Sistema Automatizado de Alerta Temprana	33
2.2.5.1.	Modelos matemáticos de Simulación Hidrológica e Hidráulica	34
2.2.5.2.	Sistema de Información Geográfica	35
2.2.5.3.	Adquisición y supervisión de datos en tiempo real y diferido	36
2.2.5.4.	Base de datos histórica actualizada	37
2.2.5.5.	Integración de las herramientas en el sistema	38
2.2.6.	Modelación Lluvia Escorrentía para Previsión de Avenidas . . .	39
2.2.6.1.	Transformación Lluvia - Escorrentía	40
2.2.6.2.	Propagación de Caudales	43
2.2.7.	Ejemplos de Sistemas de Alerta Temprana	43
2.2.7.1.	En Perú	43
2.2.7.2.	En Europa	44
2.2.7.3.	En EEUU	46

III MATERIALES Y MÉTODOS **47**

3.	Materiales y Métodos	48
3.1.	Modelacion Hidrologica Mediante el SIG	48
3.1.1.	Introduccion	48
3.1.2.	Sistemas de Informacion Geografica (SIG) y su Relacion con la Hidrologia	49
3.1.2.1.	Definiciones	49
3.1.3.	Modelacion de Datos Geoespaciales	52
3.1.4.	Fuentes de Captura de Datos y tipos de información espacial . .	52
3.1.4.1.	Modelos digitales de terreno (MDT):	53
3.1.4.2.	Datos de redes hidrográficas	53
3.1.4.3.	Datos de tipos de suelo	53
3.1.4.4.	Datos de ortofotocartas digitales y cartas imágenes . .	53
3.1.4.5.	Datos extraídos de imágenes de sensores remotos . . .	54
3.1.5.	Modelación Hidrológica	54

3.1.5.1.	Ciclo Hidrológico y modelación Hidrológica	54
3.1.5.2.	Modelación de los Sistemas Naturales	56
3.1.5.3.	Clasificación de Modelos, Escalas Temporales y Espaciales	57
3.1.5.4.	Modelos Hidrológicos utilizados en SIG	57
3.1.6.	Modelo de Simulación Hidrológica HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)	61
3.1.6.1.	Aspectos Conceptuales	61
3.1.6.2.	Componentes del Modelo	61
3.1.7.	Modelo Continuo De Humedad De Suelo (SMA, SOIL MOISTURE ACCOUNT)	62
3.1.8.	Vinculación Modelos Hidrológicos y SIG	63
3.1.8.1.	Integración de SIG y Modelos Hidrológicos	63
3.1.8.2.	Extensión Geoespacial HEC-GeoHMS	64
3.2.	Modelación Hidráulica Mediante el SIG	65
3.2.1.	Introducción	65
3.2.2.	Fundamentos Básicos	66
3.2.2.1.	Sistemas de Información Geográfica (SIG)	66
3.2.2.2.	HEC-GeoRAS	69
3.2.2.3.	HEC-RAS	70
3.2.2.4.	Modelo Digital del Terreno (MDT)	71
3.2.3.	Metodología para la Simulación Hidráulica	73
3.2.3.1.	Software a Utilizarse	74
3.2.3.2.	Resumen de Pasos a Realizar	74
3.2.3.3.	Pre Proceso (Pre-RAS)	75
3.2.3.4.	Simulación Con HEC-RAS	86
3.2.3.5.	Post Proceso (Post-Ras)	91
3.3.	Tránsito de Hidrogramas en Cauces de Ríos	94
3.3.1.	Introducción	94
3.3.2.	Ecuaciones Básicas para Tránsito de Crecientes	95
3.3.2.1.	Ecuación de Continuidad	96
3.3.2.2.	Ecuación de Cantidad de Movimiento	99
3.3.3.	Clasificación de los Métodos de Solución	103

3.3.4.	Modelos unidimensionales	104
3.3.4.1.	Modelos 1D en régimen permanente	104
3.3.4.2.	Modelos 1D en régimen variable	104
3.3.4.3.	Métodos de solución para la ecuaciones de Saint Venant	104
3.3.4.4.	Métodos simplificados para la solución de las ecuaciones de Saint Venant	106
3.3.5.	Modelos cuasi-bidimensionales	108
3.3.6.	Modelos bidimensionales	108
3.3.7.	Elección de un Modelo	109
3.3.7.1.	Método de Tránsito Hidrológico	109
3.3.7.2.	Método de Tránsito Hidráulico	110
3.3.8.	Software Existentes	113
3.3.9.	Elección del modelo a utilizar	115

IV APLICACIÓN PRÁCTICA **116**

4.	Aplicacion Practica	117
4.1.	Aspectos Generales de la Cuenca de Aplicación	117
4.1.1.	Ubicación política y geográfica	117
4.1.2.	Extensión y Limites	117
4.1.3.	Información climática y ecológica	118
4.1.4.	Información Geológica y de suelos	118
4.2.	Software ArcGIS y Extensiones Hec-GeoHMS y ArcHydro	119
4.3.	Modelacion Hidrologica mediante Interface Geoespacial HEC-GeoHMS	120
4.3.1.	Preprocesamiento del modelo de terreno	121
4.3.2.	Proyect Setup (Configuración del proyecto)	129
4.3.3.	Características de los ríos y subcuencas	132
4.3.4.	Estimación de Parámetros Hidrológicos	134
4.3.5.	Sistema de Modelo Hidrológico (HMS)	137
4.3.6.	Calculo de la Tormenta de Diseño	143
4.3.7.	Calculo de la precipitación media sobre una zona	144
4.3.8.	Método SCS para Abstracciones	147

4.3.9. Tiempo de concentración	155
4.3.10. Simulación Mediante HEC-HMS	156
4.3.11. Resultados de la Simulación mediante el HEC-HMS	159
4.3.12. Calibración Del Modelo	161
4.4. Generación de máximas avenidas para diferentes periodos de retorno . .	164
4.5. Modelación Hidráulica mediante Interface Geoespacial HEC-GeoRAS .	166
4.6. Propuesta de modelo SCADA para control de avenidas en el Río Chillón	171
4.6.1. Componentes del modelo	171
4.6.2. Reglas de Operación	172
4.6.3. Implementación del proyecto	174
4.6.4. Programación	174
4.6.5. Presupuesto Referencial de instalación	175
V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	177
5. Conclusiones y Recomendaciones	178
5.1. Conclusiones	178
5.2. Recomendaciones	181
A. Zonas de Vida Ecologicas - Cuenca Rio Chillon	182
B. Datos historicos de precipitación	193
C. Planos del Proyecto de Aplicacion	197

Índice de figuras

2.1. Satélites de órbita geoestacionaria, Fuente: Revista CIRBUS UNEME .	15
2.2. Espectro Electromagnético, Fuente: www.martossemueve.es	17
2.3. Esquema de la medición de la lluvia por los diferentes sensores (PR, VIRS, TMI) transportados por el Satélite TRMM, Fuente: www.eorc.jaxa.jp	19
2.4. Programas Estimadores de Precipitación Satelital	20
2.5. Imagen del producto H-E para Perú, Fuente: ftp://nesdis	21
2.6. Estructura red Modified Counterpropagation Network (MCPN)	23
2.7. Visualización de datos PERSIANN a través de HyDIS system	24
2.8. Interfaz del GeoServer, consulta de la precipitación estimada por el PERSIANN-CCS	25
2.9. Radar meteorólogo y bandas de frecuencia, Fuente: Universidad Politécnica de Cataluña	27
2.10. Piramide CIM	31
2.11. Componentes principales del sistema	34
2.12. Recursos que involucran la adquisición y supervisión de los datos	36
2.13. Entidades generales identificadas en el diseño de la base de datos del sistema (los símbolos 1 y * representan la cardinalidad de la relación que se establece entre las entidades).	37
2.14. Actividades del proceso de modelación	39
2.15. Método del hidrograma unitario	40
2.16. Representación simplificada de un sistema hidrológico	41
2.17. Esquema de planos inclinados para simular la escorrentía sobre la su- perficie de una cuenca	43

3.1. Jerarquización de necesidades para los sistemas de Información Geográfica (Fisher M., 1999. <i>Project Management for GIS. UNIGIS, Manchester Metropolitan University</i>)	50
3.2. Ciclo del agua con balance promedio global anual de unidades relativas de un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre (Chow, 1959)	55
3.3. Clasificación de modelos hidrológicos (Fuente: Chow V.T. y otros, 1994)	57
3.4. Estructura del modelo MIKE-SHE. (Fuente: Danish Hydraulics Institute)	59
3.5. Esquema Integración HMS-GIS (Fuente: Hammerly, 2009)	61
3.6. Esquema del modelo continuo de humedad del suelo (SMA) (Fuente: Usase (a) , 2000)	63
3.7. Capa de información (CLD Cádiz).	67
3.8. Elementos de un SIG	68
3.9. Familia ArcGIS (ESRI)	69
3.10. Modelo Digital del Terreno (MDT)	72
3.11. Creación archivo ArcMap	76
3.12. Añadir Extensiones y Herramientas de Hec-GeoRAS	76
3.13. Barra de herramientas Hec-GeoRAS	77
3.14. Menu RAS Layers	78
3.15. Centro de la línea de corriente	79
3.16. Menu Editor	79
3.17. Asignación de nombre de río y tramo	79
3.18. Trayectorias de flujo	80
3.19. Líneas centrales de la trayectoria del flujo	81
3.20. Tipo de línea	81
3.21. Líneas de corte transversal	83
3.22. Perfil de las secciones transversales	83
3.23. Atributos de las secciones de corte	84
3.24. Creador lu-tabla Manning	85
3.25. Exportar Gis Data	85
3.26. Interfaz HEC RAS	86
3.27. Archivo Geométrico	87
3.28. Nueva sección transversal	88

3.29. Editor de secciones transversales	88
3.30. Coeficientes de contracción y expansión	89
3.31. Editor para la importación de datos geométricos	90
3.32. Filtrado de puntos en secciones transversales	91
3.33. Editor de valores de Manning's o k	92
3.34. Exportar datos GIS	93
3.35. Capa de instalación Hec-Ras pos procesamiento	93
3.36. Agua superficial TIN	94
3.37. Efecto del transito a lo largo de un canal o un río	95
3.38. Definición de términos sobre el perfil longitudinal de la canalización	97
3.39. Definición de términos sobre la vista en planta de la canalización	97
3.40. Definición de términos sobre la sección transversal de la canalización	98
3.41. ecuación de cantidad de movimiento en términos del tipo de flujo.	103
3.42. Diferencias entre las aproximaciones por onda dinámica y por onda cinemática, segun los aprecia un observador fijo en la orilla (<i>Chow, 1994</i>)	108
3.43. Modelos de transito	109
4.1. Abrir un nuevo proyecto	122
4.2. Herramientas Arc Hydro tools y GeoHMS tools	123
4.3. Barra de Herramientas HEC-GeoHMS	123
4.4. Barra de Herramientas Arc Hydro tools	124
4.5. Cuadro de propiedades del archivo Raster	124
4.6. Herramientas Arhydro de preprocesamiento de terreno	125
4.7. celdas de relleno de depresiones	126
4.8. Celdas de Dirección de flujo	126
4.9. Celdas de flujo acumulado	127
4.10. Celdas de la delimitación de subcuencas	128
4.11. procesamiento de subcuencas	129
4.12. Herramientas de configuración del proyecto	129
4.13. Editor para definir un nuevo proyecto	130
4.14. Selección del punto de aforo y delimitación de cuenca	131

4.15. editor para nombrar el conjunto de datos creado en el nuevo proyecto .	131
4.16. Herramientas de características de los ríos y subcuencas	132
4.17. Raster de pendientes	133
4.18. centroides y trayectorias de flujo de cada subcuenca	134
4.19. Herramientas para la estimación de parámetros	135
4.20. Métodos de modelamiento con HMS	136
4.21. Herramienta para nombrar los ríos	136
4.22. Herramienta para nombrar las subcuencas	137
4.23. Parámetros del modelo de Onda Cinemática	138
4.24. Herramienta de modelo hidrológico HMS	138
4.25. Configuración de unidades y características	139
4.26. Comprobación de datos para la consistencia	140
4.27. Creación del esquema de la cuenca	141
4.28. Herramienta para crear iconos de elemento de HMS	141
4.29. Agregar coordenadas	142
4.30. Precipitación acumulada	145
4.31. Histograma de diseño	145
4.32. Modelo de la cuenca exportado a HEC-HMS	158
4.33. Creación de hietograma en el HEC-HMS	159
4.34. Descarga pico del modelamiento hidrológico del Rio Chillón	160
4.35. Hidrograma de salida en la Urbanización Sol de Carabayllo	160
4.36. Hidrograma de salida para un $Tr=500$ años	165
4.37. Conversión de curvas de nivel en formato CAD a shapefile	167
4.38. Modelo Digital del terreno mediante un TIN	168
4.39. Datos de exportación a HEC-RAS	169
4.40. Datos de importación de HEC-RAS	171
4.41. Componentes de la Propuesta de un SCADA para la prevision de crecidas	176

Indice de tablas

2.1. Variables a medir en el sistema de alerta temprana	36
3.1. Softwares disponibles para el tránsito de crecidas	114
4.1. Información climática y ecológica de la cuenca del rio Chillón	118
4.2. Precipitación máxima en 24 hrs	143
4.3. factores para la tormenta de diseño	144
4.4. Áreas de influencia de los estaciones para cada subcuenca	146
4.5. Clasificación de AMC	148
4.6. Estimación Numero de Curva	150
4.7. Zonas de vida de la cuenca del Río Chillon	151
4.8. Estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón . . .	151
4.9. continuación estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón	152
4.10. continuación estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón	153
4.11. continuación estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón	154
4.12. Numero de curva para condiciones normales, secas y húmedas	154
4.13. Numero de curva para condiciones normales, secas y húmedas	157
4.14. Descargas Reales horarios del Rio Chillón para calibración	162
4.15. Comparacion entre caudales pico simulado y observado	163
4.16. Registro de datos históricos 1992-2001	164
4.17. Resultados HEC-4	165
4.18. Caudales Pico para diferentes Tr	166

4.19. Presupuesto referencial de instalación de un SCADA	175
4.20. Presupuesto referencial de operación y mantenimiento anual	176
B.1. Datos históricos de precipitación (1989-2002), Estación Canta (SENAMHI)	193
B.2. Datos históricos de precipitación (1991-2002), Estación Lachaqui (SENAMHI)	194
B.3. Datos históricos de precipitación (1991-2002), Estación Pariacancha (SENAMHI)	194
B.4. Datos históricos de precipitación (1985-2001), Estación Huamantanga (SENAMHI)	195
B.5. Datos históricos de precipitación (1991-2002), Estación Arahuaay (SENAMHI)	195
B.6. Datos históricos de precipitación (1992-2001), Estación Huaros (SENAMHI)	196

Parte I

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Las inundaciones en el Perú son un problema recurrente cada año, debido a la estacionalidad de las precipitaciones en la región andina, lo cual tiene época seca y época de lluvia bien diferenciada, esta última de diciembre a marzo, sumando a los años de presencia del fenómeno del Niño hacen que los ríos que bajan de la región andina a la costa aumentan varias veces su magnitud, desbordándose y ocasionando daños en las ciudades de la costa de nuestro país. Las instituciones del estado tales como INRENA, ANA, etc. cuentan con planes de tratamiento de cauces en ríos pero debido a la falta de financiamiento no son de manera integral.

Otras de las causas por las que ocurren constantemente problemas de inundaciones en nuestro país, es la falta de conocimiento y planes de delimitación de fajas marginales de los ríos, ya que la población se asienta en los cauces de los ríos y está expuesta constantemente a sufrir inundaciones, recuperando el río sus planicies de inundación cuando ocurren eventos extremos de precipitación.

Actualmente en los países del primer mundo cuentan con sistemas de alerta temprana sofisticados para cualquier tipo de eventos hidrometeorológicos, debido al desarrollo de la telemetría y redes satelitales para dicho fin. En nuestro país es todavía lejano contar con estos sistemas por falta de interés de las instituciones encargadas del manejo de datos hidrometeorológicos, el único caso que se pudo registrar es el sistema de alerta temprana (SIAT) del río Piura, pero al parecer con algunas deficiencias en

su ejecución. Sin embargo hoy en día con las nuevas tendencias del cambio climático es necesario contar con estos sistemas de alerta temprana automatizada para alertar a la población con anticipación de inminentes riesgos de inundación y evitar pérdidas de vidas humanas, ya que la ocurrencia de eventos extraordinarios será con mayor frecuencia y posiblemente con mayor intensidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Generales

- El objetivo de esta investigación es plantear un sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones aplicado a la cuenca del río Chillón, a partir de la información de precipitaciones y caudales de las estaciones inmersas en esta cuenca y con la ayuda de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG); controlar en tiempo real las avenidas y prevenir de esta manera con un tiempo de anticipación la generación de una avenida extraordinaria, que pueda comprometer el colapso de los hogares asentados en ambas márgenes de este río, cuya aplicación práctica tendrá repercusión directa en el distrito de Carabayllo.

1.2.2. Específicos

- Realizar la investigación y análisis de la estimación de precipitación mediante satélites y radares, sus ventajas en la modelación hidrológica.
- Realizar la investigación y análisis de los sistemas SCADA de alerta temprana, así como mostrar sus potencialidades para prevenir desastres naturales a causa de inundaciones, debido a caudales extraordinarios.
- Utilizar las herramientas de Sistemas de Información Geográfica, para realizar la modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca del Río Chillón, con punto de aforo en el distrito de Carabayllo - Lima, ya que los softwares SIG (ArcGIS), trabajan con datos Geospaciales distribuidos, y cuentan con herramientas de interacción con softwares de modelamiento Hidrológico e Hidráulico (HEC-HMS y HEC-RAS).

- Calibrar los parámetros del modelamiento de la cuenca, con los datos históricos de caudales con las que se cuenta.
- Plantear un sistema SCADA, mediante la incorporación de nuevas estaciones automáticas con transmisión de datos en tiempo real, para obtener datos que permitan realizar una modelación precipitación - escorrentía adecuada y en tiempo real, así alertar a la población con tiempo de anticipación cuando ocurren eventos extremos de precipitación y ante una inminente inundación. así como también estimar el costo de la instalación, operación y mantenimiento de un sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones, para la cuenca del Río Chillón.

1.3. Justificación e importancia del estudio

1.3.1. Aporte en forma directa

Cada año, la cuenca del Río Chillón, presenta riesgos de inundación a lo largo de su recorrido, especialmente en la ciudad de Lima, siendo un malestar permanente para los pobladores asentados en ambas riberas, que años anteriores han sufrido pérdidas económicas y hasta vidas humanas debido al desborde del Río Chillón, Razón por la cual y con el único afán de mostrar las pautas para la elaboración de un sistema de alerta temprana de avenidas a partir de un sistema SCADA, se presenta la presente investigación, de tal forma de prevenir a la población con anticipación del peligro inminente y así mismo a tiempo para evitar la inundación de hogares.

Contando con un sistema de alerta temprana, para previsión de avenidas, a partir de los datos de diferentes estaciones meteorológicas y hidrométricas, se puede construir un sistema SCADA, que es un sistema de control de supervisión en tiempo real del comportamiento de lluvia escorrentía en la cuenca del Río Chillón, que permita asegurar la tranquilidad de las poblaciones asentadas en ambas márgenes de este Río.

1.3.2. Aporte en forma indirecta

En la actualidad, debido al desarrollo en la obtención y medición de datos hidrometeorológicos en tiempo real (mediante satélites y radares) y teniendo en cuen-

ta que el hombre ante eventos extremos de la naturaleza no ha logrado controlarla. Es por ello que desde hace unas décadas atrás, se han desarrollado los sistemas de alerta temprana de amenazas naturales y desastres de origen natural. Estos avances tecnológicos permiten monitorear y pronosticar mejor las condiciones climáticas extremas a mediano plazo, tales como los eventos de El Niño y ayudaran a emitir alertas sobre la existencia de amenazas a largo plazo relacionados con el cambio ambiental. Los sistemas avanzados de alerta temprana, solo serán eficaces si hay un intercambio libre e irrestricto de información meteorológica.

1.4. Planteamiento del trabajo realizado

1.4.1. Problema de la investigación

Las avenidas en ríos es un problema común, que suele presentarse en nuestro suelo peruano, en épocas de lluvia, durante los meses de Diciembre a Marzo, meses en los cuales, se tienen excesivas tasa de lluvia que generan inundaciones y el consiguiente malestar de la población que tiene que sufrir años tras año, las inclemencias del tiempo, llegando a perderse en muchos casos perdidas económicas hasta pérdidas de vidas humanas, por el hecho de no contar con un sistema de alerta temprana que permita a la población estar prevenidos con horas de anticipación de la posible inundación a través del tránsito del hidrograma de máximas avenidas registrado en estaciones aguas arriba de los diferentes puntos de aforo en la cuenca hasta su llegada a puntos críticos de inundación.

1.4.2. Definición del problema

El presente trabajo, se pretende incorporar un sistema de alerta temprana de avenidas, mediante el control de lluvias y caudales en diferentes estaciones, los mismos que permitan predecir el hidrograma de avenidas generado en la parte alta de la cuenca, el mismo que debe ser transitado hasta los diferentes puntos de aforo y así mismo obtener información en tiempo real para alertar a la población asentada en las margenes del cauce de Río Chillón para evacuar la zona por un inminente inundación.

Para el desarrollo de la presente investigación, es necesaria la aplicación del sistema de información geográfica, que permita un acercamiento de la variabilidad espacial del terreno, así como la ubicación de las diferentes estaciones inmersas dentro de la cuenca de estudio, hasta el punto de aforo, ubicado en Carabayllo de la ciudad de Lima.

A partir de las diferentes estaciones que registran precipitación y caudal inmersas dentro de la cuenca del río Chillón, se realiza una propuesta a nivel de un sistema SCADA, que permita monitorear los hidrogramas de caudal registrados en las estaciones de la parte alta y predecir en tiempo real, la llegada de estas avenidas a diferentes puntos críticos ubicados en zonas urbanas, teniendo en cuenta que hoy en día existen estaciones hidrometeorológicas e hidrométricas inalámbricas, los mismos que transferirán sus datos a un programa propio de los equipos, luego a una hoja de cálculo, para finalmente obtener los hidrogramas de máxima avenida, los mismos que serán transitados hasta los puntos de aforo críticos, a partir de los cuales se sabrá con que tiempo llegaran a estos puntos y poder finalmente prevenir a la población de un inminente peligro.

Hoy en día existen numerosas técnicas para realizar la transformación precipitación en escorrentía en una cuenca rural, así como su tránsito a través de canales (ríos), a partir de los cuales, es factible realizar un sistema de alerta que pueda prevenir a la población de una inminente inundación.

La propuesta de un sistema SCADA (Supervisión de Control y Adquisición de Datos), en una cuenca rural es un sistema de información en tiempo real que se encarga de captar variables hidrológicas e hidráulicas, transmitir las, procesarlas y presentarlas de una forma útil para la previsión de avenidas.

El sistema SCADA también permitiría a futuro registrar lo siguiente en una cuenca:

- Archivo de datos hidrológicos fiables y continuados.
- Elaboración automática de informes y estadísticas.
- Difusión pública de información.
- Conocimiento de la estructura espacio temporal de las precipitaciones.
- Conocimiento de la propagación de las ondas de crecida.
- Familiarización con tecnologías modernas en el campo de los recursos hidráulicos.

Finalmente el Centro de Gestión para una cuenca, en donde se recibe y archiva de modo automático toda la información, y al mismo tiempo se utiliza mediante el empleo de las aplicaciones adecuadas, para tomar las decisiones más convenientes en cada momento.

1.4.3. Planteamiento final del problema

De acuerdo a las premisas del problema de investigación y la definición del problema, finalmente se plantea automatizar las estaciones pluviométricas e hidrométricas inmersas en la cuenca del río Chillón, de modo tal que mediante una red telemétrica obtener datos de las estaciones mencionados, en tiempo real en una estación central para luego procesar los datos mediante los software y técnicas descritas en la presente investigación y tomar decisiones en caso de estar en inminente peligro de inundación. Bajo esta propuesta el proyecto de investigación fue denominada:

*"SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES E
IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA SCADA: APLICACIÓN EN LA CUENCA
DEL RÍO CHILLON".*

1.4.4. Relación del trabajado con otras investigaciones

En nuestro país es incipiente la utilización de técnicas de sistemas de alerta temprana para eventos hidrometeorológicos, el único caso que se pudo registrar es el SIAT del río Piura. Por lo que no existen investigaciones ni referencias bibliográficas al respecto. Pero sin embargo en otros países del mundo estas técnicas ya se han desarrollado desde hacía décadas atrás, contándose en la actualidad con técnicas y métodos modernos para obtener datos hidrometeorológicos en tiempo real (satélites y radares) y así realizar gestiones ante diversos eventos extremos, como los que se menciona algunos casos en el capítulo **2.2**.

1.5. Organización del estudio

Una vez planteada el problema de investigación, estructuramos el presente trabajo en 5 capítulos, seguida por los apéndices y la bibliografía utilizada para su desarrollo.

1.5.1. Materiales y equipos

Para el desarrollo de la presente investigación se requirió de los siguientes equipos y materiales:

- Estación total.
- GPS.
- Wincha.
- Cartas Nacionales.
- Delimitación de franjas marginales del río Chillón.
- Estudios en la cuenca del río Chillón.
- Informaciones varias inherentes al tema de investigación.
- Otros.

1.5.2. Diseño metodológico

Se realizó las siguientes tipos de investigación

Exploratorio: El objetivo es examinar un tema o problema poco aplicado en nuestro ámbito regional y nacional, es decir que en la revisión de la literatura e información preliminar de campo no se ha encontrado mucha informacio con el problema del estudio; asi como también se ha descrito nuevas técnicas de obtención de precipitación.

Por lo anteriormente planteado se puede inferir en la posibilidad de continuar el estudio y crear nuevas investigaciones a partir de la existente.

Descriptivo: Considerando las variables en estudio se determina que la investigación es de carácter descriptiva, puesto que estos tienen como objetivo establecer como es y cómo se manifiesta un determinado fenómeno que atrae la atención de tal manera que se limita a identificar sus características o propiedades en un momento determinado.

Correlacional: Porque se establece la relación directa entre la variable independiente y dependiente, puesto que lo que se pretende es investigar en qué medida la instalación de un sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones repercutirá en la seguridad e integridad de los pobladores asentados en las márgenes del río Chillón.

1.5.3. Descripción del área de estudio

El área de estudio para el tema de investigación viene a ser la cuenca hidrográfica del río Chillón, cuyo área de estudio comprende 2220km^2 , de las cuales 1089km^2 corresponden a la denominada cuenca húmeda o colectora; altitudinalmente la cuenca oscila entre los 0msnm . En el límite con el océano pacífico y los 5000msnm . En la cordillera La Viuda, divisoria de las vertientes del pacífico y atlántico, alcanzándose una altura promedio de 2370msnm . Las mayores crecidas se presentan entre los meses de enero a marzo. La cuenca está instrumentada mediante 7 estaciones pluviométricas y 1 estación hidrométrica.

El punto de aforo o análisis viene a ser la población de la urbanización Sol de Carabaylo, asentada en las márgenes del río Chillón, que actualmente se están construyendo condominios por empresas inmobiliarias.

1.5.4. Análisis de datos

Se aplicaron métodos, instrumentos y procedimientos de acuerdo a lo siguiente:

- Revisión de datos conseguidos.
- Generación de precipitación para diferentes tiempos de retorno.
- Discretización de la cuenca.
- Aplicación de software para el análisis hidrológico e hidráulico.

- Calibración del modelo y parámetros de la cuenca.
- Presentación de mapas de inundación.
- Plantear un sistema SCADA de alerta de inundaciones.

1.5.5. Estructura del trabajo

Capítulo I: Introducción.

- **1: Introducción.** Se justifica el tema de tesis presentado, se definen los objetivos propuestos, se plantea el problema de investigación y se pone de manifiesto la estructura del texto.

Capítulo II: Marco Teorico.

- **2.1: Estimacion Satelital De Precipitaciones.** Se presenta y describe las nuevas tendencias de estimación de precipitación mediante satélites y sus diversos modelos y técnicas de desarrollo. Que es una tecnología que actualmente se viene desarrollando para el control y obtención de datos de precipitación con una mejor distribución espacial y en tiempo real.
- **2.2: Sistema SCADA para previsión de avenidas.** Se describe las potencialidades y ventajas de os sistemas SCADA, así como los sistemas de alerta temprana y sus diversas herramientas y métodos para su implementación, también se describen algunos casos reales en diferentes partes del mundo.

Capítulo III: Materiales y Métodos.

- **3.1: Modelación Hidrológica Mediante el SIG.** En este capítulo se desarrolla la estrecha relación de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología, describiéndose las características de los datos de entrada y la obtención de resultados mediante la modelación. El software utilizado para el modelamiento hidrológico es el HEC-HMS y su interface geoespacial HEC-GeoHMS.

- **3.2: Modelación Hidráulica Mediante el SIG.** En este capítulo se desarrolla los fundamentos básicos y la metodología para el modelamiento hidráulico mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El software utilizado para el modelamiento hidráulico es el HEC-RAS y su interface geoespacial HEC-GeoRAS.
- **3.3: Transito de Hidrogramas en Cauces de Ríos.** En este capítulo se describe las ecuaciones básicas para el tránsito de crecientes y los diversos modelos existentes tanto unidimensionales, cuasi-bidimensionales y bidimensionales. Se mencionan también el software existente para el modelamiento. Finalmente se elige el modelo a utilizar en el trabajo de investigación.

Capítulo IV: Aplicación Práctica

- **Capítulo 4: Aplicación Practica.** Teniendo como unidad de estudio la cuenca del rio Chillón, se desarrolla la modelación hidrológica mediante el interface geoespacial HEC-GeoHMS, para generar máximas avenidas para diferentes periodos de retorno y luego desarrollar la modelación hidráulica mediante el interface geoespacial HEC-GeoRAS, para generar las mapas de inundación. Finalmente en base a ello proponer la implementación de un sistema SCADA para la alerta temprana de inundaciones en la cuenca del rio Chillón.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

- **Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.** Finalmente presentamos nuestras apreciaciones, aciertos y fallas en nuestra investigación.

Parte II

MARCO TEÓRICO

Capitulo 2

Marco Teórico

2.1. Estimación Satelital de Precipitaciones

2.1.1. Introduccion

En la actualidad las presiones humanas sobre el medio natural han causado fuertes cambios en los flujos de materia y energía del planeta. Los cambios referidos al *ciclo hidrológico* amenazan su regularidad hídrica (Hammerly, y otros, 2009). Esta situación requiere especial atención bajo condiciones de un clima cambiante en el que la ocurrencia de fenómenos extremos se han intensificado (Hammerly, y otros, 2009). Por lo anterior se requiere aumentar la capacidad de pronósticos en los sistemas de gestión del agua y de prevención de desastres relacionados con ésta. Un elemento que impide el aumento en la precisión de los pronósticos hidrológicos es la deficiente disponibilidad que se tiene sobre la información de *precipitaciones*, que alimentan los modelos matemáticos desarrollados para el *pronóstico hidrológico* (Hammerly, y otros, 2009). Las *precipitaciones* presentan una alta variabilidad espacio-temporal que no es adecuadamente reflejada por la red pluviométrica del país, en especial en escalas temporales de alta resolución (diaria y horaria). Dado que para muchos sistemas de gestión del agua y/o de *alertas tempranas*, las *precipitaciones* son el impulso que activa el proceso de predicción, el mencionado vacío afecta considerablemente el desempeño de los sistemas de *pronóstico* y/o *simulación hidrológica*.

El desarrollo de este capítulo se orienta a describir la potencialidad de la Percepción Remota y de los programas de estimación de precipitación que existen actualmente.

2.1.2. Percepción Remota

El término de Teledetección, Percepción Remota (PR), se puede definir "*como un conjunto de conocimientos y técnicas usadas para determinar características físicas y biológicas de objetos mediante mediciones a distancia, sin el contacto material con los mismos*" o "*como la ciencia y arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través de datos adquiridos por un sensor que no esté en contacto con el objeto de la investigación*" (Caicedo, 2009).

A finales de los años cincuenta con el desarrollo de los sistemas de navegación en la denominada guerra fría, se genera un interés importante en estos temas, el lanzamiento de satélites con el objeto de explorar la tierra con observaciones meteorológicas, marcó los inicios en la obtención de imágenes satelitales.

Existen dos tipos de percepción remota:

Percepción Pasiva: Es cuando se utilizan fuentes de radiación de energía natural como la radiación solar y la radiación emitida por la interacción tierra atmósfera.

Percepción Activa: Se presenta cuando la irradiación utilizada proviene de una fuente artificial, por ejemplo desde el mismo sensor.

Un sistema de teledetección se encuentra compuesto esencialmente por 2 elementos: la plataforma (satélite) y el sensor (sensor remoto), sin restarle importancia a los demás elementos como el objeto, la fuente de energía, el sistema de transmisión y la función del usuario. A continuación se presentan en detalle los dos elementos esenciales, línea base de esta investigación y algunos programas espaciales de teledetección.

2.1.2.1. Satélites

Los satélites originalmente son considerados como cuerpos encargados de realizar un movimiento alrededor de un objeto de mayor tamaño. Existen los naturales como las lunas y los artificiales construidos por el hombre. Estos últimos son los que observan el planeta mediante sensores multispectrales, realizando tareas como: localizar recursos naturales, vigilar las condiciones de los cultivos, el grado de deforestación, el avance de la contaminación en los mares y muy importante, conocer el comportamiento de variables meteorológicas como: *precipitación*, temperatura, radiación solar, entre otras.

El primer satélite con finalidad de aplicación exclusivamente meteorológica fue lanzado en abril de 1960, el *TIROS-1* (Television Infrared Observation Satellite) por la *NASA*.

La clasificación de los satélites se realiza de acuerdo a su órbita. La órbita de un satélite es el camino que sigue alrededor de la Tierra. Estas órbitas se definen de acuerdo con la capacidad y el objeto de la misión del satélite. La selección de la órbita puede variar en términos de altitud (su altura sobre la superficie de la Tierra) y su rotación con respecto a la Tierra. Según su órbita los satélites se clasifican en dos tipos (Figura 2.1).

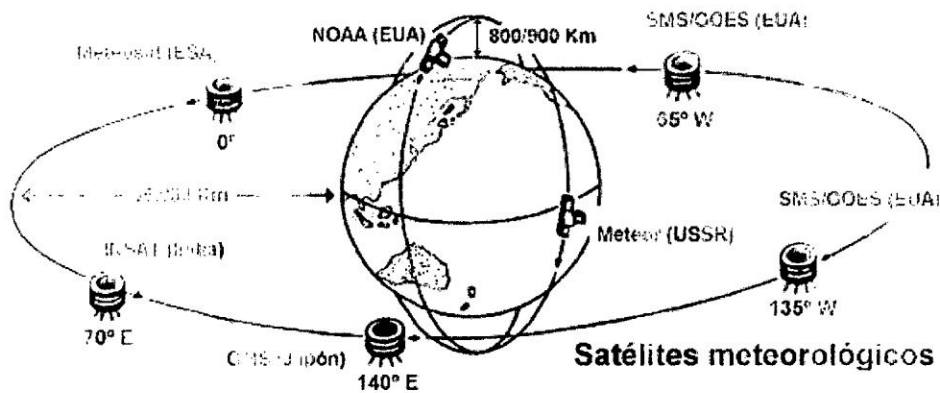


Figura 2.1: Satélites de órbita geoestacionaria, Fuente: Revista CIRRUS UNEME

- Satélites de órbita geoestacionaria
- Satélites de órbita polar

Los *satélites de órbita geoestacionaria*, (*GMS*, *METEOSAT*, *GOMS*, *GOES*, *INSAT*) giran en torno a la Tierra sincronizados con su velocidad de rotación, es decir que acompañan a la Tierra y por consiguiente se encuentran situados siempre en un mismo punto sobre la superficie terrestre ¹.

Actualmente se encuentran en operatividad cinco satélites meteorológicos situados en esta órbita geoestacionaria: el *INSAT* de India, los americanos *GOES E* y *W*

¹Esta sección tiene como referencia principal, la revista CIRRUS, es una publicación de Unión Nacional de los Estudiosos en Meteorología - UNEMET, Brasil, distribuida gratuitamente a los usuarios registrados en web

(Geostationary Operational Meteorological Satellite), el *GMS* (Geostationary Environmental Satellite) japonés, el *METEOSAT* (European Geostationar and Meteorological Satellite), de la Unión Europea y el *GOMS* (Geostationary Operational Environmental Satellite) de Rusia.

Los *satélites de órbita polar*, (*TIROS-NOAA*, *METEOR*), orbitan la Tierra en la dirección norte y sur y viceversa. Estos satélites permiten observar los fenómenos atmosféricos en altas latitudes. Las zonas geográficas situadas por encima de 60° de latitud no pueden ser monitoreadas por los satélites geoestacionarios debido a la esfericidad de la Tierra. Los *TIROS*, satélites de los Estados Unidos cuyos nombres figuran como *NOAA* (National Oceanic and Atmospheric Administration) seguido de un número (*NOAA-12*, *NOAA-14*, etc.) y los *METEOR*, satélites Rusos (*METEOR-2*, *METEOR 3-5*, etc.) son los más utilizados. Actualmente se encuentran en operatividad el *NOAA-12*, *NOAA-14*, *NOAA-15* y el *METEOR 3-5*. El *NOAA-15* sustituyó al *NOAA-12* definitivamente en junio de 1999.

Existen además satélites que no tienen órbitas polares ni geoestacionarias. En estos casos el recorrido de la órbita ha sido modificado para satisfacer requerimientos específicos de la ciencia. El *TRMM* (Tropical Rainfall Mapping Mission) es un ejemplo de este tipo de satélite. Está posicionado a 350 Km. por encima de la superficie terrestre y su órbita forma un ángulo de 35° sobre y debajo de la línea del ecuador, para mejorar la frecuencia de muestreo de la lluvia tropical.

2.1.2.2. Sensores Remotos

Son el elemento principal del sistema de teledetección, los Sensores Remotos, definidos como dispositivos que permiten captar la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie de la Tierra, usan mediciones del espectro electromagnético (Figura 2.2), para caracterizar el paisaje, inferir propiedades de éste o medir las variaciones de cuerpos de agua. Sin embargo, en la actualidad la teledetección se centra en la información que proveen los satélites y los sensores colocados en ellos. Dicha información son las imágenes satelitales, cuya composición dependen de las características de los sensores, en cuanto a su resolución. Existen cuatro tipos de resolución que caracterizan a los sensores: espectral, espacial, temporal y radiométrica.

La *resolución espectral* describe la capacidad del sensor para definir pequeños inter-

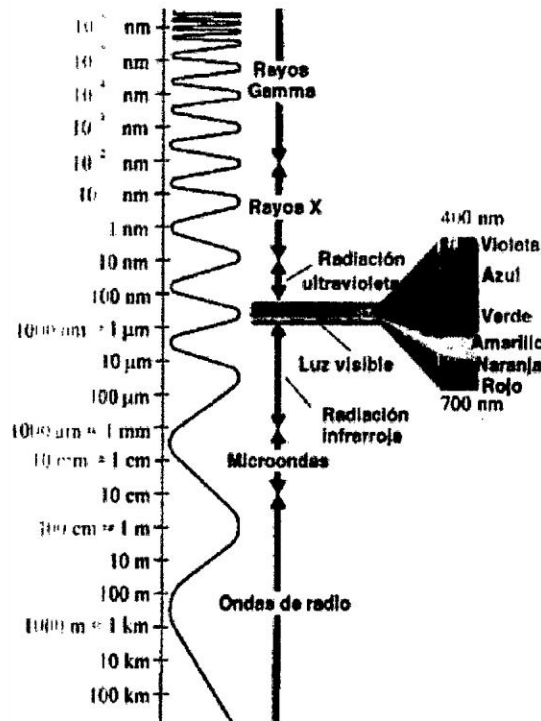


Figura 2.2: Espectro Electromagnético, Fuente: www.martossemueve.es

valos de longitudes de onda. En general se refieren al número, espaciamiento y ancho de las bandas de longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético que el sensor es capaz de captar y diferenciar. Entre más alta sea la resolución espectral más completa y precisa serán muestreadas las firmas espectrales de los objetos y, por lo tanto, más fácilmente se podrá encontrar, clasificar y caracterizar diferentes elementos.

2.1.3. Satélites Meteorológicos

Los satélites meteorológicos han observado el cielo por más de 30 años, desde el lanzamiento de *Tiros-1* (1960). La supervisión y predicción del tiempo atmosférico fue uno de las primeras aplicaciones civiles de las imágenes de satélite. Una red de satélites americanos, europeos, japoneses, y rusos orbitan la Tierra en varias configuraciones para proporcionar supervisión en tiempo real de nuestro ambiente. La mayoría de los países utilizan satélites meteorológicos para supervisar las condiciones del tiempo alrededor del globo. Sus resoluciones temporales son habitualmente bastante altas, proporcionando observaciones frecuentes de la superficie de la Tierra, humedad atmosférica y cobertura de nubes, las cuales permiten la supervisión y predicción casi-continua de las condiciones del tiempo atmosférico global (Caicedo, 2009). A contin-

uación se hace una descripción de los satélites meteorológicos que proporcionan productos para la estimación de precipitación potencial.

2.1.3.1. GOES (Geostationary Operational Meteorological Satellite)

El sistema *GOES* fue diseñado por la *NASA* para la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional de los Estados Unidos (*NOAA*) con el fin de proporcionar imágenes frecuentes, en pequeña escala, de la superficie de la Tierra y la cobertura de nubes al Servicio Nacional del Clima de los Estados Unidos. La serie de satélites *GOES* ha sido usada extensivamente por meteorólogos para la supervisión y predicción del tiempo atmosférico durante más de 20 años. El *GOES* opera en una banda visible, una en *IR* y una de Vapor de Agua. Poseen un radiómetro que barre línea por línea la superficie de la tierra a medida que el satélite gira. Tienen un tiempo de operatividad de aproximadamente 5 años (Caicedo, 2009).

El sistema de recolección de datos recibe y transmite una amplia gama de parámetros medio ambientales provenientes de los sensores conectados con la plataforma de recolección de datos. Los datos transmitidos desde el satélite *GOES* son recibidos y cifrados en la estación terrena *NESDIS* (National Environmental Satellite, Data and Information Service) y desde allí la información se procesa y se manda a una transformación posterior y/o transmisión (National Aeronautics and Space Administration, 1996).

La próxima generación de satélites *GOES*, será la *serie-R*, (*GOES-R*), compuestos por mejores tecnologías e instrumentos espaciales, que aportarán una oportuna y precisa previsión meteorológica. El primer lanzamiento de la serie de satélites *GOES-R* está prevista para marzo del año 2016.

2.1.3.2. TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)

El *TRMM* es una misión entre la *NASA* y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (*JAXA*) designada para monitorear y estudiar las precipitaciones tropicales. El *TRMM* cuenta con 5 sensores a bordo, que son: precipitación de radar (*PR*), imágenes de microondas (*TMI*), escáner del visible y del infrarrojo (*VIRS*), Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes (*CERES*), Imágenes de Relámpagos (*LIS*). *PR*,

TMI y *VIRS* son sensores para la medición de la lluvia, pero el principio de observación y el ancho de banda de cada uno es diferente: 760 km para *TMI*, 720 km para *VIRS* y 215 km para *PR* (JAXA, 2007).

El radar meteorológico de precipitación (*PR*) provee cartas de estructuras de tormentas tridimensionales. Se emite radiación y se reciben lecturas de intensidades y distribución de la lluvia, tipo de lluvia y profundidad de la tormenta; además puede estimar el calor obtenido a diferentes alturas en la atmósfera. En la Figura 2.3 se representa esquemáticamente como el satélite captura los valores de lluvia instantánea en los diferentes sensores.

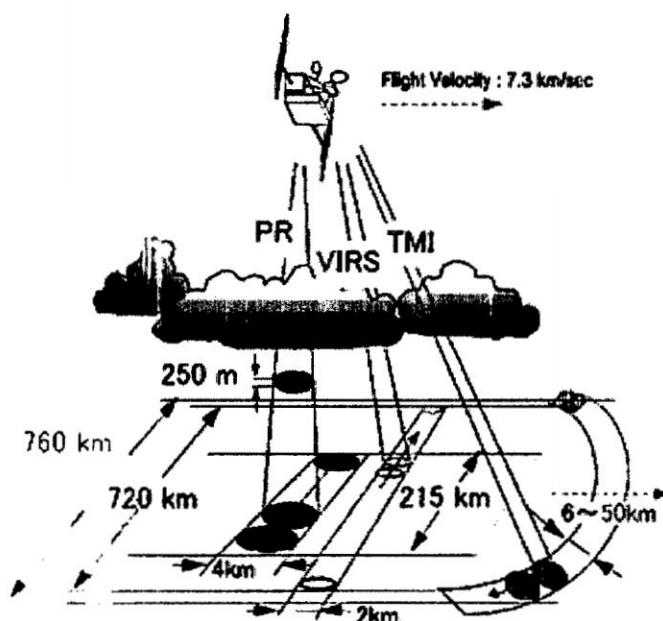


Figura 2.3: Esquema de la medición de la lluvia por los diferentes sensores (*PR*, *VIRS*, *TMI*) transportados por el Satélite *TRMM*, Fuente: www.eorc.jaxa.jp

Las imágenes por microondas del *TRMM* (*TMI*), se producen por un sensor pasivo diseñado para dar información cuantitativa de lluvia sobre una amplia franja bajo el satélite. El *TMI* es capaz de cuantificar el vapor de agua, el agua de las nubes y la intensidad de lluvia en la atmósfera. El escáner de radiación visible e infrarrojo (*VIRS*) es uno de los tres instrumentos en el paquete de medición de lluvia, que sirve como un indicador indirecto de la misma y la intensidad de la radiación en varias regiones espectrales se usa para determinar la brillantez o temperatura en la fuente.

2.1.4. Programas de estimación de precipitación satelital

Los últimos desarrollos en teleobservación por satélite ofrecen nuevas técnicas para la estimación de precipitación en regiones donde la medición es limitada. Los programas de estimación de precipitación satelital que se presentan a continuación, han sido desarrollados por la Administración Oceanográfica y Atmosférica Nacional de los Estados Unidos (NOAA), mediante el Servicio de Información de Datos Satelitales Ambientales (NESDI). En la Figura 2.4 se presentan los programas de estimación, haciendo un mayor énfasis en el sistema PERSIANN, el cual es el insumo principal en este trabajo.

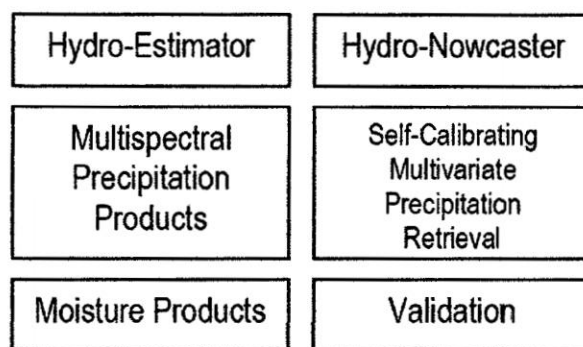


Figura 2.4: Programas Estimadores de Precipitación Satelital (Caicedo, 2008)

El algoritmo Auto-Estimator (*A-E*), desarrollado por el Dr. Gilberto Vicente, de la Oficina de Investigaciones y Aplicaciones (*ORA*) en la *NASA*, produce automáticamente estimaciones de precipitación cada media hora usando las imágenes infrarrojas del satélite *GOES (IR)*. El *A-E* es usado para producir estimaciones en tiempo real de precipitación instantánea y acumulada. Funciona en tiempo real para aplicaciones de pronóstico de inundaciones, modelaje numéricos e hidrología operacional. Utiliza la banda $10.7 \mu\text{m}$ (canal 4) de infrarrojo para computar cantidades de precipitación a tiempo real basado en un algoritmo de regresión de la ley de potencia. Esta regresión es derivada de un análisis estadístico entre estimaciones instantáneas de radar y temperaturas del tope de las nubes obtenida por satélites, colocados en el mismo tiempo y espacio (*Baldemar, 2005*).

La dependencia del radar en el *A-E* hizo que el algoritmo sea deficiente ya que no se puede utilizar en regiones donde la cobertura del radar o de los pluviómetros no está disponible. Por éste y otros motivos otra versión del *A-E* llamado *Hydro Estimator*

(HE), fue desarrollada por el Dr. Robert J. Kuligowski (NESDI, 2006). Este algoritmo es actualmente usado por el Servicio Meteorológico Nacional de U.S. para el control de las inundaciones súbitas. Las tasas de precipitación se basan fundamentalmente en la parte en la temperatura tope de las nubes obtenida a partir de *GOES 12* y *GOES 16* (10,7 micras). Hay disponibilidad de estimaciones de precipitación instantánea y con temporalidad de: 1, 3, 6 y 24 horas.

En la Figura 2.5, se observa una imagen de Perú con la estimación de precipitación para el día 20 de mayo de 2015.

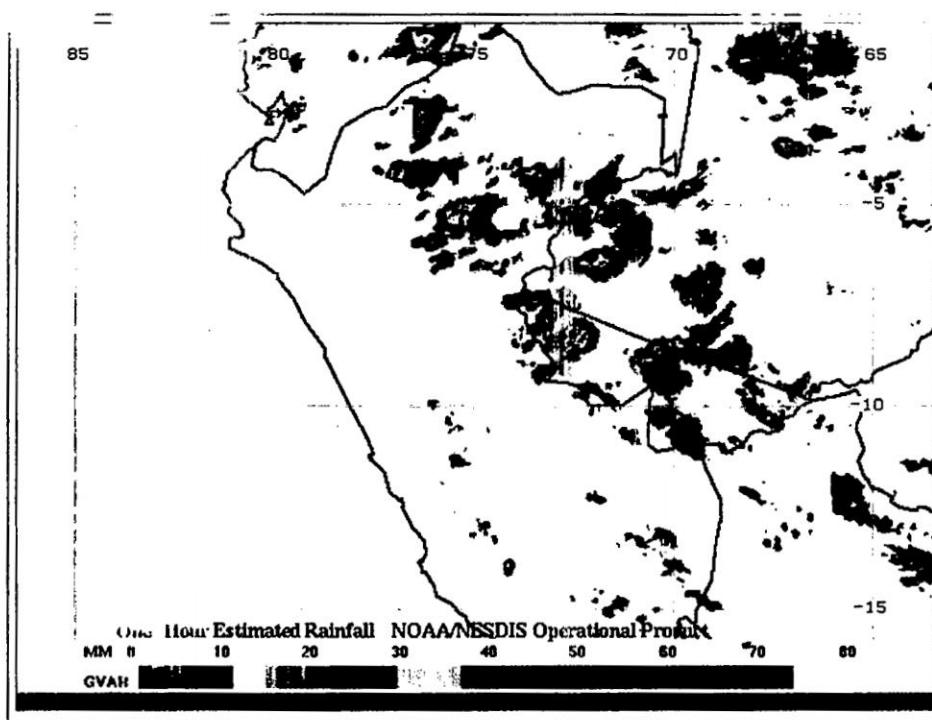


Figura 2.5: Imagen del producto H-E para Perú, Fuente: <ftp://nesdis>

La información de este producto solo está calibrada y validada para el hemisferio Norte, lo que no proporcionaría confiabilidad al utilizarlo en nuestro medio. Además la disponibilidad de la información no tiene un registro continuo de datos los cuales son ofrecidos en formato binario.

El *Hydro-Newcaster (HN)*, Es usado para inspeccionar patrones de lluvia instantáneos para sistemas convectivos de mesoescala en lluvias tropicales; la meso escala según la clasificación meteorológica hecha por Orlanky (1975), se puede asignar a eventos con dimensiones de 20 a 2000 km y duraciones entre 30 minutos y 6 horas.

El *GOES Multispectral Rainfall Algorithm (GMSRA)*, a diferencia del A-E

y *H-E*, utiliza datos procedentes de los cinco canales del satélite *GOES*, para producir las estimaciones de precipitación, y combina las bandas, visible ($0,65 \mu\text{m}$), infrarrojo cercano ($3,9 \mu\text{m}$) e infrarrojo ($6,7 \mu\text{m}$, $11 \mu\text{m}$, y $12 \mu\text{m}$). De la misma manera este algoritmo es utilizado solo para el hemisferio Norte.

El *Self-Calibrating Multivariate Precipitation Retrieval (SCaMPR)*, este algoritmo es un autocalibrador de las estimaciones de precipitación con alta precisión de microondas del *IR*, con las bandas de mayor resolución espacial de las estimaciones de precipitación. Las calibraciones se realizan tanto para la lluvia como para ausencia de la misma (mediante análisis discriminante) y la tasa de precipitación (utilizando regresión lineal múltiple).

El *Moisture Products*, contiene información de productos que detectan zonas húmedas tanto en la atmósfera como en el suelo. También ofrece el factor de corrección de humedad (conocido como el factor de eficiencia de la precipitación) que se utiliza para ajustar automáticamente las estimaciones de precipitación disponibles. Toda esta información solo está disponible para el hemisferio Norte.

El programa *Validation* valida la información que se obtiene de cada uno de los 5 productos descritos anteriormente. Los estadísticos que utiliza el método son, raíz del error medio cuadrático (*RMSE*), criterio de información Bayesiano (*BIS*), coeficiente de correlación de Pearson.

El sistema *PERSIANN*, se describe con más detalle en la siguiente sección. Este sistema es el que ofrece mejor disponibilidad y operatividad de la información sobre precipitaciones estimadas por satélites.

2.1.4.1. Sistema PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks)

El estimador de precipitación, *PERSIANN* (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks) fue desarrollado en la Universidad de Arizona.

La motivación de crear este algoritmo fue: 1) diseñar una técnica que tuviera la capacidad de extraer información de las variables físicas capturadas por los múltiples canales de los sensores. 2) realizar clasificaciones de la multidimensionalidad de las variables espacio temporales teleobservadas. 3) procesar los grandes volúmenes de datos

que componen las imágenes y poder asimilar otras fuentes de datos como los medidos en tierra.

PERSIANN utiliza técnicas de Inteligencia Artificial, específicamente redes neuronales artificiales (*RNA*) que intentan ser una emulación inteligente del comportamiento de los sistemas biológicos, en donde los sistemas nerviosos se basan en la neurona como elemento fundamental (Caicedo, 2008).

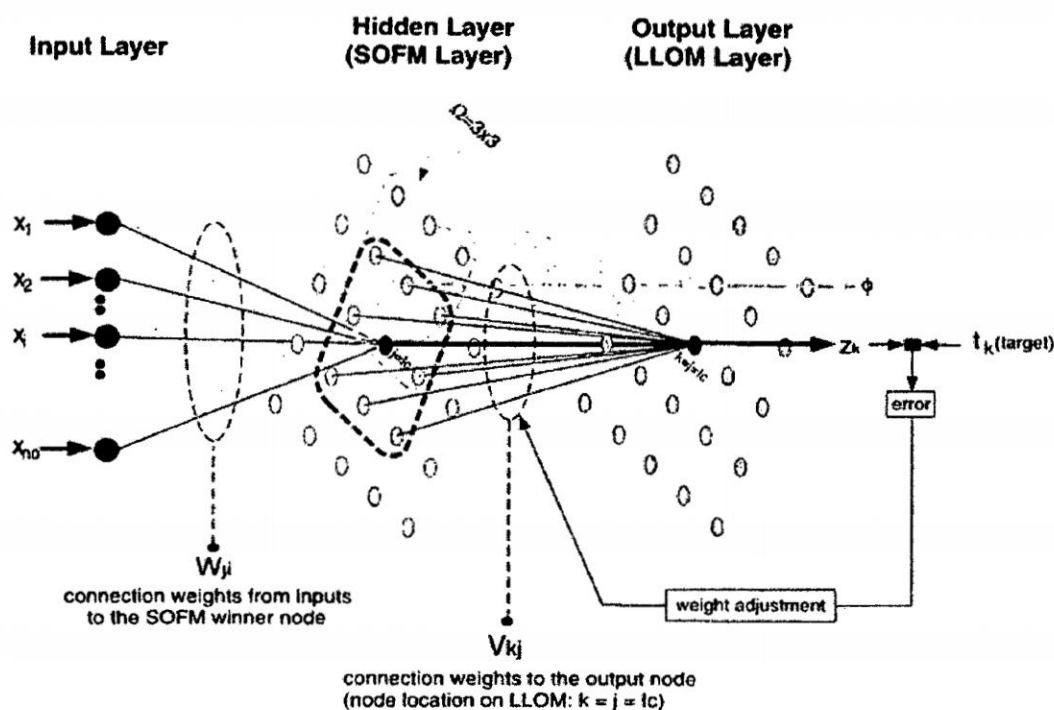


Figura 2.6: Estructura red Modified Counterpropagation Network (Caicedo, 2008)

En la Figura 2.6, X_j son las variables de entrada a la red, W_{ji} son los pesos de entrada a la capa oculta, Ω es una matriz de 3×3 que barre la capa *SOFM* y centraliza el mejor nodo *ic*. Según la literatura, la matriz oculta debe estar compuesta por un arreglo de 15×15 nodos. V_{kj} son los pesos que se ajustan luego de minimizar el error entre las salidas Z_k y lo esperado t_k de la capa, Local Linear Output Network (*LLOM*).

2.1.4.2. Map server y Geo server HyDIS (Hydrologic Data and Information System)

HyDIS, es un sitio web que ha proporcionado desde el año 2000, a investigadores y público en general, los datos de precipitación del sistema *PERSIANN*, mediante el enlace <http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/> y consta de una interfaz amigable (Figura

2.7) que permite seleccionar la región geográfica de interés y solicitar la información que se desee utilizar.

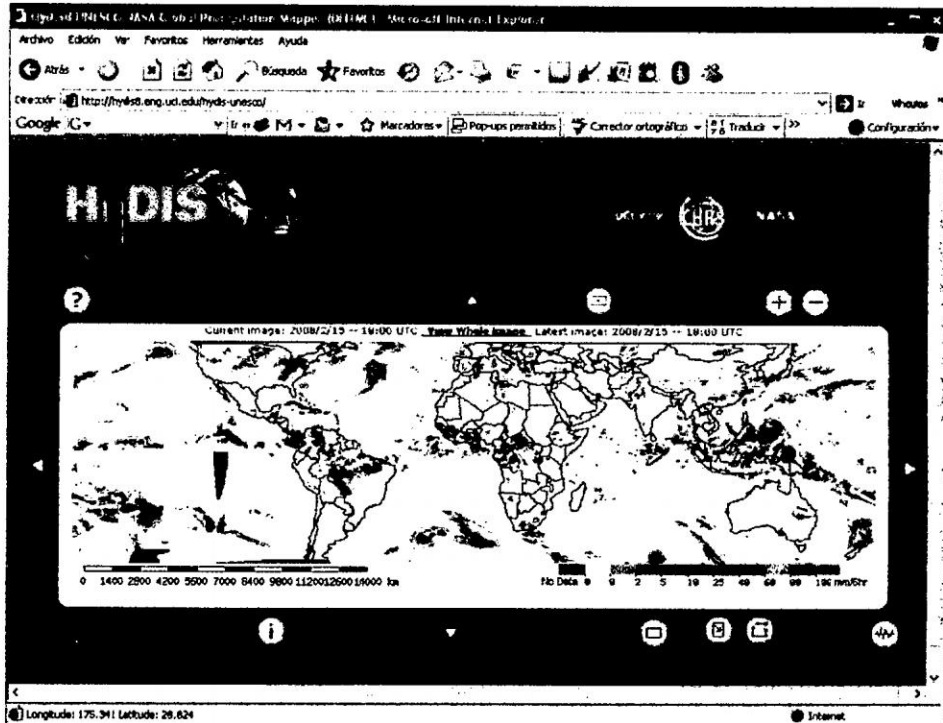


Figura 2.7: Visualización de datos PERSIANN a través de HyDIS system (<http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/>)

La información que se recibe está disponible en formato ASCII (The American Standard Code for Information Interchange) y también está adjunta la imagen en formato .jpg.

El CHRS también tiene disponible en la web el GeoServer, el cual contiene información referente a coberturas, elevaciones, hidrografía, cuencas, en formato shape file a nivel mundial. Además se puede visualizar las imágenes de la precipitación estimada por el sistema PERSIANN y consultar información del nuevo programa PERSIANN-CCS, en cualquier agregación temporal (3, 6, 12, 24 y 48 horas).

2.1.5. Medición de la Lluvia

En las secciones anteriores se presentaron diversas técnicas de estimación de la precipitación mediante percepción remota; sin embargo, las mediciones en tierra de este proceso hidrológico, conocido como la fuerza motriz de la fase terrestre del ciclo

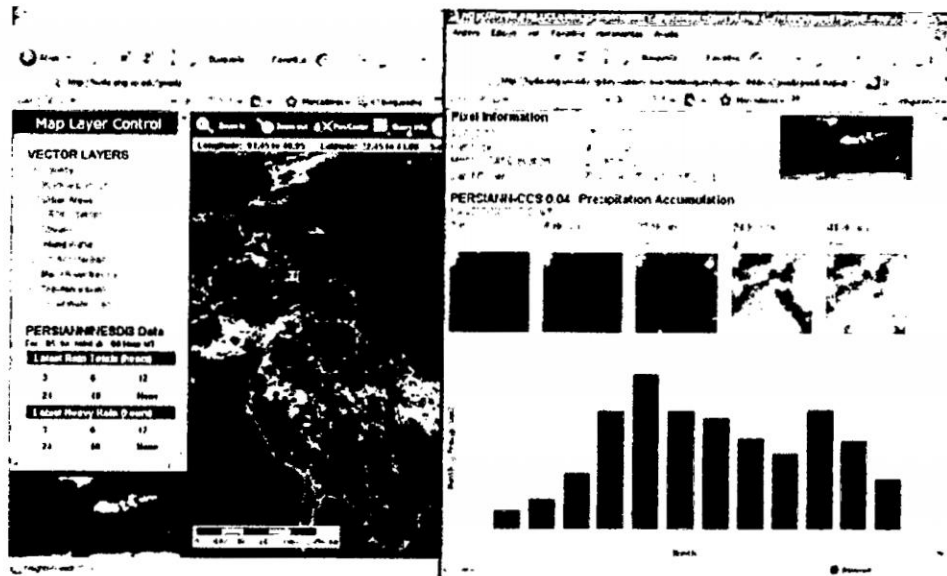


Figura 2.8: Interfaz del GeoServer, consulta de la precipitación estimada por el PERSIANN-CCS (<http://chrs.web.uci.edu/persiann/>)

hidrológico, ha proporcionado información de entrada en diversos tipos de modelos de simulación hidrológica, lo que hace imprescindible su medición.

2.1.5.1. Redes meteorológicas

La medición de la lluvia en tierra se realiza mediante una estación meteorológica dotada de instrumentos apropiados como los pluviómetros (PM) o pluviógrafos (PG), según Chow y otros (WMO, 2006). La lluvia se mide utilizando dos tipos de medidores: medidores sin registro (PM) y medidores con registro (PG). Un medidor con registro es un aparato que registra automáticamente la profundidad de lluvia en Δt tan pequeños como un minuto de duración. Los medidores sin registro se miden manualmente en intervalos de tiempo mayores.

La medición de la lluvia por medio de los pluviómetros o pluviógrafos proporciona una adecuada descripción temporal mas no una buena descripción espacial de este fenómeno, ya que por estos medios se hacen mediciones puntuales a través del tiempo en lugares fijos del espacio.

Según estudios realizados, para zonas planas por cada 50 km² se requiere un pluviómetro. En zonas urbanas el requerimiento seria de una estación por cada 2 km². La red Peruana no cumple con estos requerimientos por lo que la representación espa-

cial de la lluvia se hace por diversos métodos de interpolación (Polígonos de Thiessen, inverso de la distancia, Kriging, etc.). Estos campos de precipitación obtenidos por interpolación constituyen una fuente de incertidumbre durante la implementación de modelos lluvia escorrentía.

Dada esta situación, los radares meteorológicos aportan una solución a los requerimientos hidrológicos expuestos.

2.1.5.2. Sistema radar

El sistema radar es una herramienta crucial en la hidrología ya que son capaces de describir un campo de precipitación con una resolución apropiada para la modelación (resolución espacial cercana a 1 km² y resolución temporal entre 5 y 10 minutos), sobrepasando considerablemente las capacidades de las redes tradicionales de pluviómetros.

Usualmente, los radares se emplean para rastrear eventos meteorológicos, ya sea mediante equipos estacionarios en tierra, que son operados por meteorólogos, o usando equipos montados en aeronaves que son usados por las aerolíneas para evitar frentes de tormenta.

Uno de los sistemas en tierra más conocidos es la red de radares NEXRAD, integrada por 158 radares, instalados en Estados Unidos por la NOAA (National Oceanographic & Atmospheric Administration) en la década de los noventa (IDEAM-d, 2007). En la Figura 2.9 se describen las características de dichos radares

En países como España, República Checa y Bélgica, la tecnología radar ha permitido la optimización de las redes locales de pluviómetros; en el caso de España, la provincia de Cataluña, luego de calibrar las estimaciones de precipitación del radar con las medidas obtenidas en campo, logró reubicar ciertas estaciones pluviométricas en zonas donde se necesitaba validar los datos del radar, o donde las lecturas del radar contenían ruido. En las zonas donde se logró calibrar el radar satisfactoriamente, se determinó que no era necesario seguir obteniendo lecturas de la red de pluviómetros.

Las deficiencias en densidad de la red meteorológica en tierra y la ausencia de radares meteorológicos, convierten la asimilación de información satelital en la única opción para mejorar los procesos de modelación lluvia escorrentía. Con el fin de verificar esta posibilidad a continuación se describen las bases conceptuales para la



Figura 2.9: Radar meteorológico y bandas de frecuencia, Fuente: Universidad Politécnica de Cataluña

implementación de modelos lluvia escorrentía, aglutinados y distribuidos, utilizando información de precipitaciones medidas en tierra y estimadas por satélite.

2.2. Sistema SCADA para prevision de avenidas

2.2.1. Introduccion

El desarrollo de las tecnologías de la información y su aplicación a los sistemas de gestión de *recursos hídricos* ha supuesto un avance considerable para la previsión de operaciones y anticipación de fenómenos adversos dentro de las *cuencas hidrográficas*. Los sistemas de ayuda a la toma de decisiones (*SADs*) combinan la información en *tiempo real* con herramientas de *predicción* y *simulación*, para generar estimaciones con las que planificar operaciones complejas y hacer frente a *eventos extraordinarios* como las crecidas de los ríos. En el ámbito internacional, existe una demanda creciente de la instalación de aplicaciones de predicción y gestión de riesgos en *hidrología*.

2.2.2. Sistema SCADA

Se denomina *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition* ó *control con supervisión y adquisición de datos*) a cualquier software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita, utilizando las herramientas de comunicación nece-

sarias en cada caso, el control del mismo. Atendiendo a la definición vemos que no se trata de un sistema de control, sino de una utilidad software de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interfase entre los niveles de control y los de gestión a un nivel superior.

2.2.2.1. Objetivos

Los sistemas *SCADA* se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando. Entre sus objetivos podemos destacar:

- **Economía:** Es mas fácil ver que ocurre en la instalación desde la oficina que enviar un operario a realizar la tarea.
- **Accesibilidad:** Lo tenemos en un clic del ratón encima de la mesa de trabajo.
- **Mantenimiento:** La adquisición de datos materializa la posibilidad de obtener datos de un proceso, almacenarlos y presentarlos de manera inteligible para un usuario no especializado.
- **Ergonomía:** Es la ciencia que procura hacer que la relación entre el usuario y el proceso sea lo menos rígida posible.
- **Gestión:** Todo los datos recopilados pueden ser valorados de múltiples maneras mediante herramientas estadísticas, gráficas, valores tabulados, etc.
- **Flexibilidad:** Cualquier modificación de alguna de las características del sistema de visualización no significa un gasto en tiempo y medios.
- **Conectividad:** Se buscan sistemas abiertos. La documentación de los protocolos de comunicación actuales permite la interconexión de sistemas de diferentes proveedores y evita la existencia de lagunas informativas que puedan causar fallos en el funcionamiento o en la seguridad.

2.2.2.2. Funciones y Utilidades

El paquete *SCADA*, en su vertiente de herramienta de interfase *hombre-máquina*, comprende toda una serie de funciones y utilidades encaminadas a establecer una comunicación lo más clara posible entre el proceso y el operador:

Entre las prestaciones de una herramienta de este tipo destacan:

- **Monitorización:** Representación de datos en *tiempo real* a los operadores de planta (*precipitación, temperaturas, velocidades, detectores, etc.*).
- **Supervisión:** Supervisión, mando y adquisición de datos de un proceso y herramientas de gestión para la toma de decisiones. Evita una continua supervisión humana.
- **Adquisición de datos:** Un sistema de redes telemétricas, mediante herramientas registradoras obtienen valores de diversos parámetros y evaluándolos a posterioridad.
- **Visualización de alarmas y eventos:** Reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en la planta y su inmediata puesta en conocimiento de los operarios para efectuar las acciones correctoras pertinentes.
- **Mando:** Posibilidad de que los operadores puedan cambiar consignas u otros datos claves del proceso directamente desde el ordenador.
- **Grabación de acciones:** Se componen de varias máquinas encadenadas con múltiples parámetros.
- **Seguridad de los datos:** Tanto el envío como la recepción de datos deben de estar suficientemente protegidos de influencias no deseadas, intencionadas o no (fallos en la programación, intrusos, situaciones inesperadas, etc.).
- **Seguridad en los accesos:** Restringiendo zonas de programa comprometidas a usuarios no autorizados, registrando todos los accesos y acciones llevadas a cabo por cualquier operador.
- **Programación numérica:** Permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

2.2.2.3. Ventajas

Cuando hablamos de un sistema *SCADA* no hay que olvidar que hay algo más que las pantallas que nos informan de cómo van las cosas en nuestra instalación. Tras

éstas se encuentran multitud de elementos de regulación y control, sistemas de comunicaciones y múltiples utilidades de software que pretenden que el sistema funcione de forma eficiente y segura.

Las ventajas más evidentes de los sistemas de control automatizado y supervisado (*SCADA*) podemos enumerarlas a continuación:

- Creación de aplicaciones funcionales sin necesidad de ser un experto en la materia.
- Gracias a las herramientas de diagnóstico se consigue una localización más rápida de errores (Se minimizan los periodos de paro en las instalaciones y repercute en la reducción de costes de mantenimiento).
- El concepto de *telemantenimiento* permite realizar modificaciones de software en las estaciones remotas desde el centro de control. La tecnología Web permite el acceso desde cualquier punto geográfico a nuestro sistema de control.
- Los programas de visualización pueden presentar todo tipo de ayuda al usuario, desde la aparición de una alarma hasta la localización de la causa o la parte de esquema eléctrico implicada en la misma.
- Haciendo uso de las tecnologías celulares (*GSM, GPRS, UMTS*), los sistemas de control pueden mantener informados sobre cualquier incidencia a los operadores responsables de los mismos mediante mensajes de correo electrónico o de voz.
- Los protocolos de seguridad permiten una gestión segura y eficiente de los datos, limitando el acceso a personas no autorizadas.
- La reducción de personal permite menor número de equipos de mantenimiento, más reducidos y mejor coordinados gracias a la información proveniente de las estaciones remotas, evaluada en el centro de control.
- Mediante las redes de comunicación, el sistema *SCADA* se integra en la red corporativa, permite la integración entre los niveles de Campo y Gestión y completa así la estructura *CIM* (*Computer Integrated Manufacturing*).

Presenta la estructura corporativa dividida en tres niveles, que engloban las funciones principales que se desarrollan en cada uno de ellos:

- **E.R.P.** (*Enterprise Resource Planning*): Es la Planificación de Recursos Empresariales.
- **M.E.S.** (*Manufacturing Execution System*): Gestión de la Producción.
- **CONTROL**: engloba toda la parte de *automatización y control* de procesos.

la estructura de un sistema *SCADA* podemos resumir en el siguiente figura 3.1:

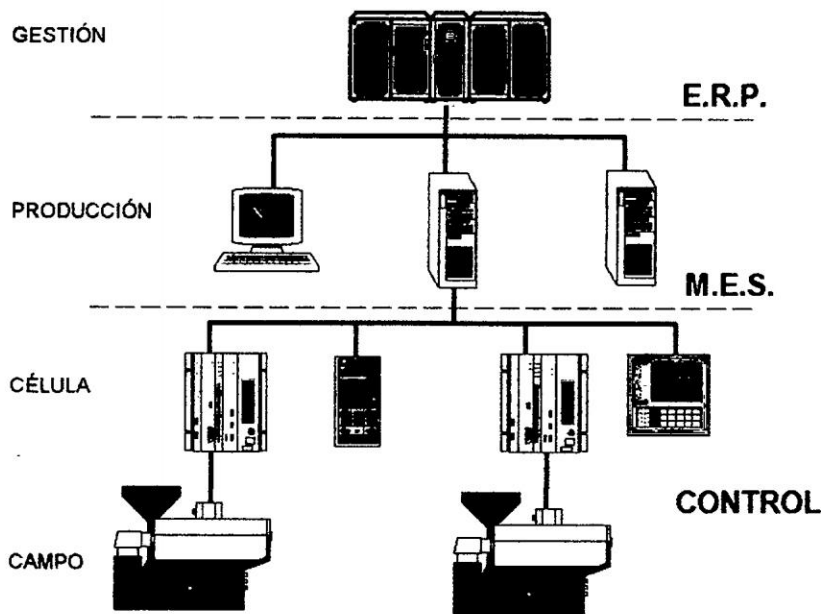


Figura 2.10: Pirámide CIM (Rodríguez, 2007)

2.2.3. Sistema de Alerta Temprana

Una de las aplicaciones más trascendentes de la *hidrología operativa* y los sistemas hidrometeorológicos en *tiempo real* es la que se refiere a "*Sistemas de alerta hidrológica para aviso temprano de crecientes e inundaciones*" Constituye una de las áreas de la hidrología de mayor expansión con la incorporación permanente de nuevas tecnologías de hardware, software y comunicaciones.

El objetivo es obtener en una estación central, los datos en tiempo real de variables hidrometeorológicas (lluvias, nieve, caudales, temperatura) provenientes de estaciones remotas. Estos datos son controlados, depurados y procesados "en línea" y con ellos alimentar modelos matemáticos que pronostican valores de caudales a esperar. Estos

pronósticos es para alertar a poblaciones, para ordenar cierres temporarios y desvíos de rutas, para ayudar a manejar embalses, para reordenar el tránsito de grandes ciudades o aislar áreas críticas, para evacuar lugares de asentamientos turísticos y de recreación, para el manejo de ríos navegables entre otros.

Hoy, con la disminución de costos, facilidad de instalación y operación de estos sistemas, se han constituido en una de las inversiones de mayores beneficios en relación a su costo. Relaciones de beneficio/costo de 10, 20 e incluso 50 a uno son fácilmente alcanzables.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de USA (U. S. Army Corps of Engineers) reporta como un ejemplo emblemático, que en la ciudad de Fort Wayne, Indiana, el sistema para esa ciudad costó 80.000 dolares y durante una creciente de 1985, se estimó que la prevención disminuyó daños en más de 2 millones, es decir un beneficio fue 25 veces su costo en un solo evento.

Resulta oportuno en este marco de beneficios recalcar algo que es fundamental. Un buen sistema de alerta temprana, no depende tanto del uso de tecnología sofisticada, como de la implementación de sistemas sencillos y confiables y sobre todo de un acertado y bien coordinado sistema de diseminación de la información (*Fernández et al, 1999*) y eficientes sistemas de implementación de las ayudas ó avisos.

A nivel internacional el tratamiento de este tipo de problema se está llevando a cabo con la aplicación de tecnologías computacionales, tales como los sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (*SCADA*), los software de la familia *HEC* (Hydrologic Engineering Center), el *SWMM* (Modelo de Gestión de Tormentas de Agua) y el *SWM* (Modelo de cuenca Stanford), con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica (*SIG*).

2.2.4. Requerimiento de Datos Para Prediccion en Tiempo Real

En muchos casos, los pronósticos de avenidas dentro del entorno del *tiempo real* se realizan a través de modelos conceptuales, los cuales describen la transformación *lluvia - escorrentía* por medio de una representación matemática del proceso *hidrológico* a escala de cuenca.

Varias investigaciones han sugerido que el tiempo al pico y la intensidad de una creciente en una cuenca natural está fuertemente influenciada por la variabilidad en el tiempo y en el espacio de la *lluvia* y que los modelos *hidrológicos conceptuales* de pronóstico son fuertemente sensibles a la distribución espacial y temporal de la *lluvia*. Por lo tanto, un mejoramiento en la medición de la distribución espacial de la *lluvia*, es un factor importante que puede conducir a un mejoramiento de los pronósticos de crecientes en *tiempo real*.

Entre las variables más importantes que influyen la adopción y el éxito de un sistema de *alerta hidrológico* se destaca el tiempo de respuesta de la cuenca a la *precipitación* y el tiempo disponible para obtener los resultados, diseminar los avisos de crecientes y actuar en las medidas de mitigación.

En la mayor parte de los sistemas de *alerta hidrológico* los *pluviógrafos* son usados para medir las *lluvias*, los *pluviómetros* pueden dar mediciones razonablemente precisas en los puntos preseleccionados, sin embargo los errores se incrementan cuando estas mediciones puntuales son extrapoladas para obtener estimaciones de la distribución áreal. Esto es especialmente cierto en el caso de tormentas convectivas cuando incluso redes densas de *pluviógrafos* pueden no representar adecuadamente la distribución espacial de las tormentas.

2.2.5. Estructura del Sistema Automatizado de Alerta Temprana

En el sistema se integran la adquisición y procesamiento de la información con la simulación del proceso en *tiempo real*, a través de cuatro componentes principales: *modelos de simulación, sistema de información geográfica, adquisición y supervisión de datos en tiempo real y diferido y una base de datos histórica actualizada*, tal como se muestra en la figura 3.2.

- **Modelos de Simulación:** En el caso particular de las *inundaciones* el sistema interactúa con dos modelos principales: el *HEC-HMS* y el *HEC-RAS*, encargados del procesamiento *hidrológico* e *hidráulico* de la cuenca respectivamente.

- **Sistema de Información Geográfica:** El sistema debe contar con un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) personalizado para cada región de trabajo. Esta es una de las herramientas principales pues es responsable de almacenar y administrar la información de índole geográfica que se manejará. Además es el encargado de visualizar la información generada por los modelos matemáticos a través de mapas, tablas y gráficos.
- **Adquisición y supervisión de datos en tiempo real y diferido:** La adquisición y supervisión de los datos en *tiempo real* se hace a través de un sistema *SCADA*. En el caso de la información en tiempo diferido se puede introducir manualmente o utilizando registradores de variables.
- **Base de datos histórica actualizada:** Es la componente central del sistema, pues constituye la base de información necesaria para el funcionamiento de los elementos que lo componen, jugando así un papel fundamental como elemento integrador.

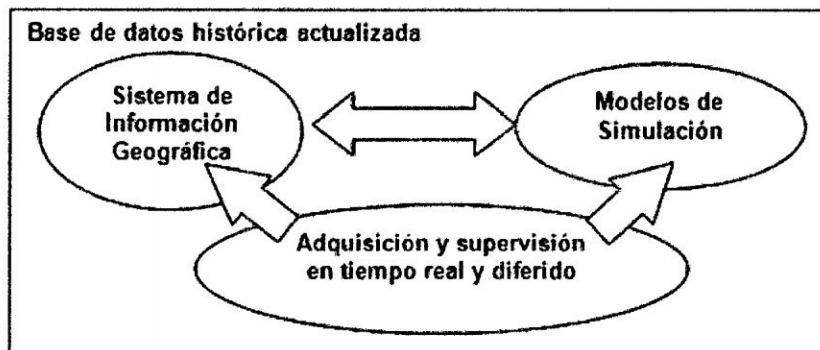


Figura 2.11: Componentes principales del sistema

2.2.5.1. Modelos matemáticos de Simulación Hidrológica e Hidráulica

La modelación se considera parte integrante de la gestión de *inundaciones*, empleando modelos tanto para la planeación y el diseño, como para la predicción de la misma.

Existen reportados actualmente un conjunto elevado de herramientas informáticas de *simulación hidrológica e hidráulica*. Estudios realizados demuestran que la mayoría

de las herramientas de *simulación hidrológica* son libres, sin embargo ocurre lo contrario con las de *modelación hidráulica* que, a excepción del *HEC-RAS*, son comerciales.

Existe un número elevado de estudios que utilizan los modelos *HEC-RAS* y *HEC-HMS* obteniendo resultados satisfactorios. Teniendo en cuenta que son herramientas de libre distribución, que se vinculan armónicamente con el *SIG* mediante las herramientas *HEC-GeoHMS* (USACE 2009) y *HEC-GeoRAS* (Cameron 2009), que existe una documentación amplia y detallada de su funcionamiento y que múltiples estudios realizados con su empleo avalan su calidad, se decidió emplear el *HEC-HMS* para la *modelación hidrológica* y el *HEC-RAS* para la *modelación hidráulica*.

2.2.5.2. Sistema de Información Geográfica

La inclusión de un *SIG* al sistema automatizado de alerta temprana constituye un elemento muy importante, ya que representa la principal interfase de interacción del personal de operación en el puesto central, con la información de los recursos de campo y demás datos de la geografía.

Se decidió utilizar como herramienta *SIG* el *ArcGis 10.0* (ESRI 2004), ya que brinda un conjunto amplio de funcionalidades y además las últimas versiones de las herramientas *Hec-GeoRAS 4.2* y *Hec-GeoHMS 4.2* están implementadas para dicha versión.

Esta herramienta, además de brindar las funcionalidades principales de los sistemas de información geográfica, es personalizable y permite la inclusión de nuevas funciones mediante extensiones y scripts que pueden ser programadas en el lenguaje *ArcObject*.

El *SIG* contiene la información geográfica general de la cuenca, la cual sirve de entrada a los modelos y los mapas resultantes de las corridas. La herramienta debe satisfacer un conjunto de requisitos entre los que se encuentran: las operaciones básicas del trabajo con mapas, el preprocesamiento de la información *hidrológica*, el preprocesamiento y posprocesamiento de la información *hidráulica*, la visualización de la información de los instrumentos de *tiempo real* instalados en la cuenca y la administración de la base de datos geográfica. También es muy importante que la herramienta se integre armónicamente con el resto de los componentes del sistema.

2.2.5.3. Adquisición y supervisión de datos en tiempo real y diferido

Una de las características que diferencian al sistema automatizado de *alerta temprana* ante el peligro de *inundaciones* de otras herramientas para el control de este tipo de fenómenos es contar entre sus componentes principales con un sistema de adquisición y supervisión de datos en *tiempo real* y *diferido* cuyo esquema se representa en la figura 3.3.



Figura 2.12: Recursos de adquisición y supervisión de datos (Rodríguez, 2007)

En la concepción del sistema propuesto, se consideró un esquema flexible de adquisición y monitoreo de la información a captar mediante el equipamiento e instrumentación de campo, que permite, a partir del estudio y análisis de cada una de las variables de interés de la automatización, su clasificación y agrupamiento según sus características temporales y relevancia.

Dato	Via de Entrada	Frecuencia
Lamina de lluvia (mm)	SCADA/Registrador	5min, 20min, 1h, 1dia
Nivel (Cota del agua)(cm)	SCADA/Registrador	15min
Escorrento (m3/s)	SCADA/Registrador	1 hora, 1 dia o un evento

Tabla 2.1: Variables a medir en el sistema de alerta temprana (Rodríguez, 2007)

Las variables a medir en el sistema de *alerta temprana* se especifican en la tabla 3.1. Una vez establecida la frecuencia del muestreo de cada variable, la siguiente decisión a

tomar es el modo o momento en que su información es recibida en la estación central y registrada en la base de datos.

2.2.5.4. Base de datos histórica actualizada

Una de las peculiaridades que tiene el sistema es que almacena, además de la información alfanumérica común, datos de naturaleza geográfica y temporal, característica que le imprime un alto grado de complejidad al diseño de la base de datos. Por otro lado no todos los gestores brindan soporte para datos espaciales, por lo que este fue un elemento importante a tener en cuenta en la elección del mismo. La figura 3.4. muestra un esquema general de las entidades identificadas en el diseño de la base de datos y sus relaciones.

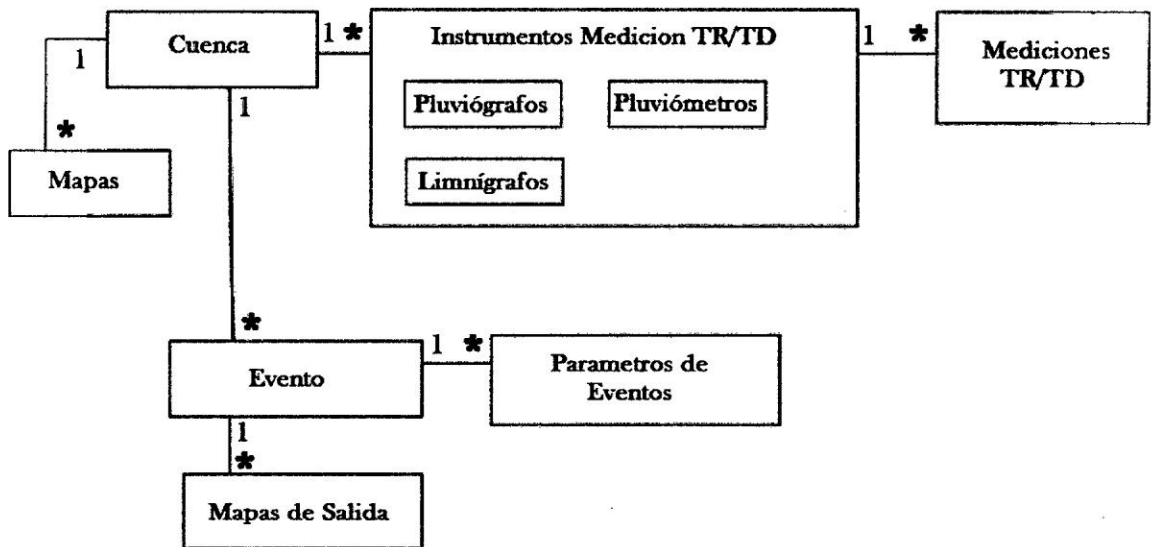


Figura 2.13: Entidades generales identificadas en el diseño de la base de datos del sistema (los símbolos 1 y * representan la cardinalidad de la relación que se establece entre las entidades).

La implementación del sistema automatizado para la alerta temprana ante el peligro de inundaciones requiere de una base de datos inicial, ya que como se mencionó anteriormente debe contarse con un grupo de informaciones, en su mayoría de índole geográfica, para el buen funcionamiento de los modelos matemáticos. La formación de la base de datos es un proceso que nunca termina y que, mediante su actualización, el sistema se hace más efectivo al identificarse aún más con las particularidades del

problema a resolver. Una vez generada la base de datos inicial con la información histórica que se disponga, la puesta en marcha del sistema actualiza sistemáticamente esta base de datos por las vías referidas anteriormente. La posibilidad de disponer de un mecanismo automatizado de actualización de la información que tribute a la conformación de una base de datos histórica en línea, es un valor agregado de esta tecnología que posibilita su desarrollo incremental y además ofrece nuevas oportunidades para el estudio y análisis de otros procesos de interés para los decisores.

2.2.5.5. Integración de las herramientas en el sistema

En el proceso de modelación intervienen tres herramientas fundamentales: el *SIG-ArcGis* y los modelos matemáticos *HEC-HMS* y *HEC-RAS*. El proceso de modelación comienza con el procesamiento de la cuenca, esta actividad se lleva a cabo en el *ArcGis* y consiste básicamente en el preprocesamiento del terreno y luego en el procesamiento de la cuenca, lo que da como resultado el denominado *modelo hidrológico conceptual* de la cuenca. Este modelo es la entrada al procesamiento *hidrológico*, el cual se realiza en el *HEC-HMS*. Como resultado de esta actividad se obtienen los hidrogramas en los puntos significativos de la cuenca. Estos hidrogramas constituyen la entrada al modelo *HEC-RAS* donde se lleva a cabo el procesamiento *hidráulico*, del cual se obtiene como resultado las respuestas hidráulicas del sistema fluvial, o sea, los niveles que alcanzan las aguas en los tramos de río modelados y sus caudales. Esta información se exporta al *ArcGis*, donde se lleva a cabo una etapa denominada *Post-RAS*, a través de la cual se pueden visualizar las corridas del *HEC-RAS* en forma de mapas, en este caso las áreas de *inundación* que es el resultado principal que obtiene el especialista y el cual sirve de apoyo en la toma de decisiones. Este proceso se ilustra en la figura 3.5.

La integración entre los modelos está dada por el intercambio de información entre ellos mediante los ficheros *HEC-DSS* (*CEIWR-HEC 2009*). Los ficheros *HEC-DSS* se generan de manera automática desde los modelos. En el caso de la integración con el *ArcGis*, esta se establece de manera natural con la instalación de las extensiones *HEC-GeoHMS* y *HEC-GeoRAS*, las cuales proporcionan información de entrada a los modelos y permiten visualizar el resultado de las corridas a través del sistema de información geográfica.

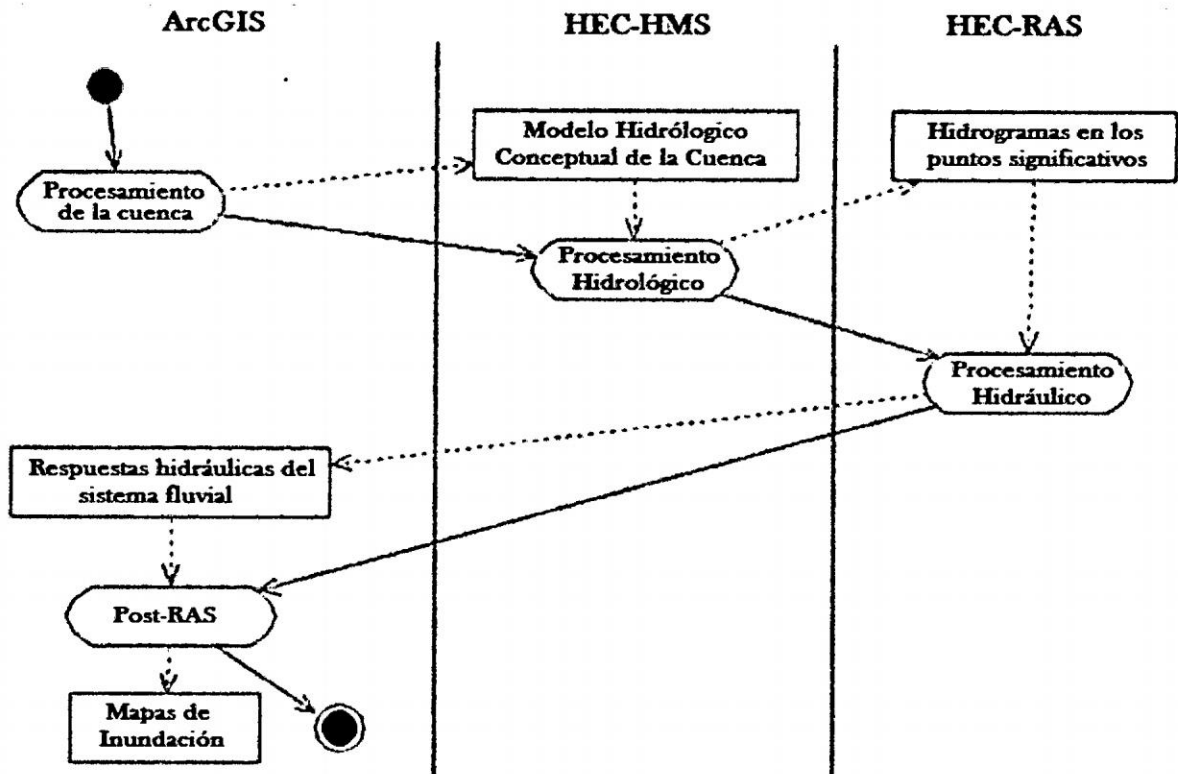


Figura 2.14: Actividades del proceso de modelación (Hammerly, 2008)

2.2.6. Modelación Lluvia Escorrentía para Previsión de Avenidas

La nueva visión de la sociedad basada en el saber convivir con las *inundaciones*, va más allá de la simple solución de construcción de infraestructuras de protección, y se integra dentro de un marco más extenso y pluridisciplinar de gestión de riesgo. Dentro de este marco, tiene un gran peso la anticipación de crecidas disponiendo de una información que permita tomar decisiones y medidas acertadas con antelación. La previsión en cuencas grandes puede hacerse de manera fiable a partir de puntos de control aguas arriba, en cambio, en las cuencas de dimensión mediana la transformación *lluvia-escorrentía* juega un papel importante, y la anticipación necesita generalmente la aplicación de un *modelo hidrológico* que alimentado con datos conocidos de *lluvia* y caudales en diferentes puntos, sea capaz de dar información sobre la crecida en puntos de interés. Estos modelos *lluvia-escorrentía*, integrados en un sistema de previsión y alerta, necesitan conocer cierta información hidrometeorológica en *tiempo real* (proveniente de redes de pluviógrafos y/o radar meteorológico, sensores de nivel y de caudales

del río). El uso extensivo que se hace del territorio apunta a que estos sitios de interés no se pueden limitar a unos cuantos puntos críticos (paso del río por una ciudad, un embalse), sino que en general será más frecuente recibir peticiones del estado de los ríos en muchos puntos sensibles de territorio.

2.2.6.1. Transformación Lluvia - Escorrentía

Una vez que se ha estudiado el régimen de *precipitaciones* de una cuenca, obtenido una *lluvia* de diseño asociada a un determinado periodo de retorno y estimado las pérdidas con alguno de los modelos disponibles, de manera tal de encontrar la *lluvia neta o efectiva*, el paso siguiente es transformar esa *lluvia efectiva* en *escorrentía* o caudal. Esta transformación puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos. El más popular es el del hidrograma unitario, introducido por *Sherman* en los años '30. También es posible la utilización modelos de depósito y, si el nivel de información es el adecuado, también se pueden usar modelos basados en las ecuaciones del movimiento del fluido.

El hidrograma unitario El método del Hidrograma Unitario tiene en cuenta, además del área y la intensidad de la lluvia, como lo hace el método racional, la forma, pendiente y características fisiográficas de la cuenca de estudio, aunque lo hace de forma implícita. El hidrograma unitario puede ser de las siguientes formas:

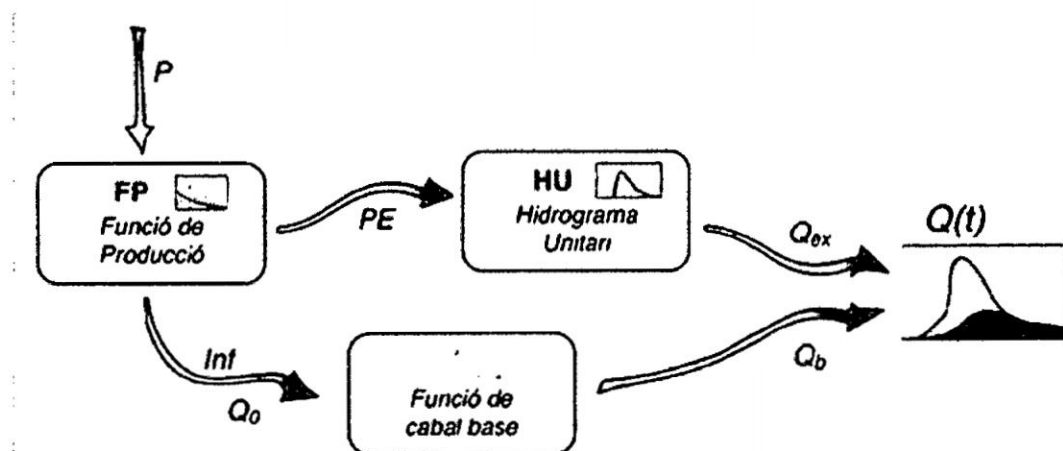


Figura 2.15: Método del hidrograma unitario (HU)

- Hidrograma unitario instantáneo.

- Hidrogramas unitarios sintéticos.
- Hidrograma unitario sintético de Snyder.
- Hidrograma adimensional de SCS.
- Hidrograma unitario de Clark. Método de las isócronas.
- Hidrograma unitario para diferentes duraciones de lluvia.

Modelos de depósito

a. Modelo de sistema hidrológico general La cantidad de agua almacenada en una cuenca, S , puede relacionarse con los caudales de entrada, I y salida, Q , de la cuenca (Figura 2.1), a través de la ecuación integral de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (2.1)$$

Como la cantidad de agua almacenada en la cuenca aumenta y disminuye con

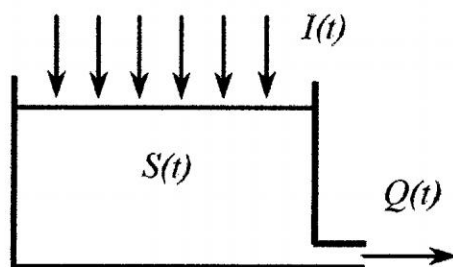


Figura 2.16: Representación simplificada de un sistema hidrológico (Chow, 1994)

el tiempo en función de I y Q de su variación con el tiempo, el almacenamiento en cualquier instante podrá expresarse por una función tal como:

$$S = f \left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots \right) \quad (2.2)$$

Donde la función f estará determinada por la naturaleza del sistema hidrológico analizado (cuenca o tramo de cauce). La solución de este sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (I y Q), puede resolverse, por ejemplo, de dos maneras:

- Diferenciar la ecuación de almacenamiento, sustituir el resultado en la primera y resolver la ecuación diferencial integrando para I y Q .

- Aplicar el método de diferencias finitas a las dos ecuaciones para resolverlas en puntos discretos del tiempo

b. Modelo de embalse lineal Un embalse lineal es aquel cuyo almacenamiento, S , está relacionado linealmente con su caudal de salida, Q , a través de una constante de almacenamiento k :

$$S = kQ \longrightarrow [L^3] = [T] \cdot [L^3T^{-1}] \quad (2.3)$$

De manera que k debe tener unidades de tiempo. Reemplazando esta definición del almacenamiento en la ecuación de continuidad de un sistema hidrológico, nos queda:

$$\frac{dS}{dt} = k \frac{dQ}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (2.4)$$

Operando encontramos que, suponiendo constantes k y $I(t)$ y con $Q_0=0$

$$Q(t) = I \int_0^t \frac{1}{k} e^{\frac{\tau-t}{k}} d\tau = I \left| e^{\frac{\tau-t}{k}} \right|_0^t \quad (2.5)$$

Para un instante correspondiente a un tiempo $t > t_0$ siendo t_0 la duración de la entrada I , tendremos:

$$Q(t) = I \left(1 - e^{-\frac{t}{k}} \right) \quad (2.6)$$

Para un instante correspondiente a un tiempo $t < t_0$ es decir cuando I es igual a 0, entonces: 0

$$Q(t) = e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} \quad (2.7)$$

Modelo de onda cinemática La modelación del proceso de transformación *lluvia-escorrentía* también puede efectuarse a través de la aplicación de las ecuaciones del movimiento del agua sobre la superficie de la cuenca. Esto permite el conocimiento en detalle de las características del flujo sobre la superficie de la cuenca, pero como contrapartida, es necesario tener información de dicha superficie con el suficiente detalle espacial. La superficie de la cuenca es simulada a través de porciones de plano inclinado, definidos por una rugosidad, una longitud, un ancho y una pendiente (Figura 3.8). El comportamiento del flujo sobre estos planos inclinados se considerará equivalente al comportamiento del mismo sobre la superficie de nuestra cuenca. El movimiento del

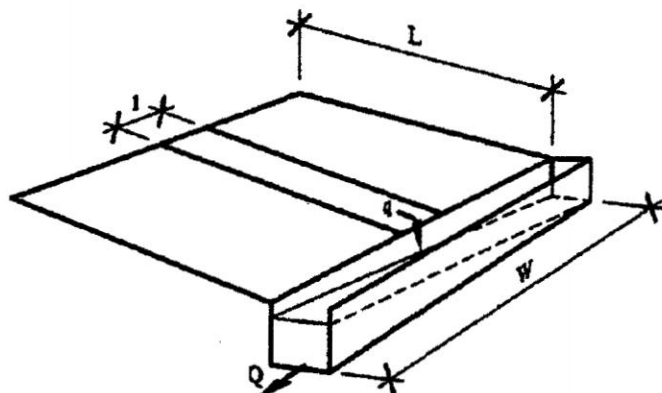


Figura 2.17: Esquema de planos inclinados para simular la escorrentía sobre la superficie de una cuenca (Chow, 1994)

agua puede describirse a través de las ecuaciones del flujo no permanente (ecuaciones de Saint-Venant). Existe una simplificación de estas ecuaciones en función de considerar que sólo las fuerzas de gravedad y de fricción son relevantes en la descripción del movimiento, simplificación que se conoce como aproximación de la onda cinemática.

2.2.6.2. Propagación de Caudales

Se denomina propagación de caudales al procedimiento a través del cual se puede determinar el hidrograma de caudal en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba. Dicho procedimiento puede aplicarse a sistemas agregados o distribuidos. Cuando se aplica a sistemas agregados, el flujo se calcula como una función del tiempo en un lugar en particular, lo que también se conoce como propagación *hidrológica*. Cuando se aplica a sistemas distribuidos, el flujo se calcula como una función del espacio y del tiempo a través del sistema, lo que se conoce también como propagación *hidráulica*.

2.2.7. Ejemplos de Sistemas de Alerta Temprana

2.2.7.1. En Perú

En la cuenca del río Piura, Región de Piura, del Perú, existe un alto riesgo de crecidas e *inundaciones*, por lo que desde los eventos del *FEN 1982-1983* y *1997-1998*, las instituciones trabajan en la elaboración de medidas de preparación y respuesta

inmediata, ante las crecidas que presenta el río Piura. Dentro ello se ha realizado el estudio definitivo para la reconstrucción y rehabilitación del sistema de defensas ante inundaciones en el Bajo Piura; que a su vez requiere del empleo de un modelo conceptual *precipitación-escorrentia*, que permita una modelación de las *inundaciones extremas* del río Piura, y acompañe a tomar acciones de preparación y respuesta ante una eventual emergencia de *inundaciones*.

Este modelo hidrológico es el *NAXOS-PRAEDICT*, que fue seleccionado como herramienta del análisis de la cuenca y es utilizado para el pronóstico de las *inundaciones*; estableciéndose un Sistema de Alerta Temprana - *SIAT*.

El *SIAT*, se crea en el contexto de frecuentes *inundaciones* del río Piura, por la gestión interinstitucional del Proyecto Recuperación y Prevención ante Catastrotes Naturales "*PAEN*", el Gobierno Regional de Piura, la Universidad de Piura - *UDEP*, el *SENAMHI*, el Proyecto Especial Chira Piura - *INADE*, el Consejo Consultivo Científico Tecnológico, el Grupo de Gestión de Riesgos, y la Dirección Regional de Salud, quienes desarrollaron una propuesta colegiada para implementar y poner en funcionamiento una Red de Telemetría.

El *SIAT*, consta de una red de equipos hidrometeorológicos automáticos y convencionales, compuesta por 30 estaciones pluviométricas e hidrométricas, enlazadas hacia un Centro de Operaciones que funciona en el *Proyecto Chira Piura*. En este Centro se registran los datos de *lluvia* y niveles de agua en el software *DEMAS*; se procesa y analiza con el software *NAXOS - PRAEDICT*, permitiendo estimar caudales con 50 horas de anticipación en promedio, que son comunicados al Comité Regional de Defensa Civil (*COER*), quien a su vez, da la *ALERTA* a su Presidencia, Comisiones de Trabajo, Medios de Comunicación y al *INDECI*, para la implementación de medidas de preparación y respuesta inmediata con las poblaciones en riesgo de *inundación*.

2.2.7.2. En Europa

En Europa existes muchos sistemas de información de *inundaciones* y una variedad de aplicaciones, la mayoría son usados en el ámbito *hidro-meteorológico* y la *prevención de inundaciones*. En algunos casos también es utilizado en el manejo de desastres que a menudo son imprevisibles, la ventaja de usar estos modelos es crear conciencia de la necesidad y los beneficios de una cooperación eficaz y eficiente. los cuales de describen

algunos de ellos:

Alemania En Alemania las dos entidades más importantes que tienen que ver con las inundaciones son los *Land Kreise* (condados) y los *Stadt Kreise* (Distritos Urbanos), además los Estados Federales Independientes, tienen una gran independencia en la organización de la gestión del agua y manejo de *inundaciones*, esto significa que existen diferentes sistemas de recolección de datos, con diferentes modelos de *inundación* y procedimientos, teniendo en cuenta el tamaño de los Estados Federados, se puede considerar nación independiente en relación con el manejo de *inundaciones*. Varios sistemas, se iniciaron en Alemania, como por ejemplo *FLIWAS*, el cual fue una fusión con los modelos que se desarrollaron en los Países Bajos; en las ciudades de *Heidelberg, Koln y Bad Friedrichshall* fue implementado el *HOWISS* como un modelo de manejo y observación de *inundaciones*.

Países Bajos *FEWS* es un sistema de previsión de *inundaciones* Holandés, y es usado en las áreas aledañas (transfronterizas), como Reino Unido (varias cuencas fluviales) y Suiza. Ingresando datos de redes existentes tanto *Meteorológicos e Hidrológicos* ya sea local o nacional vinculados a un modelo hidrodinámico (*obek, Mike 11, etc*) y los resultados son usados regionalmente en el manejo de *inundaciones* y medidas de emergencia. Otros modelos utilizados son *NOAH* (regional-trasfronterizo), *FLIWAS* (regional-trasfronterizo), *HIS* (nacional, pero se aplica en todas partes).

Francia En Francia *OSIRIS* es un modelo (regional) Francés, básicamente es un sistema de toma de decisiones para el manejo de las medidas de mitigación de *inundaciones* y evacuaciones en las municipalidades de pequeño a mediano tamaño, con los pronósticos de *inundación* de otros modelos. El pronóstico del tiempo y la información de previsión de inundaciones se producen a nivel nacional por el *SCHAPI*.

Reino Unido En Reino Unido, el Departamento del Medio Ambiente, Alimentación y asuntos rurales (*DEFRA*) es responsable de todo el manejo del agua, medio ambiente y desarrollo agrícola y la gestión en las regiones. En tres regiones se utiliza el *FEWS* como herramienta de predicción de crecidas. *DEFRA* conoce un código de colores que se muestra en la página web de alerta de *inundaciones*.

2.2.7.3. En EEUU

Existen numerosas redes de *ALERT* operadas localmente pero no hay una red nacional de pluviómetros/medidores de caudal para crecidas repentinas en los Estados Unidos. A escala nacional, la observación de la *precipitación* se logra principalmente a través de una red de *radares meteorológicos* colocados por el Servicio Meteorológico Nacional (*NWS*) en cooperación con la Administración Federal de Aviación (*FAA*) y del Departamento de Defensa (*DOD*). Llamados radares *WSR-88D* (*Weather Surveillance Radar, Radar de Vigilancia Meteorológica Doppler, 1988*).

Los datos de reflectividad del *WSR-88D* son convertidos a estimaciones de *precipitación* de alta resolución y son cartografiados para cuencas individuales en todo el país mediante softwares del *NWS*, llamado Monitorización y Predicción de Crecidas Repentinas (*Flash Flood Monitoring and Prediction, FFMP*), Los pronosticadores locales son alertados por el *FFMP* cuando la *lluvia* observada o la intensidad de la *lluvia* excede la Guía de Crecidas Repentinas (*Flash Flood Guidance, FFG*) para una cuenca.

Parte III

MATERIALES Y MÉTODOS

Capítulo 3

Materiales y Métodos

3.1. Modelación Hidrológica Mediante el SIG

3.1.1. Introducción

El desarrollo tecnológico de los últimos años facilitó el acceso a la información distribuida disponible de *precipitaciones*, tipo y uso de suelo, topografía, etc., que servirá de base para la modelación. Ello trajo en consecuencia una rápida aceptación del uso de *modelos hidrológicos distribuidos* integrados a *SIG*.

Los *modelos hidrológicos tradicionales* resultan herramientas aptas pero limitadas para resolver estos problemas, debido a las dificultades para representar correctamente la variabilidad espacial del medio físico y para incorporar eficientemente esta información, lo que puede mejorarse al integrarlos con Sistemas de Información Geográfica (*SIG*).

La teledetección y los *SIG* constituyen herramientas idóneas para facilitar un mejor conocimiento y gestión del medioambiente, por su capacidad para integrar información espacial de diferentes fuentes con bases de datos temáticas, generar modelos y simular escenarios y prever consecuencias de determinadas decisiones de planificación.

De las variadas aplicaciones que se pueden realizar, la estimación de *parámetros hidrológicos* es probablemente una de las de mayor utilización. En este caso, el objetivo es determinar y cuantificar parámetros que son usados como *inputs* de los *modelos hidrológicos* a través de la manipulación y análisis de *MDT* (modelo digital de terreno).

Todos los *modelos hidrológicos distribuidos* integrados con *SIG* utilizan información

geoespacial y se proponen como aplicables sobre un amplio rango de tamaños de cuencas y para diferentes propósitos. Sin embargo, no siempre es así y en general se trata de modelos o muy generales para aplicación en escala regional o muy específicos para escala de cuencas pequeñas.

3.1.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su Relación con la Hidrología

3.1.2.1. Definiciones

« Los SIG son un potente conjunto de herramientas para recoger, almacenar, consultar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real » (Burrough, 1986). « Los SIG son sistemas para capturar, almacenar, revisar, integrar, manipular, analizar y mostrar datos que están referenciados geográficamente en la tierra » (Comas, 1993). « Los SIG son sistemas informáticos que pueden dominar y usar datos que describen lugares situados en la superficie terrestre » (Rhind, 1987). « Un SIG es un grupo de procedimientos que proporcionan capacidades de entrada de datos, almacenamiento y consulta, creación de cartografía y análisis espacial de datos espaciales para apoyar las actividades de toma de decisiones de una organización » (Grimshaw, 1994). Todas las definiciones destacan tres elementos importantes como componentes de los SIG, citados en UNGÍS (a), 1999:

- Sistema informático
- Datos referenciados espacial o geográficamente
- Procedimientos de análisis y gestión.

Un sistema informático se compone de hardware (equipamiento físico requerido) y de software (conjunto de programas o instrucciones desarrollados en un lenguaje informático en particular que utiliza el ordenador para ejecutar tareas específicas). La combinación de los requerimientos de entrada, de salida, memoria y procesador es lo que hace a los SIG ligeramente diferentes del resto de las aplicaciones.

En un SIG los datos tienen la propiedad particular de estar referenciados geográficamente, contando con características o componentes principales tales como: posición

geográfica, atributos temáticos, relación espacial con otras entidades (topología) y temporalidad.

Asimismo, en un contexto más amplio de los procesos de requerimientos o necesidades para la implementación de los SIG (Fisher, 1999), pueden listarse a través de nueve categorías jerárquicas que incluyen: (i) funciones, (ii) datos, (iii) aplicaciones, (iv) hardware y software, (v) selección del personal, (vi) capacitación, (vii) procedimientos, (viii) aspectos legales y (ix) cambios organizacionales. La Figura 4.1 expresa la relación de esta serie jerárquica de funciones operacionales. Las primeras cuatro funciones en términos de recursos están relacionadas con la tecnología, mantenimiento y equipamiento, y las últimas cinco de estas categorías tratan con los recursos humanos.

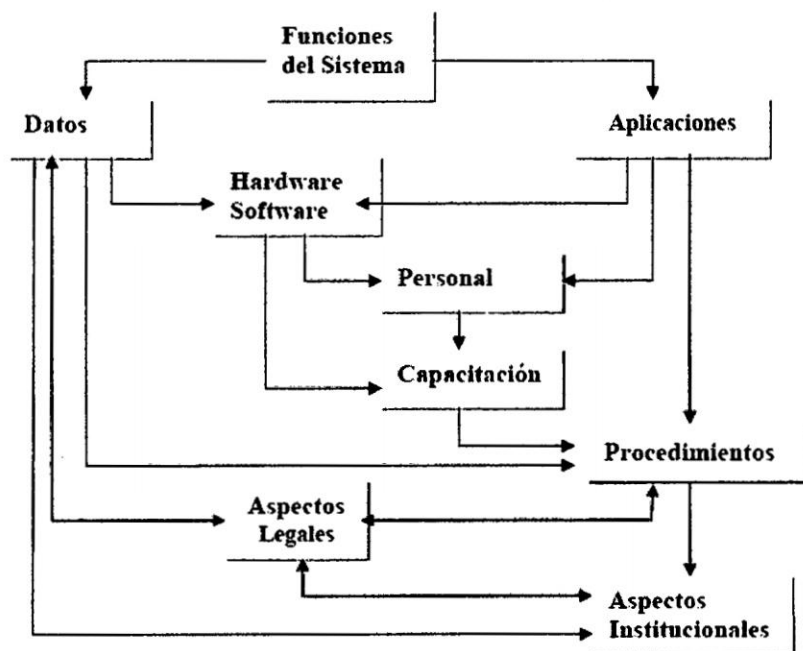


Figura 3.1: Jerarquización de necesidades para los sistemas de Información Geográfica (Fisher M., 1999. *Project Management for GIS*. UNIGIS, Manchester Metropolitan University)

Cada software SIG presenta un conjunto de funciones y una estructuración de éstas en forma lógica. Los tipos y disposición de las funciones reflejan la lógica del sistema de diseño y las clases de uso formulados. Básicamente se distinguen cuatro grupos básicos de funciones relacionadas con:

- Entrada de datos y control de calidad.
- Almacenamiento de datos y gestión de bases de datos.
- Modelización y análisis de datos.
- visualización y salida de éstos.

Entrada de datos y control de calidad: La entrada de datos implica transportarlos de su formato original a uno que pueda ser usado por el *SIG* (Rodríguez, 2007). Los tipos de información a incorporar a un *SIG* pueden incluir datos de percepción remota, fotografías aéreas, datos capturados mediante sistemas *GPS* (Global Positioning System o sistema de posicionamiento global), encuestas, censos y mapas, entre otros; y siempre la calidad de los datos necesita ser revisada, para evitar errores introducidos durante los procedimientos de entrada de los datos y errores en los datos originales.

Almacenamiento de datos y gestión de bases de datos: Los datos en el *SIG* tienen que ser guardados en un sistema gestor de bases de datos, donde son almacenados en tablas y en capas de mapas, debiendo contar con funciones para la actualización, edición y manipulación de los datos gráficos y de atributos.

Análisis y modelación de datos: La habilidad de un *SIG* de realizar análisis y modelación de datos espaciales es lo que lo hace diferente de otros sistemas de información, caracterizado con la posibilidad de integrar datos de diferentes fuentes y de producir nueva información como resultado de esta integración *SIG*.

Salida y visualización de datos: Una vez que el análisis y la modelación de nuestros datos han sido completados es necesario presentar los resultados de alguna forma sencilla que permita interpretarlos y comunicarlos, tales como mapas, planos, tablas, gráficos, reportes o archivos digitales para ser analizados en otros paquetes de software como hojas de cálculo, programas gráficos de diseño y edición, paquetes de análisis estadístico o simplemente otro *SIG*.

3.1.3. Modelacion de Datos Geoespaciales

La complejidad del mundo real es tal que para la mayoría de aplicaciones *SIG* es necesario construir modelos de la realidad más sofisticados, constituidos por diversos tipos de entidades y adoptando un enfoque por capas.

El proceso de modelación de datos puede ser resumido como una serie de etapas, desde el proceso de abstracción de la porción del mundo real hasta su representación informática.

- La fase primera es aquella donde se identifican aquellas entidades espaciales del mundo real que interesan a nuestro propósito y se decide cómo se va a intentar representarlas en el modelo. Existen ciertos problemas asociados con la simplificación del mundo real en cinco tipos de entidades espaciales (puntos, líneas, polígonos, superficies y redes), entre ellos, la naturaleza dinámica del mundo real, la escala cartográfica y la identificación de elementos discretos.
- La fase segunda debe escoger uno de los dos modelos de datos espaciales, raster o vectorial, para visualizar, analizar y almacenar las representaciones de las entidades del mundo real.
- La tercera es la fase más técnica, donde se indica cómo recrear digitalmente las entidades identificadas mediante la utilización del modelo de datos espaciales seleccionado en la fase segunda.

3.1.4. Fuentes de Captura de Datos y tipos de información espacial

Como se ha citado, los tipos de información a incorporar en un *SIG* pueden incluir datos de percepción remota, fotografías aéreas, datos capturados mediante sistemas *GPS*, encuestas, censos y mapas, entre otros.

A continuación se presentan diversas coberturas o capas de información geoespacial y sus fuentes de datos, de utilidad para usos comunes en muchas aplicaciones de modelado *SIG*.

3.1.4.1. Modelos digitales de terreno (MDT):

Los modelos digitales de terreno, la información referente a la topografía o a cualquier otro hecho tridimensional, se pueden representar mediante tres tipos de modelos de datos diferentes. Las diferencias entre ellos residen en cuáles son los elementos de base utilizados: puntos, líneas o funciones matemáticas (*Bustamante, 2008*).

La información topográfica requerida para la modelación hidrológica distribuida, tal como pendiente, aspecto, longitud de flujo, área de aporte, subcuencas y redes de drenaje puede ser rápidamente extraída por procesos *SIG* a partir de *modelos digitales de terreno*.

3.1.4.2. Datos de redes hidrográficas

La información sobre cuencas hidrográficas y redes de drenaje generalmente está disponible como información digitalizada a partir de mapas analógicos, fotografías aéreas o relevamiento de campo (proporcionados por fuentes gubernamentales o comerciales, o digitalizados por los usuarios a través de mapas analógicos), aunque puede también generarse a partir de los *modelos digitales de terreno* (incluyendo subcuencas y redes de drenaje).

3.1.4.3. Datos de tipos de suelo

Los datos de tipos de suelo publicados por el *ANA* están disponibles en formato analógico y digital (vectorial), en escalas de representación cartográfica en nivel de reconocimiento y semidetalle, de utilidad para planeamiento regional, manejo y monitoreo de cuencas hidrográficas.

3.1.4.4. Datos de ortofotocartas digitales y cartas imágenes

Estos productos combinan las imágenes características provenientes de vuelos aerofotogramétricos y/o captura de datos desde satélites de observación de la tierra, con la calidad geométrica de un mapa (*Proyección Gauss Kruger, Sistema Geodésico WGS84*). Pueden ser usados en numerosas aplicaciones *SIG* o combinados con otros

datos digitales, aunque lamentablemente no se dispone de una cobertura completa *IGM* para nuestro país.

3.1.4.5. Datos extraídos de imágenes de sensores remotos

A través del procesamiento de imágenes de sensores remotos puede obtenerse información referida a precipitación, uso y cobertura de la tierra, índices de vegetación, redes de drenaje y cuencas hidrográficas, temperatura de superficie, humedad del suelo y nieve/hielo, entre otros relevantes aspectos de la cubierta terrestre.

3.1.5. Modelación Hidrológica

3.1.5.1. Ciclo Hidrológico y modelación Hidrológica

Las *ciencias hídricas* están relacionadas con las aguas de la tierra: su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el ambiente y con los seres vivos y en particular con los seres humanos. Puede considerarse que la *hidrología* abarca todas abarca todas las *ciencias hídricas*. En una forma más estricta, puede definirse como el estudio del *ciclo hidrológico* (Figura 4.2). El cual es el foco central de la *hidrología*. No tiene principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre para volver a la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua que *precipita* puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargar en ríos como *escorrentía superficial*. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la *escorrentía superficial* y finalmente fluye hacia el mar o se evapora [9, pg. 2 (Chow, 1959)], y por tal dándose una retroalimentación del ciclo. Para estimar el comportamiento de variables que permiten reproducir el *ciclo hidrológico* de una cuenca, se han elaborado *modelos hidrológicos*, como una representación aproximada del balance hídrico, considerando por un lado las variables meteorológicas como la *precipitación* y la *temperatura* del aire como datos de entrada y por otro, las características físicas de la cuenca. Para una mejor gestión de los *recursos hídricos* y toma de decisiones, es de importancia la *mod-*

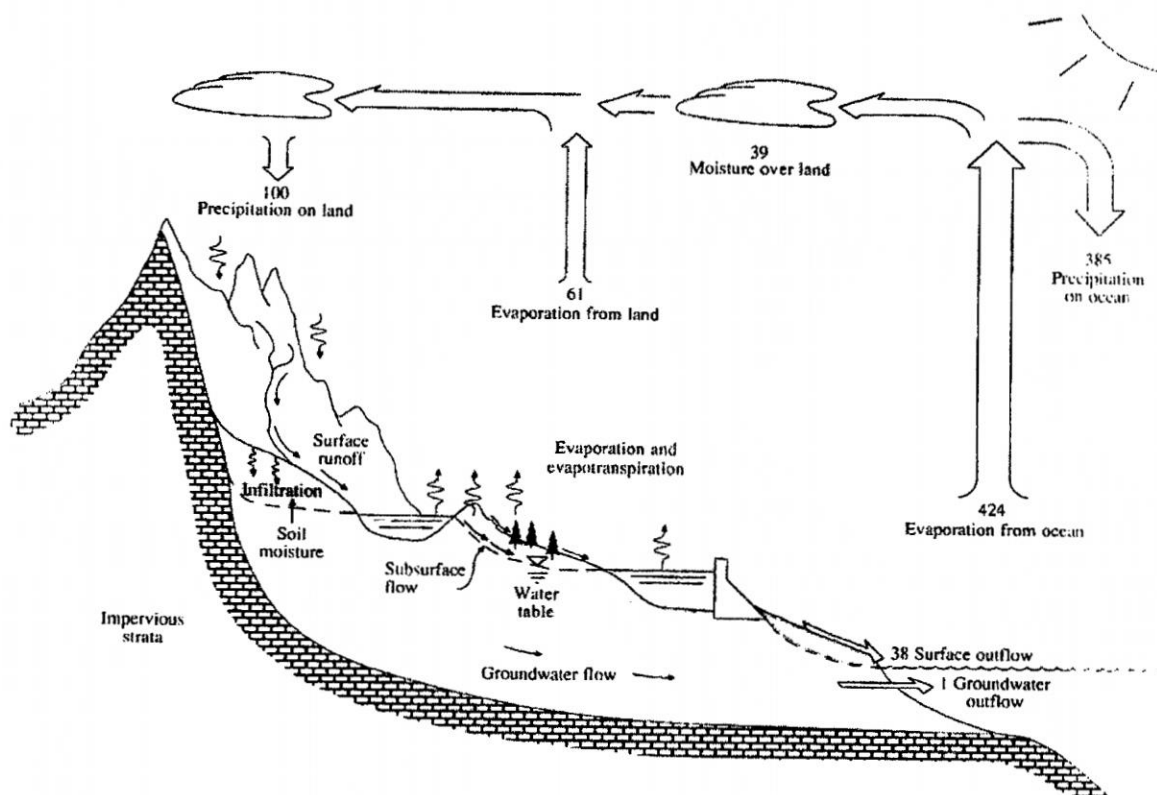


Figura 3.2: Ciclo del agua con balance promedio global anual de unidades relativas de un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre (Chow, 1959)

elación hidrológica, la cual es útil para estudiar el comportamiento de los regímenes de caudales ante variaciones en las condiciones predominantes como *lluvia* o *evapotranspiración*. En base a ello podemos lograr un mejor entendimiento de los procesos *físicos hidrológicos* dentro de la cuenca. Además nos permite realizar simulaciones y pronósticos del comportamiento *hidrológico* mediante simplificaciones matemáticas de los procesos físicos en la cuenca.

Clásicamente se han utilizado los denominados *modelos globales o agregados*, que tratan la *cuenca* como si fuese una sola entidad, con una única entrada de lluvia (*lluvia promedio*), donde el caudal de salida se reproduce a partir de una dinámica global del sistema. Esta modelización tiene poca base física, puesto que obvia el hecho de que parte de la *escorrentía superficial* puede infiltrarse al pasar por un cauce permeable, y subestima la componente subsuperficial del caudal. Además, la identificación del *hidrograma unitario (HU)* no es sencilla. A partir de información hidrológica disponible de la cuenca (*muchos datos de lluvia y caudal*), el *HU* se puede derivar de la solución del problema inverso, estos datos no siempre están disponibles con la suficiente can-

tividad y calidad, y además arrastran la descripción espacial limitada de la *lluvia*. Los denominados *modelos distribuidos* incorporan más aproximadamente la variabilidad espacial de las diferentes variables y reproducen más fielmente los *procesos hidrológicos* que tienen lugar dentro la cuenca. Los *modelos distribuidos* con base física describen con gran detalle los *procesos hidrológicos* de la cuenca, proponiendo la descripción de los fenómenos a escala fina (100 – 500m), dónde se plantean las ecuaciones características de los diferentes procesos e integrando las salidas de los diferentes procesos de cada píxel con sus vecinos. Así derivan en modelos muy complejos que requieren una gran cantidad de información, y por tal, la *calibración* de un número enorme de parámetros en caso de no poder estimar todas las variables a partir de medidas de campo. Las líneas actuales de investigación en *modelos hidrológicos distribuidos*, basadas en *sistemas de información geográfica* (SIG), información de satélite y sistemas computacionales modernos, ofrecen mayores posibilidades en la subdivisión de la cuenca en subunidades menores más homogéneas, dónde se les aplica un modelo agregado, dándonos la posibilidad de poder responder preguntas científicas, como es el caso de 1) estimar el impacto de los cambios de uso de suelo o deforestación en el régimen de caudales. 2) evaluación de impactos de cambio climático sobre el régimen de caudales de una cuenca.

3.1.5.2. Modelación de los Sistemas Naturales

En toda cuenca se producen una serie de procesos, cuyo conjunto conforman las funciones del *sistema hidrológico*. La función central es la regulación de las aguas precipitadas sobre la superficie de la cuenca y su movimiento a través de los diferentes medios que la integran (*atmósfera, superficie y suelo*), lo cual genera interacción entre ellos.

En función del medio donde se desarrollan, podemos distinguir como subsistemas: el agua atmosférica, que contiene los procesos de *precipitación, evaporación, intercepción y transpiración*; agua superficial, con los procesos de escorrentía superficial y afloramientos de aguas subterráneas y agua subterránea, que incluye los procesos de infiltración, percolación, flujo subsuperficial y subterráneo. Cada uno de estos subsistemas se encuentra separado de otras unidades similares por una frontera.

3.1.5.3. Clasificación de Modelos, Escalas Temporales y Espaciales

De acuerdo a *Chow V.T. y otros (1994)*, los *modelos hidrológicos* pueden dividirse en dos categorías, *modelos físicos* y *modelos abstractos*. Los primeros incluyen modelos a escala, que son los que construyen a escala reducida y modelos análogos, que usan otros sistemas físicos con propiedades similares a las del prototipo. Por su parte los abstractos representan los sistemas en forma matemática. La operación del sistema se describe por medio de un conjunto de estaciones que relacionan las variables de entrada y salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tiene un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo.

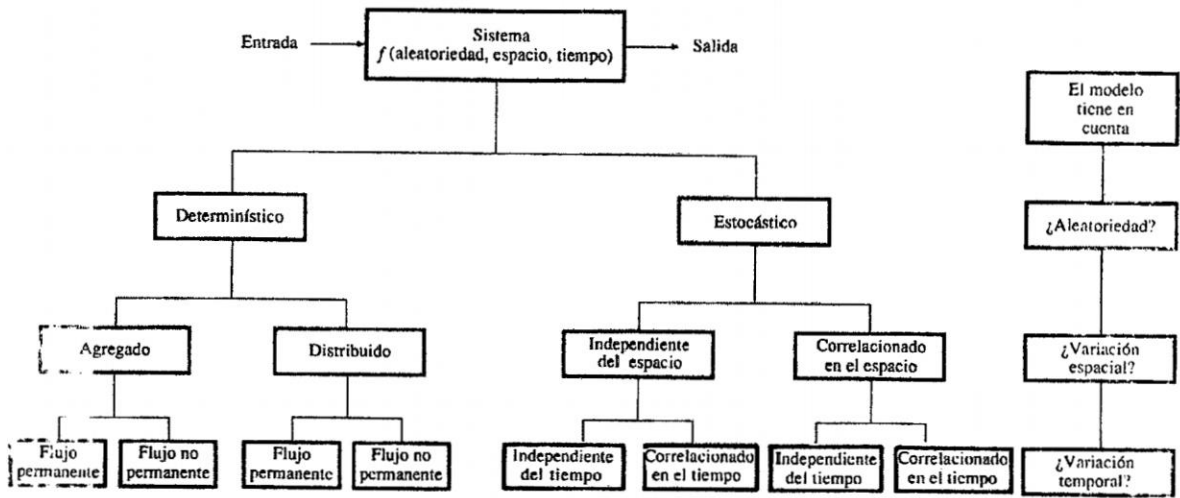


Figura 3.3: Clasificación de modelos hidrológicos (*Fuente: Chow V.T. y otros, 1994*)

3.1.5.4. Modelos Hidrológicos utilizados en SIG

Para un manejo adecuado del agua, la *modelación hidrológica* es una herramienta de primera importancia a fin de entender los procesos involucrados y simular respuestas a eventos particulares.

Como varios parámetros con variabilidad espacial influyen sobre la cantidad y la calidad del recurso agua, el uso de los *SIG* se vuelve esencial para la gestión de las características espaciales del medioambiente. Aunque el ciclo del agua es un fenómeno espacio-temporal, los *modelos hidrológicos* de cuenca, los *modelos hidráulicos* de ríos, los modelos de calidad del agua dentro de los lagos por ejemplo, se apoyan principalmente

sobre datos temporales, mientras que los *SIG* están basados sobre la discretización del espacio a un tiempo dado. Así, un vínculo entre los *modelos hidrológicos* y los *SIG* resulta ahora indispensable, donde varios niveles de integración hacen posible la gestión de base de los datos espaciales, la extracción de parámetros necesarios para el *modelado hidrológico*, la visualización cartográfica de los datos de entrada y de salida del modelo y la modelación del flujo sobre el terreno, así como el desarrollo de una interfase entre el *SIG* y el modelo.

A continuación se presenta una breve síntesis de los *modelos hidrológicos distribuidos* analizados. Todos utilizan información geoespacial y son aplicables a un amplio rango de tamaños de cuencas y para diferentes propósitos.

SHE - MIKE SHE: *SHE* (*Sistema Hidrológico Europeo*) fue inicialmente desarrollado en varios institutos de investigación de Europa. En su forma original, la estructura del modelo es para flujo vertical en suelos parcialmente saturados. Posteriores desarrollos del *SHE* fueron conducidos por dos institutos europeos que dieron lugar a dos versiones del modelo, por un lado el *SHETRAN* desarrollado por la Universidad de Newcastle - *UK* y por el otro el *MIKE-SHE* desarrollado por el *Danish Hydraulics Institute*.

Esta última versión del *SHE* tiene además incorporado un módulo de calidad de agua y de transporte de sedimentos.

MIKE SHE es un modelo de tipo distribuido, donde las características de la cuenca y los datos de entrada se representan a partir de celdas cuadradas en el plano horizontal. En la **Figura 4.3** se esquematiza esta estructura de modelación. En cada una de las celdas se representan las características hidrogeológicas de las distintas capas de suelo de espesor variable que caracterizan la región.

La representación detallada de las interacciones entre los procesos físicos del *ciclo hidrológico*, así como las facilidades gráficas del Sistema *MIKE SHE*, hacen de éste una excelente herramienta para la evaluación de los fenómenos *hidrológicos*.

Modular Modeling System-Precipitation Runoff Modeling System (MMS/PRMS): El modelo *PRMS* tiene un diseño modular, de parámetros distribuidos, y fue desarrollado para evaluar los cambios en la relación de las com-

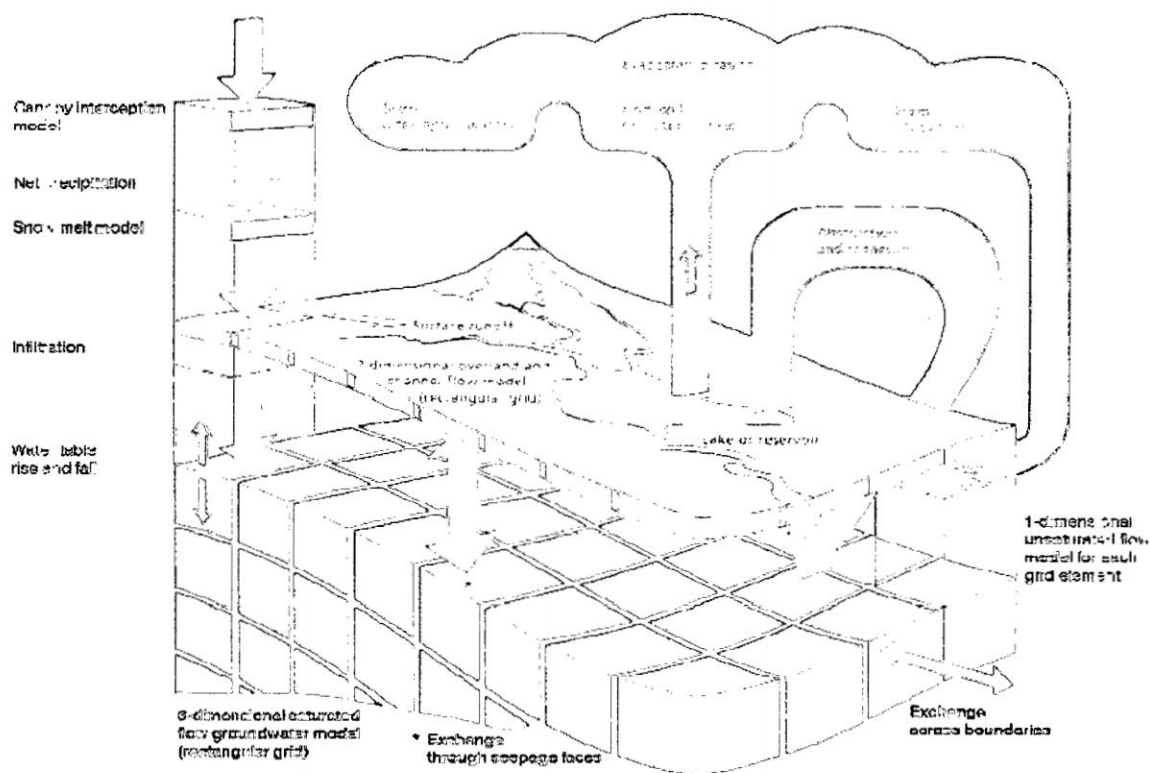


Figura 3.4: Estructura del modelo MIKE-SHE. (Fuente: Danish Hydraulics Institute)

ponentes del balance hídrico ante los efectos combinados de *precipitaciones* y uso de suelos (http://water.usgs.gov/software/surface_water.htm). Una interfase con *GIS* es utilizada para la identificación y determinación de los parámetros topográficos, *hidrológicos* y visualización de la distribución temporal y espacial de los parámetros y variables. El sistema es denominado Modular Modeling System (*MMS*) y fue desarrollado por el *US Geological Survey* para ser utilizado originalmente por el *PRMS*.

TOPMODEL: Este modelo fue desarrollado en la Universidad de Lancaster (Reino Unido) por *Beven y Kirkby*, y utiliza aproximaciones de parámetros semidistribuidos. (http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm). Originalmente fue desarrollado para simular procesos de transformación *lluvia-escorrentía* en áreas templadas con *precipitaciones* de baja intensidad, siendo utilizado para determinar la distribución espacial de la humedad del suelo en una cuenca.

Una de sus particularidades es que utiliza un pequeño número de parámetros y,

según refiere la bibliografía, es muy eficiente a nivel computacional.

CASC2D: El *modelo hidrológico CASC2D* utiliza una grilla de celdas cuadradas que resuelve la ecuación de conservación de masa utilizando diferencias finitas (*Ogden y otros 2001*) y fue aplicado principalmente en simular procesos *hidrológicos* en cuencas con gran variabilidad espacial de sus características físicas y de *precipitaciones*. (<http://gcmd.nasa.gov/records/CASC2D.html>) El desarrollo original fue realizado en la Universidad de Colorado, y mejorado en la Universidad de Connecticut y por el Cuerpo de Ingenieros de los *EE.UU.*

El modelo utiliza unidades inglesas y sistema de proyección *UTM* (Universal Transverse Mercator) y es apto para interactuar con *GIS ARC/INFO* y *GRASS*.

HEC-HMS: El *HEC* del Cuerpo de Ingenieros de los *EE.UU.* ha desarrollado un amplio número de modelos *hidrológicos e hidráulicos*, entre los cuales se encuentran los muy difundidos *HEC-1* (modelo de transformación *lluvia-escurrimiento* en cuenca) y el *HEC-2* (*modelo hidráulico*).

Sobre la base de éstos se han desarrollado numerosos *GIS* que interactúan para generar archivos de entrada para ser utilizados por estos modelos o bien a partir de los resultados de los mismos.

Ambos modelos, el *HEC-1* y *HEC-2* han sido actualizados por nuevas versiones denominadas *HEC-HMS* (*Hydrological Model System*) y *HEC-RAS* (*River Analysis System*) respectivamente. La filosofía de estos modelos con respecto a su integración con *GIS* es que ambos pueden utilizar información geoespacial, pero no dependen de ella para su ejecución.

HMS es un programa utilizado para modelar los procesos de *precipitación - escorrentía* en una cuenca o región. La información topológica y topográfica obtenida a partir de *GIS* (*Arc/Info, HEC-Prepro*) genera archivos que son abiertos automáticamente por *HMS* (Figura 4.4).

El programa es de uso libre y muy flexible, lo que permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, cálculo de hidrogramas, flujo base y propagación en cauces.

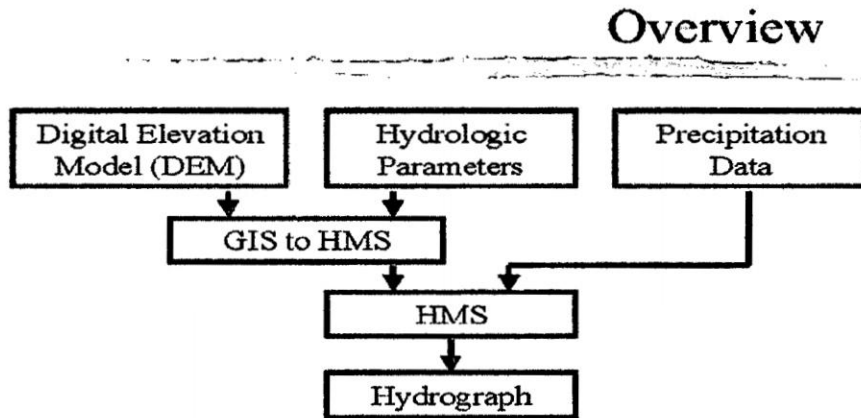


Figura 3.5: Esquema Integración HMS-GIS (Fuente: Hammerly, 2009)

3.1.6. Modelo de Simulación Hidrológica HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)

3.1.6.1. Aspectos Conceptuales

El modelo *HEC-HMS*, como ya se mencionó anteriormente, fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los *EE.UU.*, corresponde a los modelos de transformación *lluvia - escorrentía* y es una actualización de los utilizados bajo la denominación de *HEC-1*.

Una característica que hace más atrayente al *HEC-HMS* es la extensión *HEC-GeoHMS* que acopla el *modelo hidrológico* con datos de *SIG*. El modelo, que es una aplicación con base Windows ® y posee una interfase de entorno gráfica con el usuario es considerado de dominio público y gratuito y se puede obtener desde Internet en la siguiente dirección: www.hec.usace.army.mil

3.1.6.2. Componentes del Modelo

El *HMS* requiere para su funcionamiento de tres componentes de entrada:

Modelo de cuenca: contiene los diferentes elementos del sistema *hidrológico*: sub-cuencas, tramos para traslados, uniones, reservorios, etc., incluyendo sus respectivos *parámetros hidrológicos* y topológicos. Cada uno de los *elementos hidrológicos* se conecta en una red para simular los procesos de escurrimiento y conforma lo que se denomina el esquema topológico a modelar.

Modelo meteorológico: comprende los datos de *precipitación* (distribución espacial y temporal) a ser modelada y los de evapotranspiración. Existen siete métodos de *precipitación* que permitirán convertir la *lluvia* ingresada en el volumen de agua que recibe cada subcuenca.

control de especificaciones: define el período de la simulación y el paso de tiempo. Básicamente el modelo *HEC-1* y su versión actualizada del *HEC-HMS* son ampliamente reconocidos por su versatilidad y utilizados para simular eventos *hidrológicos*. En todos los casos requiere especificar las condiciones iniciales al comienzo de cada evento.

3.1.7. Modelo Continuo De Humedad De Suelo (SMA, SOIL MOISTURE ACCOUNT)

El modelo simula el movimiento y almacenamiento del agua en la vegetación, sobre la superficie de suelo, en el perfil de suelo y acuíferos. Para una *precipitación* y evapotranspiración dada calcula la escorrentía superficial, el flujo subterráneo, pérdidas debido a evapotranspiración y percolación profunda sobre la cuenta total.

Componentes de almacenamiento: El modelo *SMA* representa los almacenamientos de la cuenca en una serie de reservorios, como se ilustra en la Figura 4.5.

Los reservorios de almacenamiento que considera el modelo son:

- Almacenamiento por intercepción.
- Almacenamiento en depresiones superficiales.
- Almacenamiento en el suelo.
- Almacenamiento subterráneo.

Variables de transporte: El modelo computa el flujo de ingreso, salida y estado de almacenamiento de cada uno de los reservorios. Este flujo puede ser en términos de:

- Precipitación.
- Infiltración.

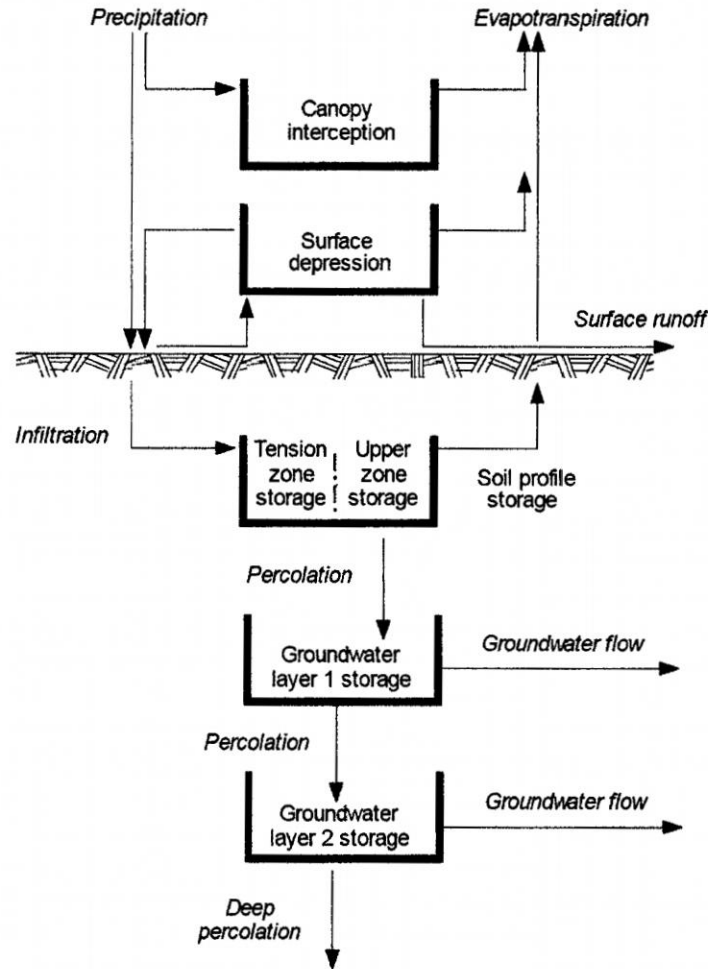


Figura 3.6: Esquema del modelo continuo de humedad del suelo (SMA) (Fuente: Usase (a), 2000)

- Percolación.
- Escurrimiento superficial y flujo base.
- Evapotranspiración (ET).

3.1.8. Vinculación Modelos Hidrológicos y SIG

3.1.8.1. Integración de SIG y Modelos Hidrológicos

De acuerdo con Domínguez y otros (1999) un *modelo hidrológico* requiere de una vasta información para representar las características físicas e *hidrológicas* de una cuenca; sin embargo, si el modelo toma en cuenta la variabilidad espacial de procesos como la infiltración, la evaporación, las características fisiográficas de la cuenca, etc. (modelos

de tipo distribuidos), la cantidad de información requerida se incrementa notablemente, ya que cada unidad *hidrológica* estará caracterizada por una topografía, geología, tipo y uso del suelo y climatología particular. Si consideramos, además, que el modelo debe satisfacer a un objetivo bien definido, por ejemplo conocer la respuesta *hidrológica* de una cuenca ante diferentes escenarios de cambio en el uso del suelo, los volúmenes de información que habrán de manipularse crecerán con el número de alternativas a estudiar. Es probable que la escasez de fuentes de información, cubriendo las características anteriores, limite el desarrollo y empleo de este tipo de modelos. Por otra parte, en la última década el desarrollo de los llamados Sistemas de Información Geográfica (*SIG*) ha tenido un verdadero auge que no sólo permite la generación de bases de datos del medio físico, biológico, socioeconómico, etc., sino que también constituye una herramienta muy útil en los procesos de modelación de diversa índole. Concretamente en el ámbito *hidrológico*, el número de modelos que se acoplan a un *SIG* o viceversa crece cada vez más y es previsible que la *hidrología* aproveche la enorme funcionalidad y potencialidad de los *SIG* en beneficio de una simulación más relacionada con las características físicas de los problemas.

Es necesario, entonces, un gran requerimiento de información para implementar un *modelo hidrológico*. Ante la necesidad de recolectar, almacenar y manipular grandes cantidades de datos, un *SIG* acoplado a un *modelo hidrológico* ofrece una verdadera alternativa para que se puedan realizar cálculos cada vez más cuantitativos. El empleo de un *SIG* junto con un *modelo hidrológico* no es, sin embargo, trivial y requiere al menos de tres grandes pasos:

- Construcción de la base de datos espacial.
- Generación de las coberturas temáticas que el modelo requiere.
- Desarrollo de una interfase de comunicación entre el modelo y el *SIG*.

3.1.8.2. Extensión Geoespacial HEC-GeoHMS

La extensión geoespacial *HEC-GeoHMS* fue desarrollada en conjunto entre el Centro de Ingeniería Hidrológica de la armada de los Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center HEC*), el Instituto de Investigaciones de

Sistemas Ambientales (*Environmental Systems Research Institute, ESRI*) y la Universidad de Texas y se puede obtener libremente en Internet a través de la siguiente dirección: <http://www.hec.usace.army.mil/>.

Este software intenta servir como herramienta geoespacial en *hidrología* para especialistas en el tema. Es una extensión que se debe utilizar junto con el software *ArcGIS 10.x*; el lenguaje de programación empleado se denomina *Avenue* y es propio del software de base que se requiere para funcionar.

La extensión *HEC-GeoHMS (USACE (b), 2000)* no es un *modelo hidrológico* en sí mismo pero realiza un preprocesamiento del terreno para crear un modelo de cuenca que luego pueda ser utilizado en el *HEC-HMS*, basado principalmente en las curvas de nivel que representan la topografía de la zona de estudio. De allí se derivan los límites de las cuencas y el trazado de las subcuencas, junto con la topología de la red de drenaje y características hidrológicas. La extensión puede también ser utilizada para crear un archivo de grilla que será requerido para realizar *modelación hidrológica distribuida* en *HEC-HMS*, junto con un archivo externo de *precipitación*, también en grilla.

3.2. Modelacion Hidraulica Mediante el SIG

3.2.1. Introducción

El caudal de los ríos durante las épocas del año, varían según los meses de estiaje y de avenidas, ésta última situación de los ríos producen las *inundaciones y desbordes*, como es el caso de nuestros ríos del Perú. Estas *Inundaciones* originan grandes problemas tanto a la población y los diferentes servicios, por lo que es muy importante estimar las áreas y los espacios que serían *inundados* por los diferentes caudales en las épocas de crecida.

Las *inundaciones* es uno de los mayores desastres naturales que ocurren sin que el hombre pueda hacer nada para evitarlo, causando grandes pérdidas económicas y humanas, sin embargo se puede de alguna manera mitigar los daños, previniendo, anticipando, y es donde se debe poner mayor interés.

La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (*SIG*) es una manera interactiva de desarrollar métodos automatizados cuantificando la variabilidad espa-

cial de las *inundaciones*. Una integración mayor del *SIG* a los métodos de evaluación de *inundaciones* existentes proveerá una mejor perspectiva de la *inundación* en un contexto espacial, considerando la administración y evaluación de riesgo.

En este capítulo se pretende determinar zonas con riesgo de *inundación* en un tramo del Río Chillón, utilizando Sistemas de Información Geográfica *SIG*. Para dicho procedimiento se utilizara el programa *HEC-RAS 4.1.0*, *ArcGIS 10.0* con la extensión *HEC-GeoRAS 4.1.0*.

3.2.2. Fundamentos Básicos

Aquí mostraremos algunos principios básicos fundamentales más relevantes, en los que se basa el funcionamiento interno de los diferentes programas empleados (*ArcGis*, Modelos digitales de terreno (*MDT*), *Hec-GeoRAS* y *Hec-Ras*), en la gestión de los datos y modelización de los diferentes escenarios:

3.2.2.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Definición Un *SIG* (*GIS en inglés*) es un sistema de información especializado en el manejo y análisis de información geográfica, dicha información geográfica es una representación de la realidad estructurada en diferentes capas superpuestas conteniendo cada una de ellas información independiente respecto a topografía, hidrografía, formaciones geológicas, tipos de suelo, también puede contener información de carácter más humano como información sobre ciudades, edificaciones, vías de transporte, etc.

Funciones de un SIG Un *SIG* tiene la capacidad de recibir información de diferentes maneras como:

- **Digitalización directa:** Mapas en papel en el cual el técnico usa una foto aérea o una reproducción escaneada de un plano y digitaliza los elementos que desee en ese plano o foto.
- **Entrada de coordenadas en archivos Digitales:** Se aplica en diversos casos donde existan bases de datos como en aparatos GPS o archivos a disposición en páginas web ministeriales.

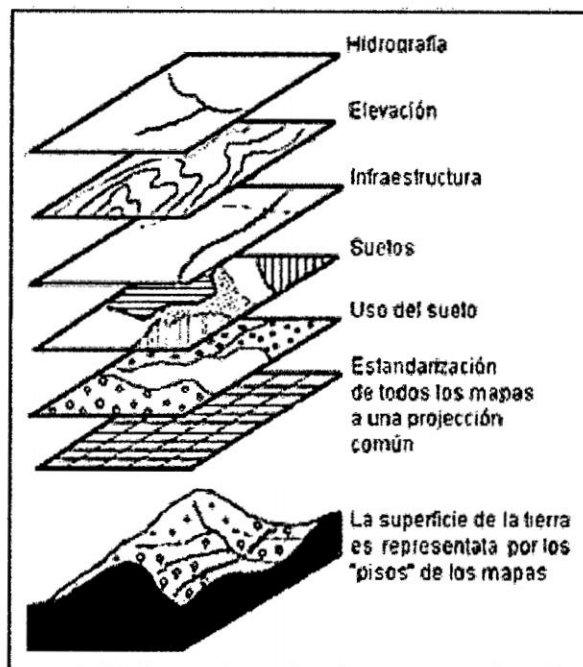


Figura 3.7: Capa de información (Puerta, 2011).

- **Teledetección:** Técnica complementaria con los SIG en el completado de zonas sin información por medio de la adicción de nuevas capas.
- **Salida de datos:** Representación gráfica y cartográfica en papel y digital, aunque esta no es su principal función.
- **Manipulación de los datos:** proveer de herramientas para la edición de todas aquellas necesidades planteadas por el usuario.
- **Análisis:** El activo más importante de un SIG, producir nueva información de la información disponible inicialmente por medio de funciones como selección gráfica, proximidad, sobre imposición cartográfica, rutas óptimas.

Elementos de un SIG ArcGIS Un SIG esta compuesto por cinco elementos fundamentales:

- **Software:** Los programas informáticos.
- **Hardware:** Pc o estación de trabajo junto con los periféricos en la captura y procesado de la información.
- **Datos:** Representación simplificada del mundo real.

- **Personal calificado:** El elemento más importante.
- **Procedimientos:** El análisis requiere de procedimientos bien detallados y consistentes en la producción de resultados precisos y reproducibles.

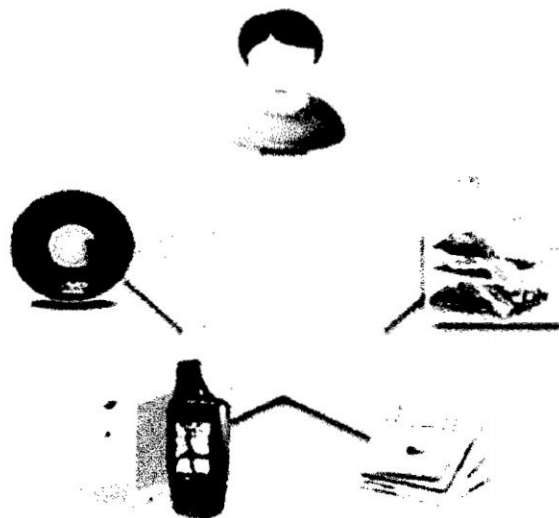


Figura 3.8: Elementos de un SIG (Puerta, 2011)

ArcGIS Un software que reúne entre otras funciones la aplicación *ArcMap*, nombre utilizado para identificar la familia estandar de los productos *SIG* de *ESRI*. *ArcGIS* se basa en una biblioteca común de componentes compartidos de software *SIG*, denominados *ArcObjects*. *ArcGIS* se compone de aplicaciones y un servidor independiente, cada aplicación puede crear, gestionar, analizar y servir datos almacenados en uno o más formatos.

- **ArcGIS Desktop:** Paquete integrado de aplicaciones *SIG* avanzadas y que consta de tres productos software: *ArcView*, *ArcEditor* y *ArcInfo*.
- **ArcReader:** Permite a los usuarios visualizar mapas publicados en alta calidad (*.PMFs*) creados en *ArcMap*.
- **Motor de ArcGIS:** Juego de herramientas para crear aplicaciones personalizadas independientes utilizando *COM*, *C++*, *Java* y *.NET*.
- **ArcPad:** Usado con *PDA*s para crear y gestionar datos mientras es utilizado.

- **Servidor de ArcGIS:** Una biblioteca compartida de objetos de software *SIG* utilizada para crear ó desarrollar aplicaciones *SIG* para servidor.
- **ArcIMS:** Editor de mapas, datos y metadatos por medio de protocolos de internet abiertos.
- **ArcSDE:** Gestiona y proporciona información espacial de *SGBDR* externos a clientes y *ArcGIS*.

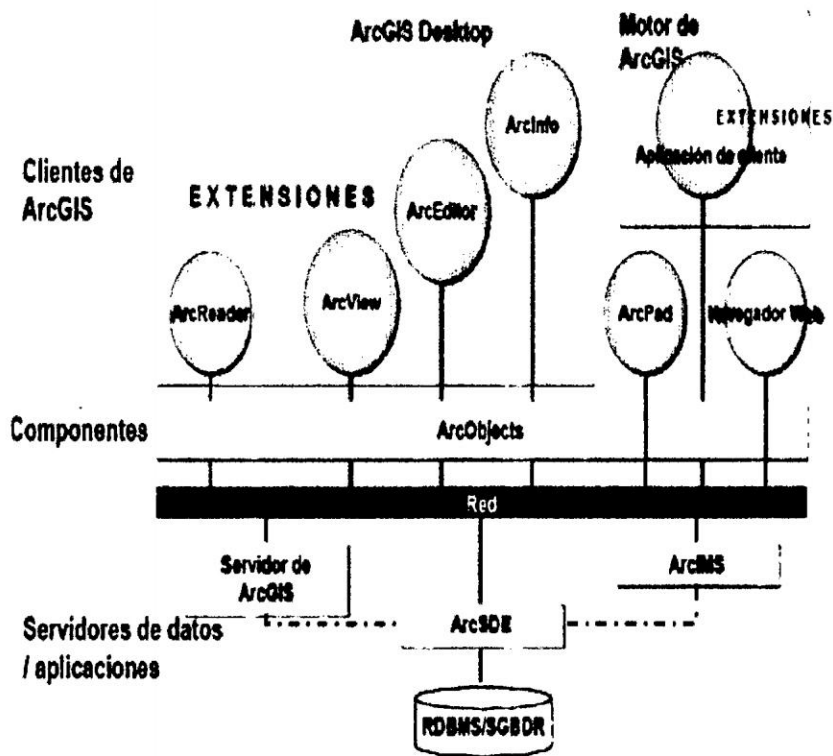


Figura 3.9: Familia ArcGIS (ESRI)

3.2.2.2. HEC-GeoRAS

Hec-GeoRas, es una extensión para *Hec-Ras*, diseñada con el fin de procesar datos georreferenciados, y en doble dirección, desde un software *SIG* a *Hec-Ras*, por la importancia que adquiere en los procesos de análisis una adecuada y precisa geometría, es necesario para los procesos de toma de decisiones y una correcta y ordenada disposición de los datos abstraídos.

El archivo creado con *Hec-GeoRas*, contiene un gran número de información, desde el trazado del río, secciones transversales, límites entre cauce principal y llanuras de

inundación, coeficientes de rozamiento, tanta información como capas de información se hayan introducido en nuestro archivo *SIG*.

Hec-GeoRas, requiere de un *MDT* en formato *TIN* ó *GRID*, que ha de ser continuo y no poseer zonas vacías de información, dado el caso se necesitara realizar un relleno de huecos.

3.2.2.3. HEC-RAS

Descripción *HEC-RAS* (*Hidrológica Engineering Center 's River Analysis System*), es un programa de dominio público, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los *EE.UU.* (*US Army Corps of Engineers*), surge como evolución del conocido *HEC-2*, con varias mejoras respecto a éste, entre las que destaca la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con los Sistemas de Información Geográfica mediante la extensión *HEC-GeoRAS*.

El principal objetivo del programa *HEC-RAS*, es el de calcular la elevación de la superficie de la lámina de agua para un caudal y condiciones de flujo dadas, (flujo permanente o estacionario), aunque *HEC-RAS* también puede ser empleado para movimientos transitorios, (no permanentes) unidimensionales, y recientemente para el cálculo del transporte de sedimentos.

Limitaciones de HEC-RAS El empleo de *Hec-Ras*, para la resolución de problemas hidráulicos, conlleva la responsabilidad de conocer las limitaciones en el marco de su aplicación. Hay que entender que una solución calculada a través de *Hec-Ras* no es una única solución real, sino muestra un posible resultado. En este instante intervienen con fuerza los conocimientos *hidráulicos* del usuario para lograr una correcta interpretación de los resultados.

En la aplicación de *Hec-Ras* podemos encontrar las siguientes limitaciones más relevantes:

- La ecuación de la energía, supone siempre distribución hidrostática de presiones. Entonces la solución es una simplificación, y será adecuada cuando la distribución de presiones se aleje mucho de la hidrostática.

- *Hec-Ras* no es un modelo *3D* ni *2D*, si no que es un modelo unidimensional, por lo que la posible solución es una aproximación a la real.
- Solo se pueden modelar cauces con pendientes menores de 10° ($S_0 < 0.18$), al no tener en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua ($\cos\alpha$) en las ecuaciones.
- Dificultades en la elección del calado crítico en secciones complejas, (terrazas fluviales). Por defecto es seleccionado el calado menor.
- Siempre ofrece una solución, por lo que se debe ser crítico ante el resultado obtenido.

3.2.2.4. Modelo Digital del Terreno (MDT)

El avance tecnológico no solo modifica los procedimientos de determinados trabajos, sino también la precisión de los mismo, en este sentido los *Modelos Digitales del Terreno (MDT)* logran que trabajar sobre un mapa a papel con líneas de nivel sirviéndonos únicamente de reglas y compas sea una imagen obsoleta y poco eficiente en el manejo de datos georreferenciados.

Los *MDT* han logrado transformar el concepto estricto de mapa, en la que cada variable era estudiada de forma diferente, a lograr un enfoque sintético, donde más de una variable logra integrarse en un sistema capaz de interrelacionarlas, logrando como resultado un modelo cualitativo como a la vez cuantitativo, este hecho forma parte de una nueva técnica denominada Cartografía digital, actualmente inmersa en una agresiva expansión con cada progreso en el ámbito de la informática.

Estructura de los Datos en MDT Es cierto que la unidad básica de un *MDT* es un valor Z referente a la altitud acompañado de dos valores más, x e y , que logran configurar la base necesaria de la representación tridimensional, el problema radica en el diseño del sistema que sea capaz de acoger esta información, estructurarla y permitir su manipulación. En esta dirección, históricamente se ha estructurado la información en dos posibles y diferentes formatos en función de su concepción básica:

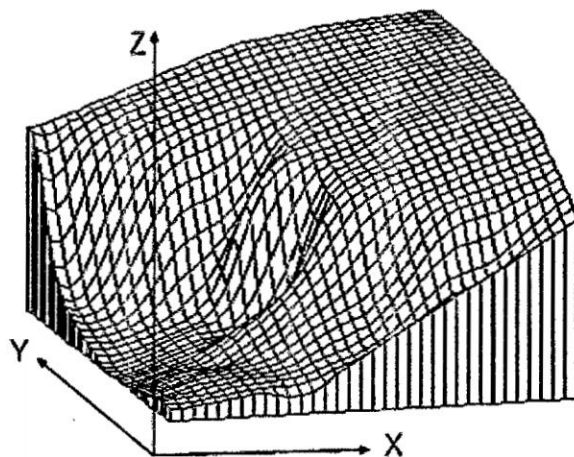


Figura 3.10: Modelo Digital del Terreno (*MDT*)

El Modelo Vectorial: Basado en entidades o u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices. La representación de los objetos se realiza mediante puntos, líneas ó polígonos con sus respectivos atributos. Los puntos se definen mediante un binomio de coordenadas, las líneas mediante vectores de puntos y los polígonos mediante una agrupación de líneas. El modelo vectorial se puede dividir en:

- **Contornos:** Los contornos pueden ser secuenciales, donde las líneas se almacenan como cadenas de cotas, ó analíticos, donde las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinomios, etc.
- **ArcReader:** Permite a los usuarios visualizar mapas publicados en alta calidad (*.PMFs*) creados en ArcMap.
- **Perfiles:** Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.
- **Triángulos:** Red de triángulos irregulares (*TIN*).

El Modelo Raster: Basado en localizaciones espaciales a las cuales se les asigna un valor para cada una de las variables para la unidad elemental de superficie. Los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que cubre el terreno con una distribución regular, estas unidades son denominadas Celdas. El modelo raster se puede dividir en:

- **Matrices:** Las matrices pueden ser regulares, formadas por cotas sobre una malla

cuadrada de filas y columnas equidistantes, y escalables, formadas por cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable.

- **Polígonos:** Formadas por cotas asignadas a teselas poligonales regulares (triángulos ó hexágonos).

Obtención de datos en la edición de un MDT El *modelo digital del terreno* utilizado en la elaboración de este proyecto fue obtenido a través del método directo de altimetría por láser aerotransportado, pero este no es el único método disponible, existen una serie de métodos que pueden ser agrupados en dos grandes grupos: métodos directos y métodos indirectos.

Métodos directos: Medida directa de la altitud sobre el terreno (fuente primaria). En este grupo podemos diferenciar tres métodos diferentes:

- **Altimetría:** Altímetros radar ó laser transportados por plataformas aéreas o satélites.
- **GPS (Global Positioning System):** Sistema de localización por triangulación.
- **Levantamiento topográfico:** Estaciones topográficas con salida digital.

Métodos indirectos: Medida estimada a partir de documentos previos (fuente secundaria).

- **Restitución** a partir de pares de imágenes.
- **Digitalización** de mapas topográficos.

3.2.3. Metodología para la Simulación Hidráulica

A continuación, se describe los pasos y las metodologías empleadas para la *modelación hidráulica* y cálculo de laminas de agua, para diferentes tiempos de retorno, desde los *sistemas de información geográfica* y *Modelos Digitales del Terreno*, utilizados en la gestión de la información georeferenciada, así como el posterior análisis, con *Hec-Ras* y adecuación de los resultados.

3.2.3.1. Software a Utilizarse

El *modelamiento hidráulico* del proyecto en estudio, se realizara mediante la simulación, utilizando programas integrados a aplicaciones *SIG*, los cuales han sido detallados en el fundamento básico del capítulo, cuyos softwares son:

- *ArcGIS 10.0* (*ArcMap, ArcView, ArcEditor y ArcInfo*).
- *HEC-GeoRAS 10.0* (Extensión *ArcGIS*).
- *HEC-RAS 4.1.0*.

3.2.3.2. Resumen de Pasos a Realizar

Se detalla a continuación a modo de resumen los pasos a seguir para realizar una simulación de *inundación*, con las herramientas descritas en el apartado anterior, el cual lo dividiremos en tres grupos o fases de la simulación:

Pre Proceso (Pre-RAS)

- Crear Archivo *ArcGis*.
- Añadir un *modelo digital del terreno* en formato *TIN*.
- Crear capas de información
 - Dibujo de « *Banks* » delimitación del cauce principal
 - Dibujo de « *Flowpaths* » zonas por donde proveemos que circulara, preferentemente tanto por el cauce principal como por las llanuras de inundación.
 - Creación de secciones transversales (*Cross-Sectional Cut Lines*).
- Usos del suelo (*Land Use*)
- Crear archivo para exportar a *HEC-RAS*.

Simulación Con HEC-RAS

- Interfaz *HEC-RAS*.
- Importar geometría desde *HEC-RAS*.
- Secciones transversales.
- Ingreso de condiciones de contorno.
- Simulación en flujo permanente.
- Exportar Resultados.

Post Proceso (Post-RAS):

- Post procesamiento.
- Nuevas capas de Información para los resultados *RAS*.
- Crear mapas de *inundación* y velocidades.

3.2.3.3. Pre Proceso (Pre-RAS)

Crear archivo ArcGIS y configurar En primer lugar, se debe ejecutar el programa *ArcMap de ArcGis*, aparece la siguiente ventana (figura 5.5), donde podemos elegir entre crear un nuevo archivo, utilizar una plantilla ejemplo, ó abrir un archivo ya existente, elegimos opción crear nuevo archivo.

Una vez hemos iniciado nuestro nuevo archivo, debemos asegurarnos que las extensiones *3D Analyst* y *Spatial Analyst* esten activadas, podremos comprobarlo en ***Tools/Extensions***.

Si es la primera vez que vamos a utilizar Hec-GeoRas, y no se encuentra en la barra de herramientas, ésta podemos personalizarla, para ello seleccionaremos ***Tools/Customize*** , y en la nueva ventana marcaremos la casilla correspondiente a Hec-GeoRas.

El programa ya está listo para comenzar a trabajar, antes de iniciar la modelización es muy importante definir la estructura organizativa de la información que vamos a generar, se aconseja una única carpeta en disco duro y en su interior subcarpetas para cada uno de los escenarios contemplados, una vez creado el directorio procedemos a

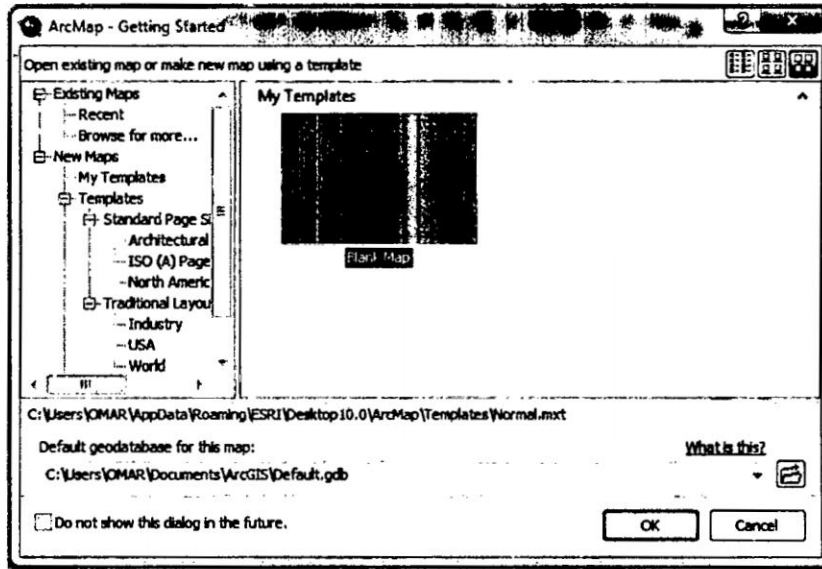


Figura 3.11: Creación archivo ArcMap

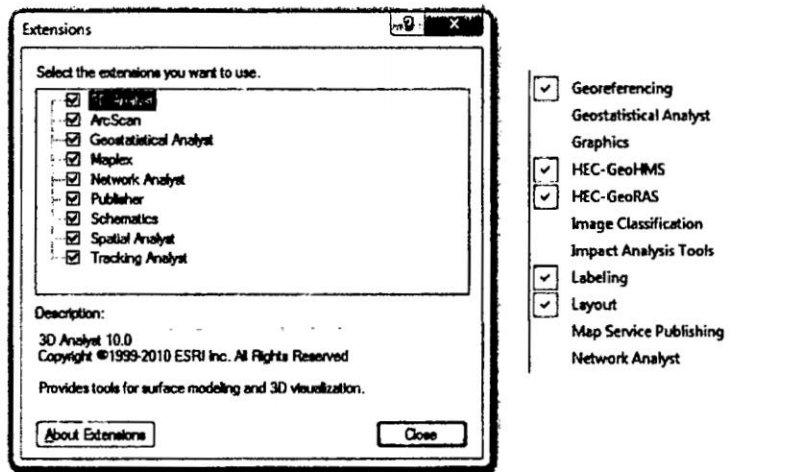


Figura 3.12: Añadir Extensiones y Herramientas de Hec-GeoRAS

salvar el proyecto en *ArcMap*, para ello seleccionamos en la barra menú *File/Save*, elegimos nuestra carpeta de trabajo anteriormente creada y guardamos, se aconseja un nombre tal que rápidamente relacione su lugar dentro del proyecto.

Añadir o crear un Modelo Digital del Terreno *Hec-GeoRas* permite el manejo de archivos *GRID* o *TIN*, por otra parte la utilización de estos tipos de archivos requieren de un conocimiento más profundo de los distintos formatos de datos espaciales, por lo que un *Modelo Digital del Terreno (MDT)* procedente de un vuelo por ejemplo, facilita el tratamiento de la información espacial al usuario, que solamente debe asegu-

de la realidad. Se entiende como una colección de elementos geográficos, como ríos, carreteras, límites administrativos, etc. así como los atributos de estos elementos. La superposición de capas genera una representación simplificada de la realidad.

El orden de representación de las capas dentro de un marco de datos es ascendente, de abajo a arriba, por tanto, las capas superiores aparecerán dibujadas encima de las que están por debajo. Las capas puntuales y lineales deben representarse encima de la de los polígonos e imágenes. El orden puede cambiarse haciendo click sobre la capa en cuestión y sin soltar, arrastrándola a la nueva situación deseada dentro de la tabla de contenidos.

Haciendo click en la tabla herramientas de *Hec-GeoRas* en **Ras Geometry/ Create Ras Layer** se puede visualizar un listado de todos los posibles atributos que puede contener el archivo geometría creado anteriormente.

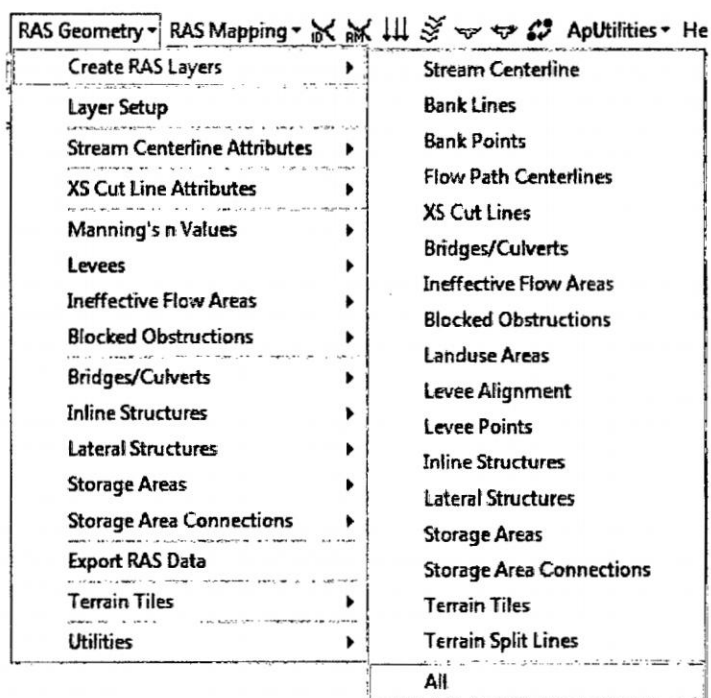


Figura 3.14: Menu RAS Layers

Stream Centerline (Delimitación Del Talweg): *Stream Centerline* es la capa representante de la línea central ó *Talweg* del río. Para editar esta capa de información se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Stream Centerline* ha de ser creado en el sentido del flujo, desde aguas arriba

hacia aguas abajo.

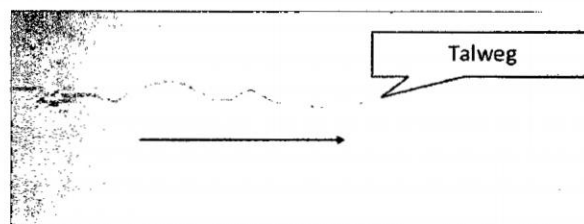


Figura 3.15: Centro de la línea de corriente

- Para trazar la línea del *talweg*, primeramente se activara la herramienta **Editor** (Figura 5.10), y seleccionar la capa generado en el paso anterior y luego trazar él, o los tramos de río sobre el modelo, asignaremos a cada tramo el binomio nombre de tramo y nombre del río, cuya denominación ha de ser única. Para ello usaremos la herramienta (figura 5.11).

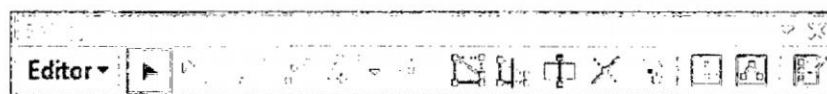


Figura 3.16: Menu Editor

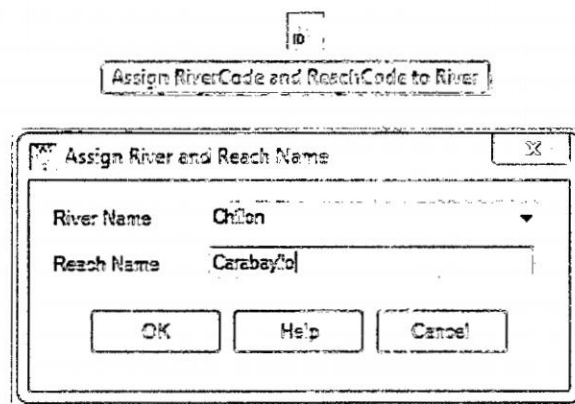


Figura 3.17: Asignación de nombre de río y tramo

- Las *Stream Centerline* nunca se pueden cortar entre sí excepto las confluencias.

Bank Lines (Orillas Del Cauce Principal): La capa *Banks Lines* define los límites del cauce principal con la zona correspondiente a la ribera de *inundación*. El uso de diferentes coeficientes de rugosidad para cada una de las zonas en cada

sección nos permite asignar mayores valores de rugosidad *n de Manning* en las riberas de *inundación* para dar cuenta de una rugosidad mayor a causa de la vegetación.

Para su edición se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los *Banks lines* pueden ser discontinuos.
- La orientación de los *Banks lines* no importa, su digitalización puede hacerse en la misma dirección del flujo, en contra de la dirección del flujo, puede ser realizado en un único trazado o de forma discontinua.
- Su incorporación como capa de información puede ser opcional, en el caso de no crearla, habrá de ser implementada en *Hec-Ras*.

Para Editar los *Banks Lines*, al igual que la *Stream centerline*, pulsar sobre *Start editing*, y activar *Task* en la opción *Create New Feature*, y *Target* en la opción *Banks*.

Flowpaths Centerlines (Trayectorias De Flujo): La capa de información *FlowPatch Centerlines*, es utilizada para identificar los centros de masas de las llanuras de *inundación* y del cauce principal, además de las direcciones principales de flujo. Si ya se ha creado la capa *Stream Centerline*, nos dará la opción de poder copiar la información referente al canal, teniendo solo que digitalizar dos líneas más que harán referencia a la llanura izquierda y derecha del canal principal.

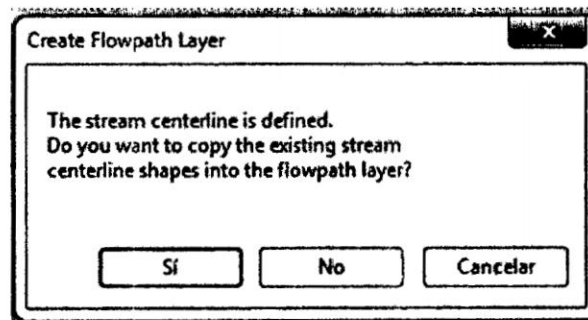


Figura 3.18: Trayectorias de flujo

Al crear esta capa de información *Ras Geometry/ Create Ras Layer/ FlowPatch Centerline*, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Flowpatch* a de digitalizarse en el sentido del flujo.

- La digitalización de las líneas ha de ser continua para cada uno de los tramos creados.
- Las líneas *Flowpath* nunca podrán cortarse entre sí.
- La capa de información *Flowpath* puede ser opcional.

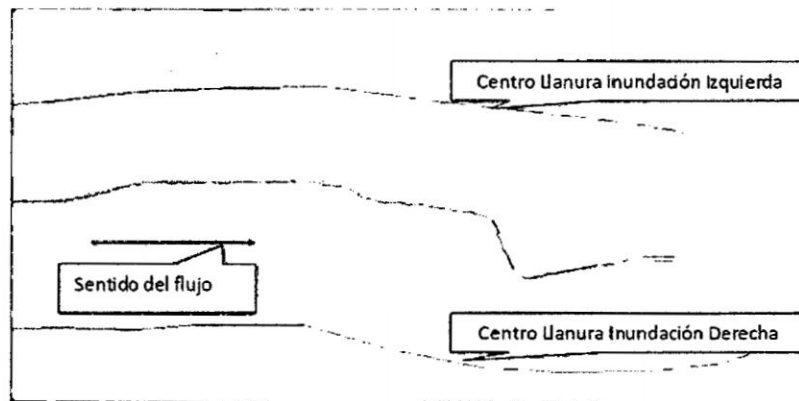


Figura 3.19: Líneas centrales de la trayectoria del flujo

Una vez han sido digitalizados los *Flowpatch* tendremos que identificar cada línea dentro de la capa de información, para ello en el menú *Hec-GeoRas* pulsaremos sobre el botón **Assing Line Type**. Activaremos la herramienta y situaremos el puntero del ratón sobre una de las líneas *Flowpatch*, tras clicar sobre la línea aparecerá la ventana *LineType* donde se habrá de indicar si la línea representa el canal (« *Chanel* »), llanura izquierda (« *LeftOverbank* ») ó llanura derecha (« *RightOverbank* »)

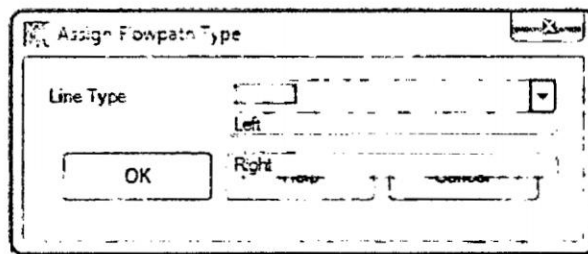


Figura 3.20: Tipo de línea

Cross-Sectional Cut Lines (Lineas De Corte Transversal): *Cross- Sections* ó secciones transversales es uno de los principales insumos para *Hec-Ras*. Las secciones transversales son representadas mediante líneas de corte, que son utilizadas para extraer los datos de elevación del terreno creando un número finito de perfiles del terreno

a lo largo de todo el canal. La intersección de las líneas de corte con otras capas de información de *Ras* como *Stream Centerlines*, *Banks Lines* ó *Flowpath* son utilizadas para calcular en *Hec-Ras* atributos tales como los *Banks Stations* (lugar geométrico de todos los puntos que separan las llanuras de inundación del canal), *downstreams reach lengths* (distancia entre secciones transversales) y *n de Mannings*. Por lo tanto la creación de un número adecuado de cortes transversales a de producir una buena representación del lecho del cauce y llanura aluvial. En la digitalización de las secciones transversales se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las líneas que representan las secciones transversales, han de ser en la medida de lo posible perpendiculares al flujo.
- Se digitalizaran las líneas de izquierda a derecha, en el sentido natural del flujo, de aguas arriba hacia aguas abajo, además, si existiese en el cauce un estructura, por ejemplo de tipo puente o alcantarilla, será una buena práctica asegurarse de definir una sección transversal aguas arriba y otra aguas debajo de dicha estructura .
- Las secciones transversales nunca podrán cortarse entre ellas.
- Las secciones transversales de forma individual solo podrán cortar con *Stream Centerline* una sola vez, al igual que el resto de capas creadas con anterioridad.
- Las secciones transversales nunca podrán exceder los límites del *MDT*.

Para crear líneas de corte, en primer lugar generaremos la capa de información ***XS cut lines*** clicando en ***Ras Geometry/ Create Ras Layer/ XS Cut Lines***, y posteriormente crearemos las secciones transversales utilizando la herramienta ***Sketch del editor***, asegurándonos que en ***Task*** esté señalada la opción ***Create New Feature*** y en ***Targert*** la opción ***XSCutLines***.

Existe la posibilidad de previsualizar las secciones creadas con la herramienta ***XS Plot*** y posteriormente pinchando sobre la sección deseada e indicando la capa correspondiente a las secciones y el *MDT*, bastaran para poder visualizar la sección en dos dimensiones como muestra la siguiente figura 5.16.

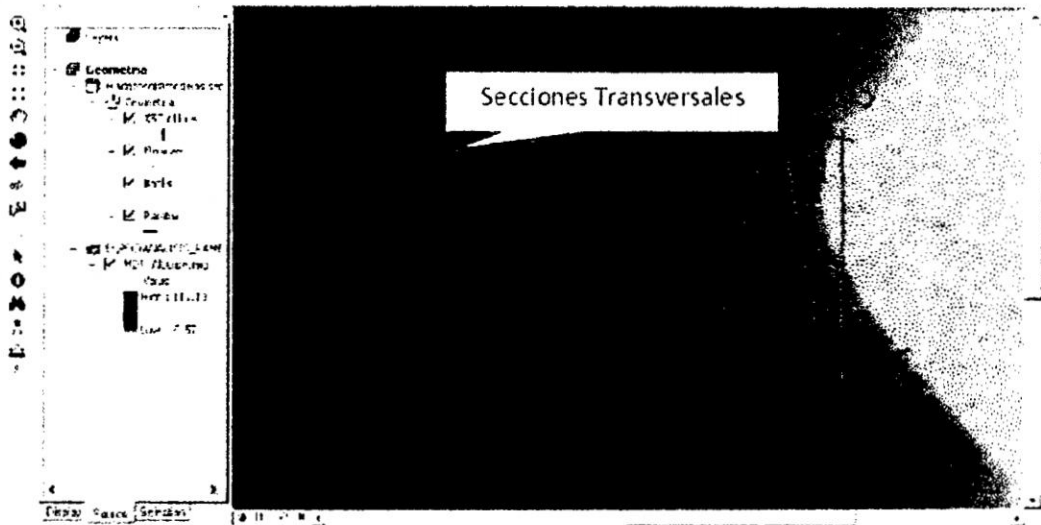


Figura 3.21: Líneas de corte transversal

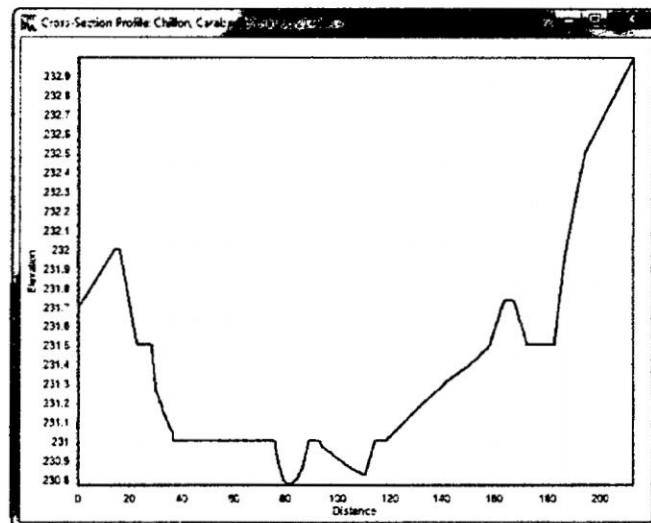


Figura 3.22: Perfil de las secciones transversales

Una vez estamos seguros de tener todas las secciones necesarias tanto en el cauce como en las zonas más singulares, hemos de generar los atributos, *Ras Geometry/XS Cut Line Attributes/ All*. De esta forma generamos todos los atributos de forma conjunta.

Land Use (Usos Del Suelo) Llegó el momento de definir los coeficientes de rozamiento (*Manning's*) para cada una de las secciones. En *Hec-GeoRas* se logra mediante la capa *Land Use*, dicha información se puede gestionar de dos maneras diferentes.

- Será creada la capa de información como de costumbre y editada para generar

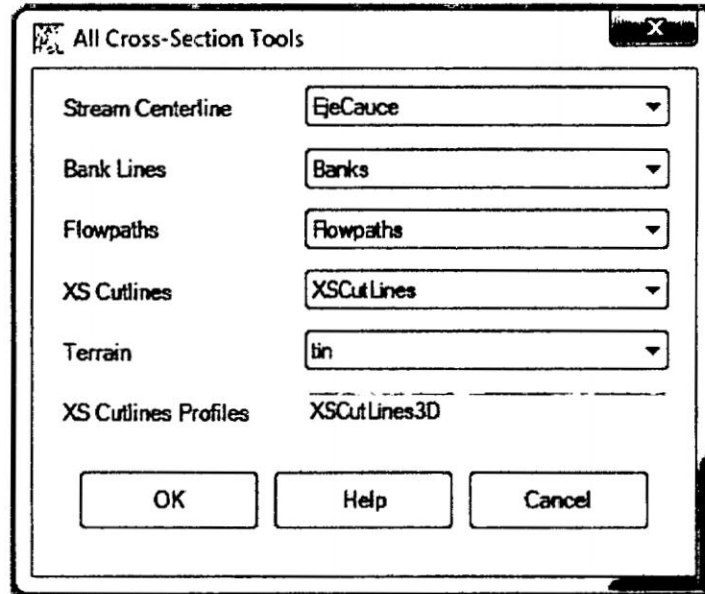


Figura 3.23: Atributos de las secciones de corte

tantos polígonos como *manning's* diferentes se pretenda considerar. Deberemos completar los atributos para cada uno de ellos. Es un proceso largo y de cierta dificultad en el que si no se es cuidadoso, corremos el riesgo de poder dejar zonas estériles de información y dar lugar a conflictos en *Hec-Ras*.

- La segunda opción necesita de información complementaria, es decir, de una base de datos referente a usos del suelo de la zona de estudio, que se deberá de incorporar al marco de trabajo que estemos manipulando.

Si el mecanismo, ya sea por una vía u otra, ha sido realizado de forma satisfactoria, lograremos tener una red de polígonos asociados a unos atributos usos del suelo.

Si la zona de estudio es pequeña, puede que no nos resulte complicado añadir columna nueva a la tabla de atributos y complementarla con los números de *Manning's* que corresponda, pero si por el contrario se trata de una zona más extensa ó con mucha variedad de tipos de suelo, este procedimiento puede resultar interminable.

Para solventar este problema *Hec-GeoRas* dispone de una herramienta capaz de generar una tabla resumen con una muestra de los tipos de suelo. Seleccionaremos ***Ras Geometry/ Manning's n Value/ Create LU-Mannung Table*** y aparecerá la siguiente ventana.

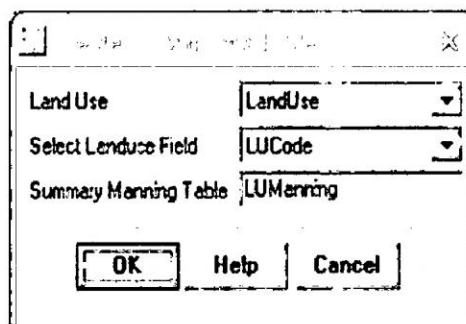


Figura 3.24: Creador lu-tabla Manning

Generar Archivo De Exportación RAS Después de haber verificado que todas las capas y tablas generadas en los pasos anteriores están seleccionadas, (ya que si no se ha trabajado en una única sesión, al cerrar *ArcMap* y volver a abrirlo, encontraremos el menú vacío), se hará clic en *Ras Geometry/ Layer Setup*. Una vez realizada esta operación seleccionaremos *Ras Geometry/ Extrac Gis Data*, en donde será obligatorio introducir la ruta y nombre del archivo a exportar.

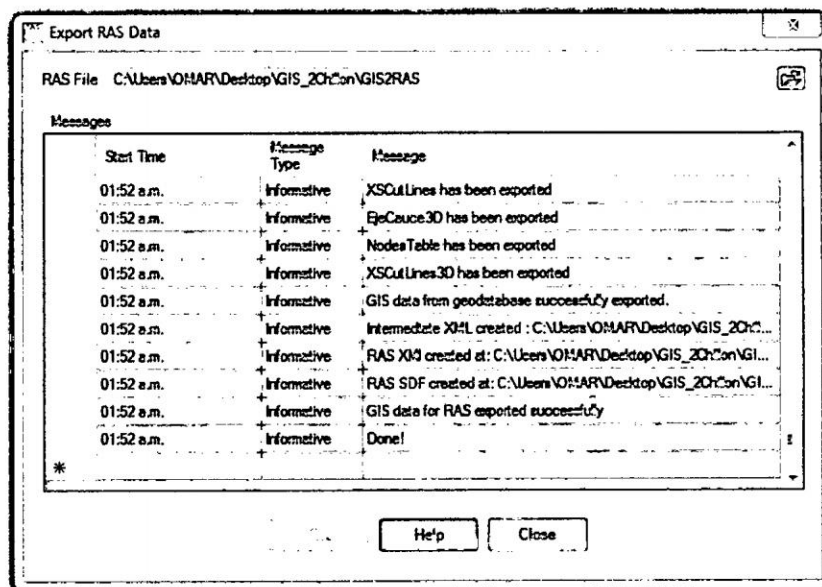


Figura 3.25: Exportar Gis Data

Nota: Se aconseja el uso de una única carpeta contenedora del archivo generado dentro del directorio en el que estemos trabajando, que será utilizada para agrupar todos los datos referentes al proyecto de análisis con *Hec-Ras*.

3.2.3.4. Simulación Con HEC-RAS

Se inicia ahora la fase de estudio hidráulico, utilizando para esta investigación el software *Hec-Ras 4.1.0*, elegido por ser capaz de realizar cálculos de perfiles de superficies de flujos de agua estables e inestables, y en su última versión cálculos relacionados con el transporte de sedimentos.

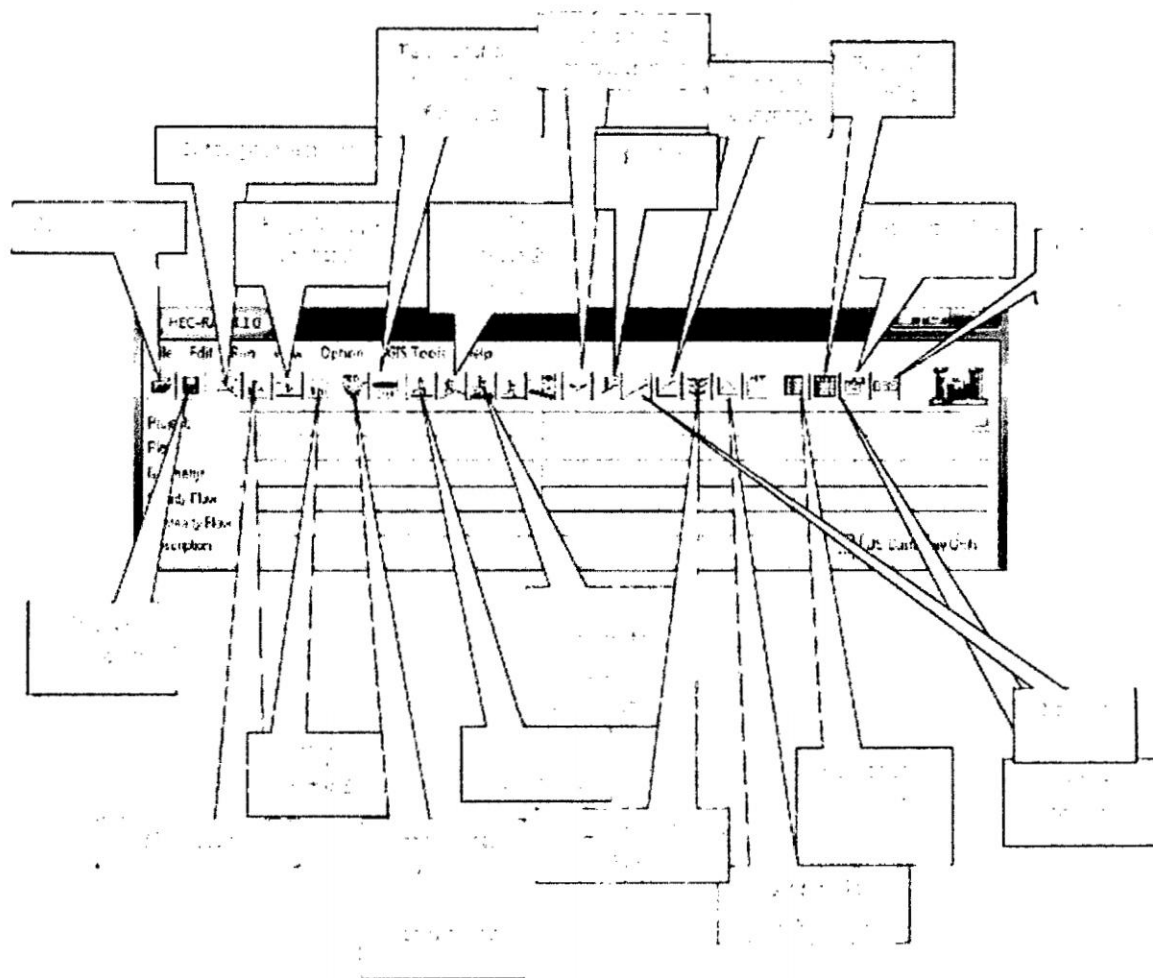


Figura 3.26: Interfaz HEC RAS (Garcia, 2012)

Interfaz HEC - RAS

Archivo Geométrico En primer lugar, deberemos crear un nuevo proyecto, **File/ New Project**, seguidamente accederemos al menú geométrico haciendo clic en, **Geometric Data**, en el menú principal. El archivo geométrico establece la conectividad

en el sistema de un río y es representado por un esquema en el que se han dibujado los cauces siguiendo el sentido positivo del flujo.

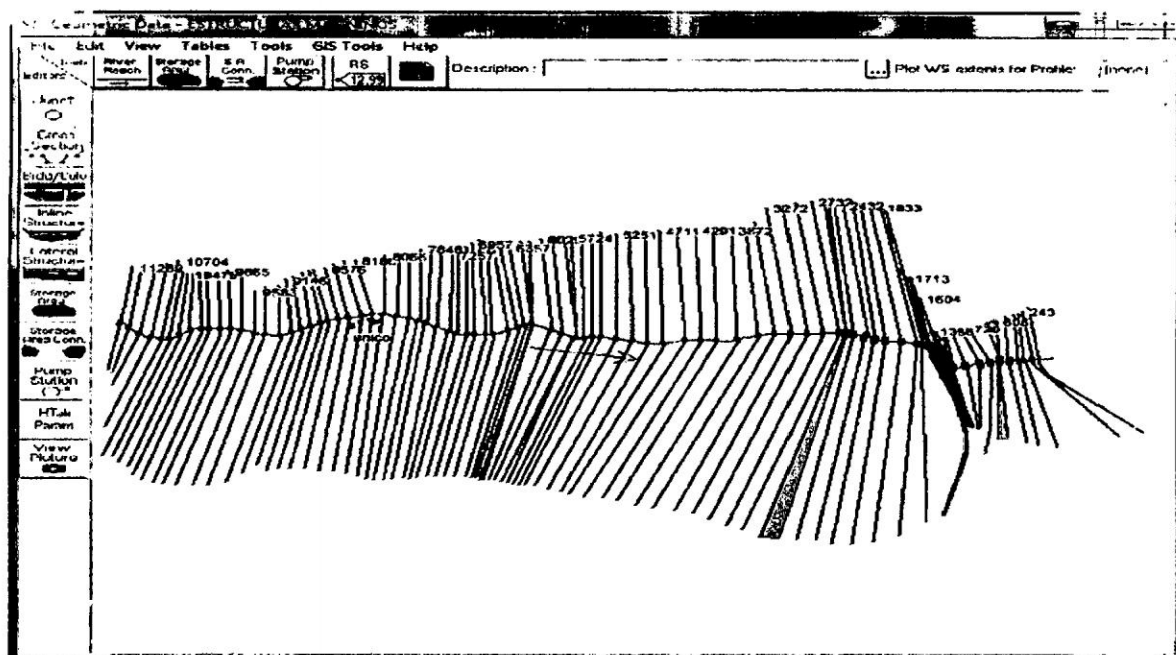


Figura 3.27: Archivo Geométrico

En el menú geométrico se podrá definir todas aquellas características referentes al contorno y estructuras del río como por ejemplo *junctions*, *cross sections*, *inline structure*, *lateral structure*, etc. de una forma sencilla.

Secciones Transversales Una vez completado la configuración espacial del cauce, se deben introducir las secciones transversales que definen las condiciones de borde del cauce. Para crear una nueva sección transversal se hará clic en **Option** eligiendo la opción **Add a new Cross Section**, a continuación se desplegará automáticamente una nueva ventana en la que será obligado dar nombre de referencia para la nueva sección que vamos a crear. Solo se podrá escribir números y punto o coma.

En la ventana referente a las características de la sección, primero nos encontramos con dos columnas, la primera columna, **Station**, mide la distancia desde la margen izquierda, en la segunda columna, **Elevation**, la cota del fondo del cauce en ese punto. En la misma ventana encontramos el apartado **Downstream Reach Lengths**, donde indicaremos las distancias desde esta sección a la inmediata siguiente aguas abajo, tanto desde **LOB**, distancia entre márgenes izquierdas, **ROB**, distancias entre márgenes

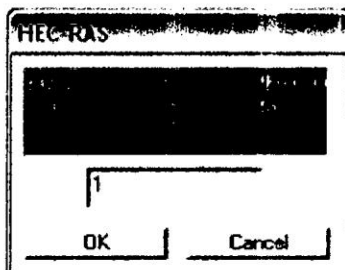


Figura 3.28: Nueva sección transversal

derechas, y **Channel**, distancia a lo largo del centro del canal. Podemos encontrar también otro apartado referente a la acotación del canal principal, **Main Channel Banks Stations**, estos puntos definen la parte de la sección que puede considerarse como canal principal, considerando el resto de la sección como llanura de inundación. A si mismo podremos asignar coeficientes de rugosidad de *Manning* a las paredes y centro del cauce, como también insertar los coeficientes de contracción y expansión según *HEC-RAS* en los apartados **Manning's n Values** y **Cont/Exp Coefficient (steady Flow)** respectivamente, como muestra en la figura 5.23.

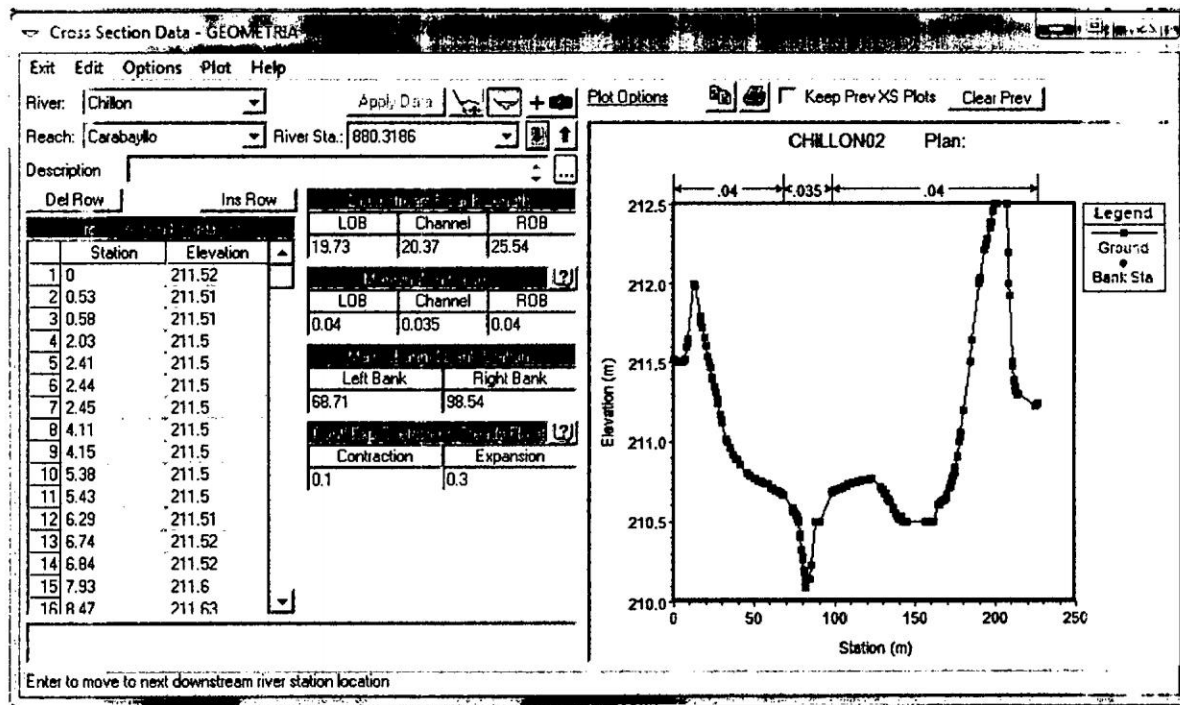


Figura 3.29: Editor de secciones transversales

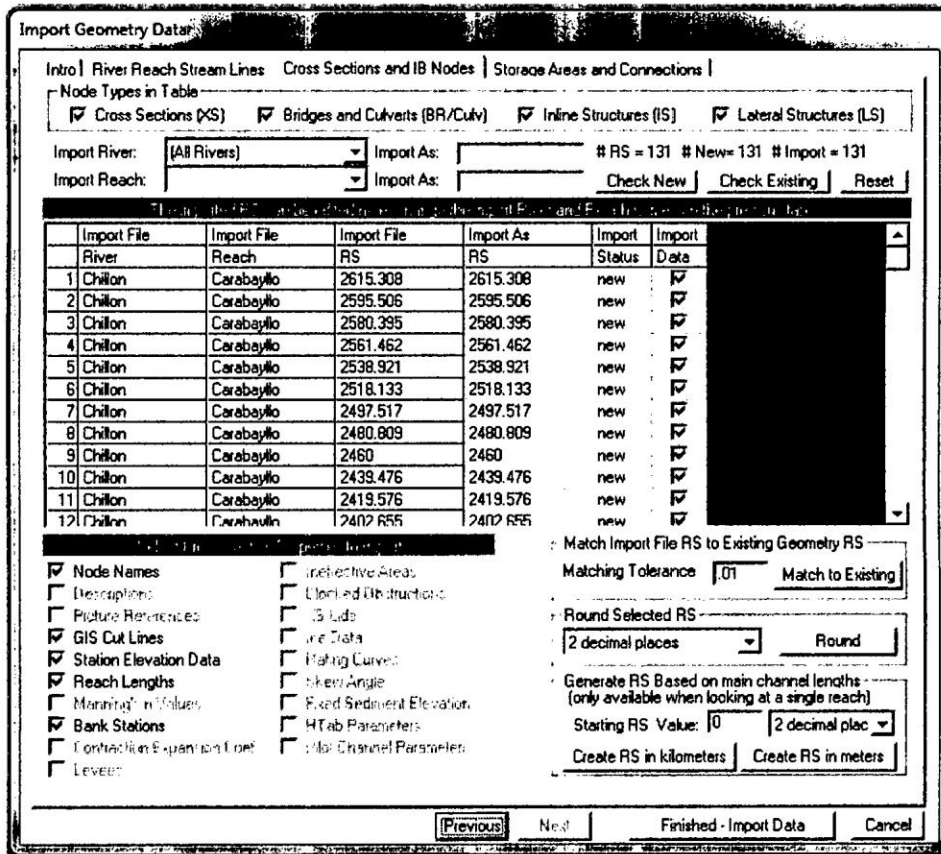


Figura 3.30: Coeficientes de contracción y expansión

Importar Datos Geométricos Podremos evitar introducir todos los datos geométricos mostrados hasta ahora de forma manual, facilitando la labor del modelador, gracias al trabajo previo desarrollado mediante el software *ArcGis* y su extensión para *Hec-Ras*, *Hec-GeoRas*.

Hay que prestar atención que la precisión de las imágenes geográficamente referenciadas utilizadas en la creación del modelo utilizado y de la pericia del modelador, podrán influir sobremanera en la misma proporción en las conclusiones que podamos vislumbrar una vez se haya ejecutado *Hec-Ras*.

Será necesario en primer lugar importar el archivo geométrico creado con *Hec-GeoRas*, dicho archivo podremos obtenerlo si hacemos clic en la interfaz *Hec-Ras* en *geometry data* sobre **File/ Import Geometry Data/ Gis format**. Seleccionando el archivo a importar, se despliega la ventana *Import Geometry Data*, compuesta por varias pestañas, la primera *Intro*, donde debemos seleccionar el sistema de unidades en el que vamos a trabajar, la segunda *River Reach Stream*, mostrará los tramos creados existiendo la posibilidad de seleccionar los tramos a nuestro antojo, la tercera pestaña

Cross Sections and IB Nodes incluye toda la información existente en las secciones y que deberemos de comprobar que todos sus elementos se encuentren seleccionados, de lo contrario habrá que regresar a *Arcmap* y generar un archivo nuevo.

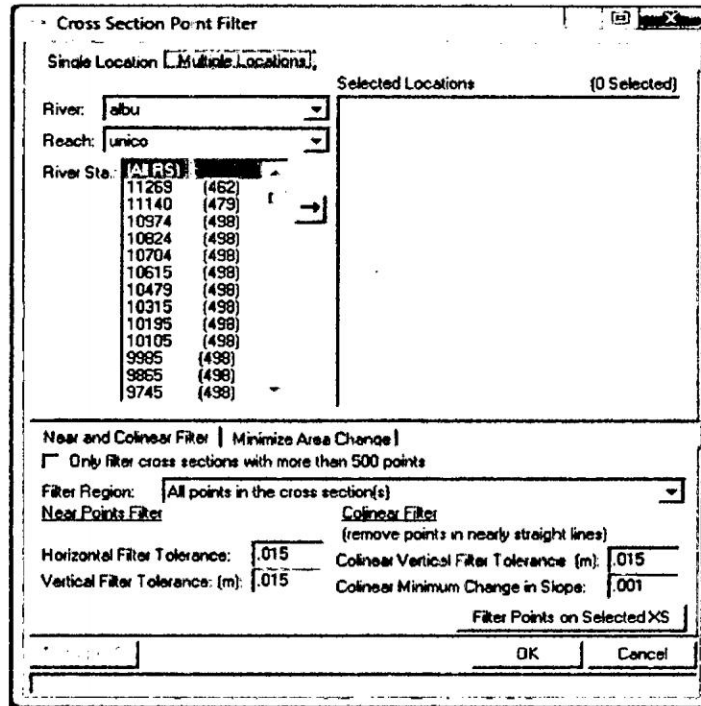


Figura 3.31: Editor para la importación de datos geométricos

Una vez nos hemos cerciorado que todas las pestañas están debidamente señaladas pulsaremos sobre ***Finished-Import Data***, y ya tendremos a disposición en *Hec-Ras* nuestro archivo geométrico debidamente editado.

Es necesario sobre las secciones creadas realizar un filtrado de puntos, ya que *Hec-Ras* tolera un máximo de 500 puntos por sección, cifra muy superior la obtenida con el modelo digital que logra extraer un punto por celda. Esta disminución selectiva de puntos se logra haciendo clic dentro del editor de geometría en ***Tools/ Cross Section Point Filter***, y dentro de la ventana añadiremos todas las secciones, indicando el número de puntos por sección a conservar.

Al pulsar sobre ***Filter Point Son Selected XS*** pondremos en marcha el algoritmo encargado de realizar el filtrado de puntos, que en ocasiones indicará un mayor número de puntos eliminados respecto de los conservados, no será motivo de peligro ó alarma puesto que el mismo algoritmo evitará que se produzca cualquier tipo de deformación en la sección.

Figure 3.32 shows the 'Edit Manning's n or k Values' dialog box. The 'River' is set to 'Ch. n', 'Reach' is 'Carabaylo', and 'All Regions' is selected. The 'Selected Area Edit Options' include 'Add Constant...', 'Multiply Factor...', 'Set Values...', 'Replace...', and 'Reduce to L.Ch.R...'. The table below shows the data for 18 river stations.

River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1 2615.308	n	0.04	0.035	0.04
2 2595.506	n	0.04	0.035	0.04
3 2590.395	n	0.04	0.035	0.04
4 2561.462	n	0.04	0.035	0.04
5 2538.921	n	0.04	0.035	0.04
6 2518.133	n	0.04	0.035	0.04
7 2497.517	n	0.04	0.035	0.04
8 2490.909	n	0.04	0.035	0.04
9 2460	n	0.04	0.035	0.04
10 2439.476	n	0.04	0.035	0.04
11 2419.576	n	0.04	0.035	0.04
12 2402.655	n	0.04	0.035	0.04
13 2384.228	n	0.04	0.035	0.04
14 2363.943	n	0.04	0.035	0.04
15 2340.118	n	0.04	0.035	0.04
16 2316.615	n	0.04	0.035	0.04
17 2300.396	n	0.04	0.035	0.04
18 2277.608	n	0.04	0.035	0.04

Figura 3.32: Filtrado de puntos en secciones transversales

También deberemos introducir los valores de *Manning*, es recomendable por una mayor operatividad de los datos, introducir estos de forma masiva en una única tabla, para ello en el menú *gemetric data* pulsaremos sobre *Tables/ Manning's n or k Values*.

Solo quedará visualizar las secciones y comprobar que todos los campos del editor geométrico están bien complementados.

Exportar Resultados Seleccionando en el menú principal de *Hec-Ras* en *File/ Export GID Data* podremos definir la dirección del archivo de salida y los perfiles de flujo a exportar. El usuario debe estar prevenido de que podrá variar la ruta, pero bajo ningún concepto alterar el nombre completo del archivo, pues hasta su más leve variación puede dar lugar a errores posteriores de lectura en *ArcMap*. Se generará el nuevo archivo pulsando en *Export Data*.

3.2.3.5. Post Proceso (Post-Ras)

Queda concluida la fase de Análisis en *Hec-Ras*, el formato visual de los resultados obtenidos podremos modificarlo de forma más atractiva por medio de las herramientas disponibles en la extensión *Hec-GeoRas* de *ArcGis*.

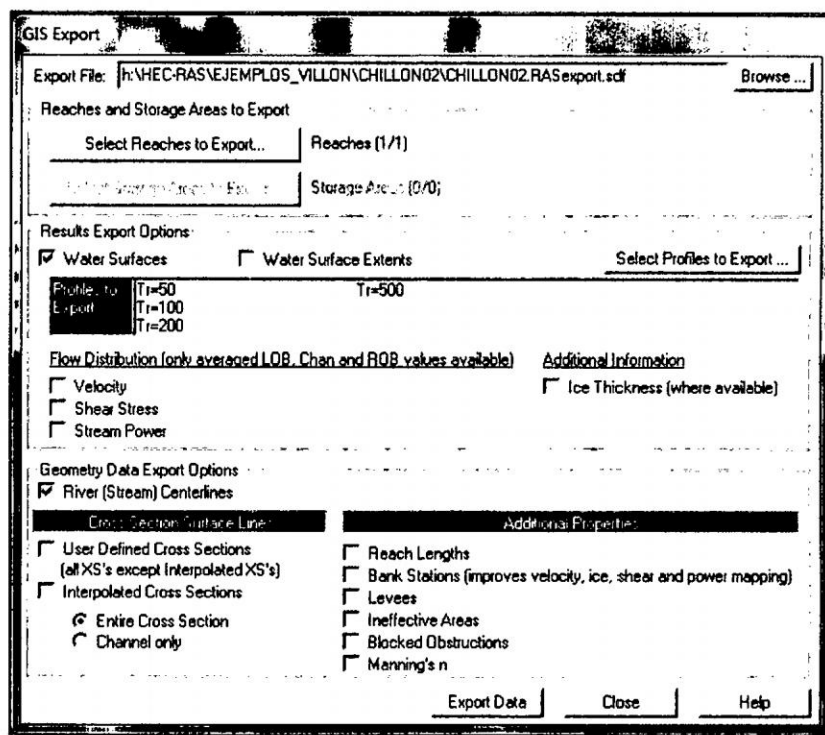


Figura 3.33: Editor de valores de Manning's o k

Pos procesamiento Podremos añadir al archivo inicial exportado desde *ArcGis* la nueva información generada en *Hec-Ras*, con la finalidad de agrupar toda la información en un mismo archivo. El primer paso será adecuar los formatos de *Hec-Ras* (*extensión .sdf*) para trabajar en *ArcGis* (*extensión .xml*).

Desde *Hec-GeoRAS* encontramos la herramienta *Import RAS SDF File* que hace referencia al Conversor de Formato, al hacer clic sobre él, en el primer campo, *Ras Output File*, deberemos introducir la ruta del archivo original, y por defecto la ruta del archivo de salida, *XML File*, aparecerá como la misma a excepción de la extensión. A continuación deberemos seleccionar en la barra de herramientas *Hec-GeoRAS RAS Mapping/ Layer Setup* y completar la información requerida para crear un nuevo marco de post proceso.

Indicaremos el nombre del análisis, la ruta donde se encuentre el archivo de exportación ya en formato *.xml*, seleccionaremos el terreno y la ruta de salida donde será almacenada la nueva base de datos generada.

Para utilizar el Nuevo archivo bastará con seleccionar *RAS Mapping/ Read RAS GIS Import File*. Podremos observar que un nuevo marco de datos es abierto, con la misma denominación que la utilizada en el análisis y al que habrá que añadir las

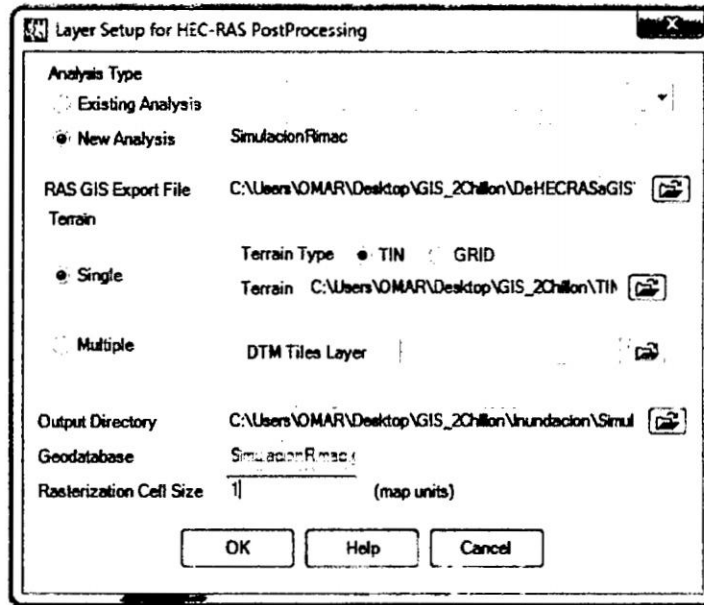


Figura 3.34: Exportar datos GIS

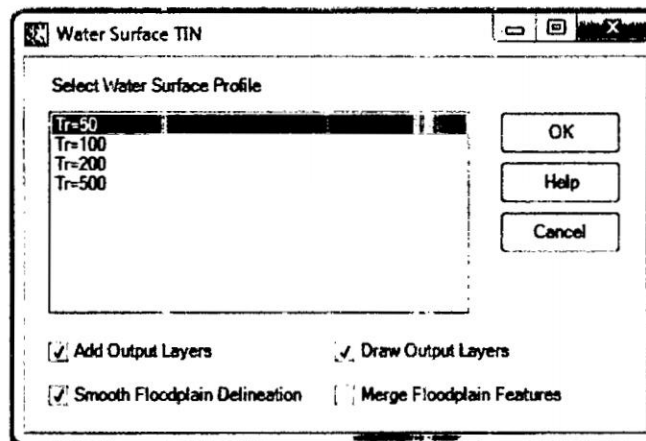


Figura 3.35: Capa de instalación Hec-Ras pos procesamiento

secciones transversales, el centro del cauce principal y el polígono de *inundación*.

Nuevas capas de información para los resultados Ras Para lograr tanto el polígono de inundación real como el archivo *Grid* de profundidades, en primer lugar hemos de generar el archivo *TIN* de *inundación*, para ello seleccionamos *RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Water Surface Generation*. Aparecerá una nueva ventana en la que habrá que señalar que perfiles de flujo queremos crear su superficie.

Se observa que se han creado tantos modelos de *inundación* como perfiles se ha seleccionado anteriormente. El siguiente paso es realizar la intersección entre el *modelo digital del terreno* y el modelo de *inundación* generado con anterioridad. Para ello

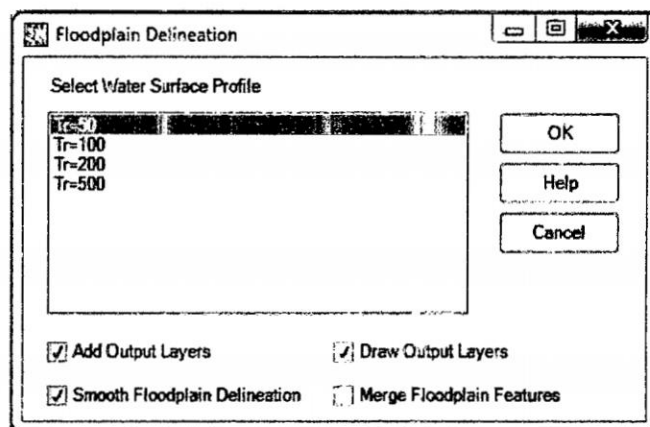


Figura 3.36: Agua superficial TIN

hemos de seleccionar *RAS Mapping/ Flood Plain Delineation/ GRID Intersection*.

3.3. Transito de Hidrogramas en Cauces de Rios

3.3.1. Introduccion

El tránsito de caudales (o flujo a lámina libre) es un procedimiento para determinar la magnitud del caudal, las elevaciones y sus tiempos, en un punto de un curso de agua, utilizando hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más puntos. Si el flujo es una creciente, el procedimiento se conoce específicamente como *tránsito de crecientes*. El *tránsito de inundación*, es el término utilizado para describir el movimiento de esa onda de creciente cuando atraviesa un cauce.

En el *tránsito de inundación*, tiene particular interés: la reducción del caudal pico mientras se dirige aguas abajo (atenuación), el tiempo máximo en el que el flujo de agua llega hacia los puntos de importancia, y la altura máxima de agua que se puede acumular en puntos de importancia y de qué manera cambia la hidrografía del lugar mientras se mueve aguas abajo.

Estos efectos están regidos por factores como: la geometría del canal principal y áreas aledañas; la rugosidad del canal y zonas contiguas, la existencia de áreas en las que se pueda acumular agua fuera del canal principal, y la forma del *hidrograma de creciente* cuando llega al cauce.

El *tránsito de inundación* debería ser continuado hasta un punto aguas abajo en donde los daños de inundación no signifiquen un riesgo para los seres humanos y los

daños a las construcciones sean limitados.

Para estudiar los efectos del *tránsito de crecidas* en ríos, y concretamente para la obtención de valores de niveles de agua y velocidades, son de utilidad los "*modelos hidráulicos*" en régimen permanente gradualmente variado y de fondo fijo (es decir no considerando el transporte de sedimentos en el lecho). Los mismos ofrecen una herramienta adecuada para un estudio en el cual la evolución temporal no es un factor de relevancia y el flujo en cuestión es eminentemente unidimensional. Este tipo de modelos se basa en esquemas numéricos de relativa sencillez, y de gran eficacia, pudiendo, de hecho, considerar cambios de régimen, cauces de geometrías completas y cálculos para determinación de llanuras de *inundación* como se requiere en el presente trabajo.

Supongamos que en el extremo de un canal seco arrojamamos un volumen de agua (Figura 6.1). El hidrograma generado (posición A del dibujo) será inicialmente más alto y de menor duración y, a medida que avanza, el mismo volumen pasará por los puntos B y C cada vez con un hidrograma más aplanado. Suponemos que no existe pérdida de volumen (por infiltración o evaporación), de modo que el área comprendida bajo los tres hidrogramas será idéntica. En este caso, el retardo será el correspondiente al recorrido del agua a lo largo del canal.

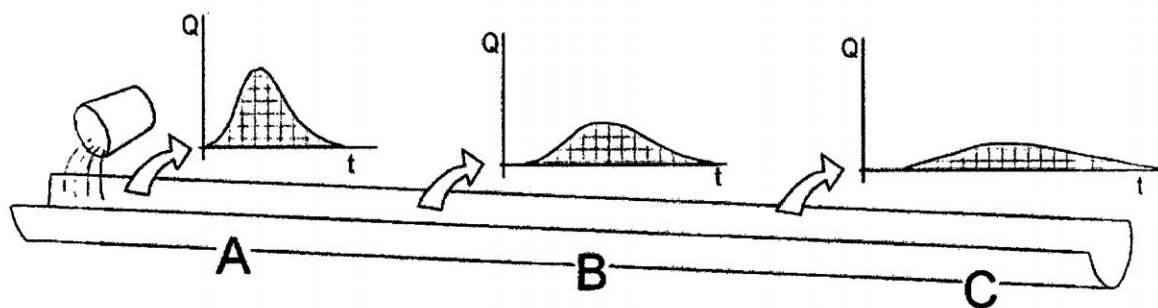


Figura 3.37: Efecto del tránsito a lo largo de un canal o un río

3.3.2. Ecuaciones Básicas para Tránsito de Crecientes

En los métodos de *tránsito* se utilizan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (*momentum*) para calcular las características del desplazamiento de la onda. Este par de ecuaciones conforman las así llamadas ecuaciones de Saint-Venant, escritas por primera vez por *Barré de Saint Venant (1871)* y que sirven para describir

tanto el régimen gradualmente variable, como el rápidamente variable. Estas ecuaciones forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, hiperbólicas, no lineales, del que no existe una solución analítica conocida. Por esto, y gracias al desarrollo de la informática en las últimas décadas, los esfuerzos han ido encaminados hacia la resolución mediante modelos numéricos.

Para el desarrollo de las ecuaciones de *Saint Venant* se efectúan las siguientes hipótesis:

- El flujo es unidimensional, es decir la profundidad y velocidad varían sólo en la dirección del escurrimiento.
- El flujo varía gradualmente en la canalización, lo que equivale a decir que la distribución de presiones a lo largo de la vertical es hidrostática, o que la aceleración vertical es pequeña.
- La pendiente media en el fondo del canal es pequeña.
- El fondo es fijo, de modo que los efectos de depositación y socavación son despreciables.
- Las pérdidas por fricción en el flujo no permanente son esencialmente iguales a las del flujo permanente; por lo tanto, relaciones como la ecuación de Manning pueden usarse para discutir los efectos friccionales.
- El fluido es incompresible y tiene una densidad constante a través del flujo.

A continuación se presentan las deducciones de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento desarrolladas por Chow (1994).

3.3.2.1. Ecuación de Continuidad

Se definen primero los términos a ser utilizados en la deducción de la ecuación de continuidad y en la de cantidad de movimiento. Los mismos están definidos sobre la canalización esquematizada que se presenta a continuación.

Tomando como base la canalización esquematizada de las figuras, para el volumen de control (*v.c.*) individualizado, la ecuación de continuidad en régimen impermanente puede escribirse como:

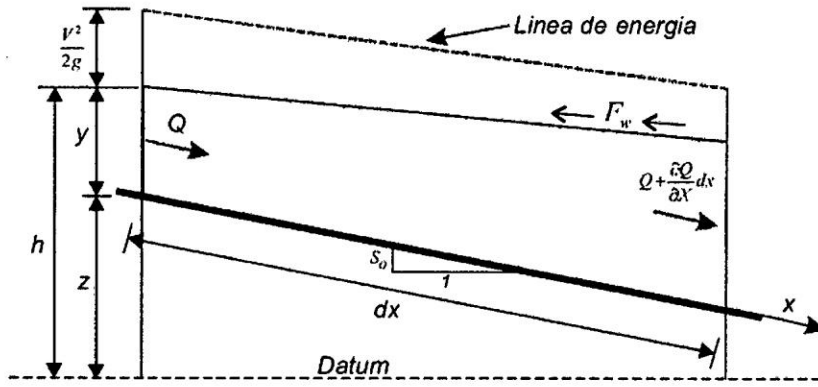


Figura 3.38: Definición de términos sobre el perfil longitudinal de la canalización

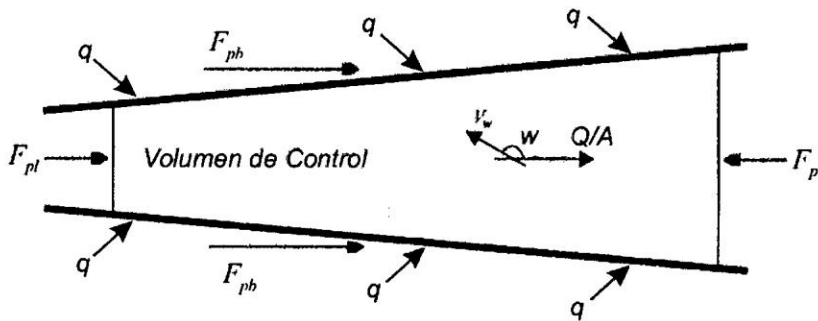


Figura 3.39: Definición de términos sobre la vista en planta de la canalización

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c} \rho dV + \iint_{s.c} \rho \vec{V} \cdot \vec{dA} = 0 \quad (3.1)$$

Considerando que al volumen de control de longitud dx , entra un caudal Q a través de la superficie de control ($s.c.$) de aguas arriba y un caudal lateral uniformemente distribuido q , entonces:

$$\iint_{\text{entrada}} \rho \vec{V} \cdot \vec{dA} = \rho(Q + qdx) \quad (3.2)$$

Por otra parte, en el extremo de aguas abajo sale un caudal a través de la superficie de control:

$$\iint_{\text{salida}} \rho \vec{V} \cdot \vec{dA} = \rho \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) \quad (3.3)$$

La variación de masa en el interior del volumen de control puede expresarse como:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c} \rho dV = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} \quad (3.4)$$

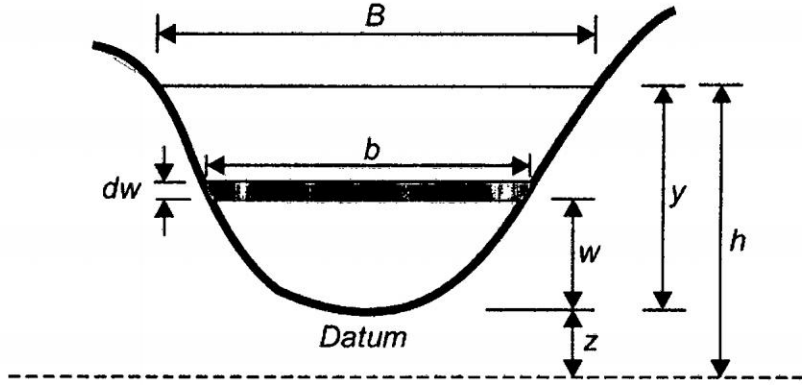


Figura 3.40: Definición de términos sobre la sección transversal de la canalización

Donde se usa la derivada parcial puesto que se está considerando un volumen de control fijo (aunque el nivel del agua puede variar en su interior). Suponiendo que la densidad del fluido es constante, reemplazando en la ecuación (6.1) y reordenando, se llega a:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \tag{3.5}$$

En donde:

Q : es el caudal.

x : distancia longitudinal a lo largo del canal o río.

A : área de la sección transversal al flujo.

t : tiempo.

q : flujo lateral de entrada o salida por unidad de longitud del canal.

Esta ecuación es válida tanto para un canal prismático como para uno no prismático. Si se desprecia el caudal de aporte y se considera el flujo por unidad de ancho, entonces la ecuación de Saint-Venant queda:

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \tag{3.6}$$

Donde el primer término representa la tasa de cambio de la profundidad, y el segundo y el tercer término están relacionados con el almacenamiento en prisma y en cuña respectivamente.

3.3.2.2. Ecuación de Cantidad de Movimiento

Usando el teorema del *transporte de Reynolds*, la *segunda ley de Newton* puede expresarse como:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \iiint_{v.c} \vec{V} \rho dV + \iint_{s.c} \vec{V} \rho \circ \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad (3.7)$$

Esta ecuación establece que la suma de las fuerzas aplicadas al volumen de control es igual a la tasa de variación de cantidad de movimiento a través de las paredes del volumen de control.

Las fuerzas que actúan sobre el volumen de control, en la dirección del movimiento (*eje x*) corresponden a las de gravedad F_g , de fricción F_f , de contracción o expansión F_e debido a los cambios abruptos de la sección transversal, del viento sobre la superficie libre F_w y de presión F_p de modo que:

$$\sum \vec{F} = F_g + F_f + F_e + F_w + F_p \quad (3.8)$$

Para el volumen de control señalado en la figura 6.2, considerando que la pendiente de canalización, S_o , es pequeña, entonces: **La fuerza de gravedad** se escribe como:

$$F_g = \rho.g.A.dx.sen\theta = \rho.g.A.S_o.dx \quad (3.9)$$

La fuerza de fricción, debido al esfuerzo de corte en el fondo y las paredes, se expresa en función de la pendiente de la línea de energía, S_f , de modo que:

$$F_f = -\rho.g.A.S_f.dx \quad (3.10)$$

La fuerza debida a las expansiones o contracciones bruscas puede obtenerse en función de la pendiente de energía, S_e , que se obtiene para la pérdida singular, es decir:

$$F_e = -\rho.g.A.S_e.dx \quad (3.11)$$

Donde, si K_e es el coeficiente de pérdida singular, entonces:

$$S_e = \frac{K_e}{2.g} \frac{\partial(Q/A)^2}{\partial x} \quad (3.12)$$

La Fuerza cortante por el viento (F_w) se debe a la resistencia de fricción entre el viento y la superficie libre del agua.

$$F_w = \tau_w.B.dx \quad (3.13)$$

El esfuerzo cortante del viento está dado por

$$\tau_w = \frac{-\rho.C_f |V_r|.V_r}{2} \quad (3.14)$$

V_r = velocidad relativa del fluido en la frontera

$$V_r = \frac{Q}{A} - V_w.\cos\omega \quad (3.15)$$

Entonces la fuerza del viento resulta:

$$F_w = \frac{-\rho.C_f |V_r|.V_r.B.dx}{2} \quad (3.16)$$

En la figura 6.3 se observa que la fuerza de presión no equilibrada es el resultado de las fuerzas de presión que actúan en la sección de entrada (F_{pe}) y salida (F_{ps}) del volumen de control y de la fuerza de presión que se ejerce sobre las paredes (F_{pp}), es decir:

$$F_p = F_{pe} + F_{ps} + F_{pp} \quad (3.17)$$

Integrando resulta la fuerza hidrostática del extremo izquierdo:

$$F_{pe} = \int_0^y \rho.g.(y-w).b.dw \quad (3.18)$$

La fuerza hidrostática en el extremo derecho del volumen de control es:

$$F_{ps} = \left(F_{pe} + \frac{\partial F_{pe}}{\partial x}.dx \right) \quad (3.19)$$

Donde:

$$\frac{\partial F_{pe}}{\partial x} = \rho.g.A \frac{\partial y}{\partial x} + \int_0^y \rho.g.(y-w) \frac{\partial b}{\partial x} dw \quad (3.20)$$

La fuerza debida a los taludes del canal se relaciona con la tasa de cambio del ancho del mismo ($\partial b/\partial x$) a través del elemento dx .

$$F_{pp} = \left[\int_0^y \rho.g.(y-w) \frac{\partial b}{\partial x} dw \right] dx \quad (3.21)$$

Reemplazando los términos de las tres fuerzas en la ecuación resulta:

$$F_p = -\rho.g.A \frac{\partial y}{\partial x} dx \quad (3.22)$$

Finalmente la suma de todas las fuerzas actuantes resulta:

$$\sum F = \rho.g.A.S_o.dx - \rho.g.A.S_f.dx - \rho.g.A.S_e.dx - W_f.B.\rho.dx - \rho.g.A \frac{\partial y}{\partial x} dx \quad (3.23)$$

El flujo neto de salida de cantidad de movimiento a través de las paredes del volumen de control se expresa como:

$$\iint_{s.c.} \vec{V} \rho \vec{V} \circ \vec{dA} = \rho \left[\beta \cdot v_x - \frac{\partial(\beta V Q)}{\partial x} \right] dx \quad (3.24)$$

donde β es el coeficiente de Boussinesq y v_x es la componente de la velocidad, en la dirección del eje x, del caudal lateral q . La variación de cantidad de movimiento en el interior del volumen de control se expresa como:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c} \vec{V} \rho dV = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} dx \quad (3.25)$$

Sustituyendo en la ecuación (6.7), dividiendo por ρdx , reemplazando V como Q/A y reordenando, se llega a:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0 \quad (3.26)$$

h = altura de la superficie de agua.

x = distancia longitudinal a lo largo del canal o río.

t = tiempo.

A = área activa de la sección transversal de flujo.

q = flujo de entrada o salida lateral por unidad de longitud a lo largo del canal (entrada es con signo positivo y salida es con signo negativo).

β = coeficiente de Boussinesq de movimiento para la distribución de velocidad.

g = aceleración de la gravedad.

S_f = pendiente de fricción.

S_o = pendiente del fondo del canal.

S_e = pendiente de contracción expansión.

B = ancho del canal de la superficie de agua.

W_f = fuerza cortante del viento.

v_x = velocidad del flujo lateral en la dirección principal del flujo del canal.

La profundidad h puede reemplazarse por la elevación h señalada en el figura 6.2.

$$h = y + z \quad (3.27)$$

Donde z es la elevación del fondo del canal con respecto a un plano de referencia. Derivando la ecuación 27 con respecto a la distancia longitudinal a lo largo del canal x es:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \quad (3.28)$$

pero $\frac{\partial z}{\partial x} = -S_o$, luego

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} - S_o \quad (3.29)$$

De esta manera la ecuación de cantidad de movimiento puede escribirse también como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0 \quad (3.30)$$

Si se desprecian las pérdidas de energía, el flujo lateral y el efecto del viento; entonces la ecuación de cantidad de movimiento quedará:

$$-\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} + S_o = S_f \quad (3.31)$$

En resumen la ecuación de cantidad de movimiento contiene los términos de los procesos físicos que controlan el flujo. Estos son los términos de:

Aceleración local: que describe el cambio de cantidad de movimiento debido a cambios de la velocidad con respecto al tiempo. Representan la variación de la velocidad con el tiempo en un punto fijo. Son los responsables del carácter no permanente del flujo.

Aceleración convectiva: que describe el cambio de movimiento debido a cambios espaciales de la velocidad $\left(\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right)$ Representan el efecto del transporte con el flujo del gradiente de la velocidad. Son los responsables de la formación de vórtices, y su efecto es más importante cuanto mayor sea el número de Reynolds (relación entre fuerzas viscosas y fuerzas de inercia), como se desprende de un análisis adimensional de las ecuaciones. En presencia de altas velocidades o pequeña viscosidad, y desde el punto de vista matemático, son los responsables de la no-linealidad del sistema de ecuaciones.

La suma de la aceleración local y la convectiva es la derivada material, que representa la aceleración total de las partículas del fluido.

Fuerza de presión: proporcional a la variación de la profundidad del agua en la $\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)$. Se obtiene considerando la hipótesis de presión hidrostática.

Fuerza de la gravedad: proporcional a la pendiente del lecho S_o , depende sólo de la geometría del problema. La pendiente del fondo es la principal responsable de la no homogeneidad de las ecuaciones, y su presencia aumenta la complejidad de los esquemas numéricos de resolución de forma considerable.

Fuerza de fricción: proporcional a la pendiente de fricción S_f . Tienen un efecto no lineal de retardo del flujo. La ecuación (6.31) escrita en términos de los tipos de flujo (Henderson, 1966) plantea:

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

Flujo Permanente Uniforme	_____		
Flujo Permanente no Uniforme	_____		
Flujo no Permanente no Uniforme	_____		

Figura 3.41: ecuación de cantidad de movimiento en términos del tipo de flujo (Henderson, 1966).

En este punto se han desarrollado y establecido dos ecuaciones básicas para describir el tránsito de una crecida: la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento en régimen no permanente. Como ya se dijo, estas ecuaciones forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, hiperbólicas, no lineales, del que no existe una solución analítica conocida.

La resolución de este sistema se realiza mediante modelos numéricos. A continuación se presenta en primer lugar el análisis de las características matemáticas de este sistema de ecuaciones y posteriormente se establecen distintos modelos numéricos de solución.

3.3.3. Clasificación de los Métodos de Solución

A continuación se realiza un repaso a las opciones disponibles en la actualidad para llevar a cabo una simulación mediante modelación matemática del tránsito de caudales.

Estas opciones están en continuo desarrollo y en este apartado se describe una descripción del desarrollo de la modelación matemática que se ha producido en los

últimos años y que ha sido posible gracias a la creciente capacidad de los ordenadores para procesar datos de una manera cada vez más rápida.

3.3.4. Modelos unidimensionales

3.3.4.1. Modelos 1D en régimen permanente

Estos modelos permiten el cálculo en régimen gradualmente variado y fondo fijo. Están hoy en día en plena vigencia ya que para estimación de cotas de lámina de agua en caso de avenida en las que el factor tiempo no es importante son perfectamente válidos.

Para el análisis de la inundación que crearía la rotura de una presa estos modelos no son suficientes ya que no tienen en cuenta el factor tiempo, imprescindible para poder prever afecciones de la onda de rotura a poblaciones, etc.

Se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces, pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación, singularidades como puentes, azudes, pasos bajo vía, etc.

El esquema numérico más utilizado es el denominado paso a paso. Para la gran mayoría de simulaciones fluviales que se llevan a cabo hoy en día se utilizan este tipo de modelos ya que para delimitación de *zonas inundables*, dimensionamiento de infraestructuras como puentes, etc. son perfectamente válidos.

3.3.4.2. Modelos 1D en régimen variable

Para simular el régimen variable, necesario por ejemplo para la simulación de la rotura de una presa, hay que solucionar las ecuaciones de *Saint-Venant*. Los modelos existentes se dividen en dos tipos en función de si resuelven las ecuaciones de *Saint-Venant* completas o si realizan alguna simplificación.

3.3.4.3. Métodos de solución para la ecuaciones de Saint Venant

Método de las Características: Puede servir para canales prismáticos, pero su aplicación para canales no prismáticos y de geometría irregular es de una enorme complejidad y resultados poco fiables, por lo que no son adecuados, ni han sido utilizados, para cauces fluviales.

Diferencias finitas explícitas: Dentro de este grupo encontramos los siguientes esquemas numéricos:

- Difusivo o esquema de Lax
- Leap-Frog
- McCormack
- Lamba

Los esquemas explícitos presentan el inconveniente de requerir pasos de tiempo muy pequeños durante el cálculo para que resulten estables y por tanto son caros computacionalmente.

Diferencias finitas implícitas: Esquemas destacados:

- Preissmann
- Beam and Warming
- VasilievMcCormack

En general los esquemas implícitos son más eficientes computacionalmente que los explícitos, aunque esta ventaja deja serlo en cuanto se ha de modelizar flujo en régimen rápidamente variable (p.e rotura de una presa) ya que entonces el paso de tiempo de cálculo debe reducirse hasta valores similares a los de los esquemas explícitos para ser capaces de representar discontinuidades.

La mayoría de modelos comerciales que se usan en la actualidad resuelven el esquema de Preissmann o alguna variante de éste. Algunos de estos modelos son: HEC-RAS, MIKE-11, SOBEK y DAMBRK.

Elementos finitos: Este método da óptimos resultados para ecuaciones elípticas o parabólicas, para las ecuaciones de *Saint-Venant* que forman un sistema hiperbólico, el método de los *elementos finitos* requiera mucha complejidad y mucho tiempo de cálculo para llegar a unos resultados que no mejoran considerablemente los obtenidos mediante las *diferencias finitas*.

Todos los esquemas de resolución de las ecuaciones completas de *Saint- Venant* presentados tienen problemas de estabilidad cuando el flujo es rápidamente variable.

Este problema puede abordarse de dos maneras: métodos de aislamiento o métodos directos.

- **Métodos de aislamiento:** Se trata de aislar la discontinuidad y tratarla como un contorno, en la práctica es inviable porque no conocemos donde estará la discontinuidad.
- **Métodos directos:** Se dividen en dos grupos, los que añaden un término artificial en las ecuaciones para aumentar la difusión (viscosidad artificial) y por tanto suavizan la discontinuidad con la consecuente pérdida de rigor en la solución y los que no añaden ningún término artificial. Los métodos que no añaden viscosidad artificial son claramente deseables. Dentro de estos métodos se encuentra el *Local Partial Inertia (LPI)* , que añade un término a las ecuaciones para reducir los términos de inercia cuando el número de Froude se acerca a la unidad (por tanto habrá un cambio de régimen y una posible discontinuidad).

3.3.4.4. Métodos simplificados para la solución de las ecuaciones de Saint Venant

Los métodos de resolución que utilizan las ecuaciones de *Saint Venant* simplificadas entendiéndose como tales aquellos que prescinden de alguno de los términos de la ecuación del movimiento son básicamente:

Métodos hidrológicos: Desprecian completamente la *ecuación del movimiento*. Se destaca el método de *Muskingum* y el de *Muskingum-Cunge*.

Fue desarrollado por *McCarthy* en 1969, y aplicado al río *Muskingum*. El método se basa en la *ecuación de la continuidad* y de almacenamiento que pondera el efecto de la escorrentía de entrada y de salida del tramo, se considera que la escorrentía y el almacenamiento del tramo están relacionados con el nivel a lo largo del tramo. Utiliza dos parámetros K y x ; K es una constante de almacenamiento, cercano al tiempo de viaje de la onda en el tramo y x es un factor de ponderación del almacenamiento debido al flujo que entra y que sale.

Muskingum-Cunge básicamente relaciona matemáticamente los valores de K y x en función de las características físicas del río. El tránsito agregado de crecientes se usa comúnmente para manejar relaciones caudal-almacenamiento variable. Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un canal de un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma. Durante el avance de la onda de creciente, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, siendo un almacenamiento de cuña. Durante la recesión, el caudal de salida es mayor que el caudal de entrada resultando una cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento por prisma que está formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del canal prismático.

Estos esquemas se usan en modelos para el cálculo de caudales en función de *precipitaciones* en diferentes cuencas donde se hace necesaria la *propagación de hidrogramas* tales como *HEC-HMS*.

Método de la onda cinemática: Sólo considera el término de fricción y la pendiente de la solera en la ecuación del movimiento. Los modelos cinemáticos suponen que el caudal es siempre igual al caudal normal, por lo tanto el caudal es una función univariada del tirante (French, 1993). Estos modelos desprecian los términos de inercia y presión comparados con los términos de gravedad y fricción. Es decir, la onda viaja sin atenuación, pero con un cambio de forma en la velocidad de onda.

$$g(S_o - S_f) = 0$$

Método de la onda difusiva: Incluye además respecto al método de la *onda cinemática* los términos de presión.

$$V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (3.32)$$

Método de la onda dinámica cuasi-permanente: Tan solo desprecia la aceleración local. Estos métodos simplificados tenían sentido cuando la capacidad y velocidad de los ordenadores era limitada, pero por lo general lo han ido perdiendo a lo largo del tiempo, tan solo los métodos de *Muskingum* y la *onda cinemática* siguen utilizándose ampliamente en estudios *hidrológicos*.

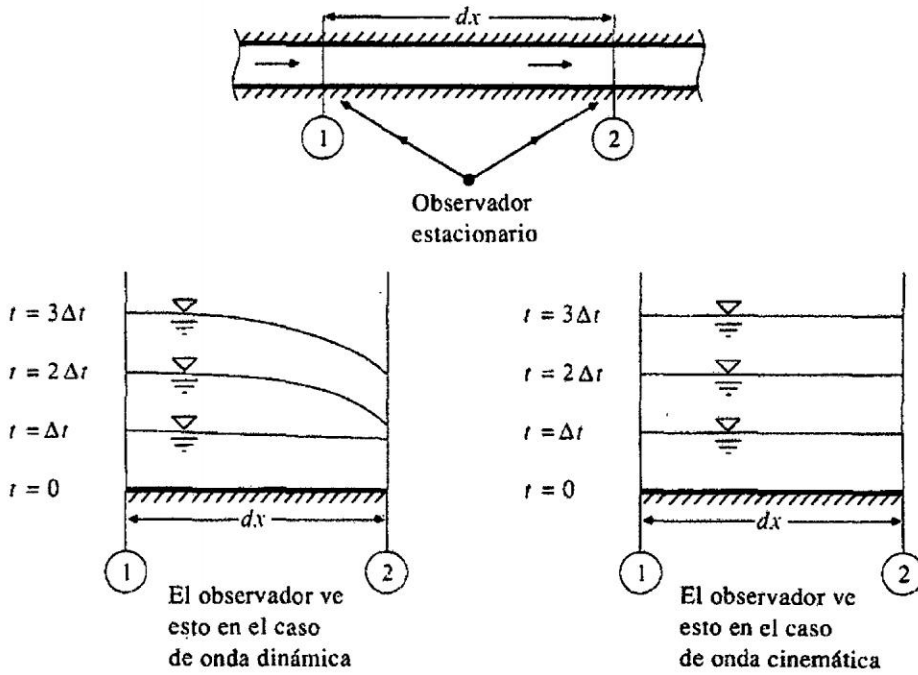


Figura 3.42: Diferencias entre las aproximaciones por onda dinámica y por onda cinemática, según los aprecia un observador fijo en la orilla (Chow, 1994)

3.3.5. Modelos cuasi-bidimensionales

Para describir muchos fenómenos naturales como puede ser la *inundación* de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua, el flujo en un cauce ancho e irregular, etc., la aproximación unidimensional deja de ser adecuada y por ello se desarrollaron primero los esquemas *cuasi-bidimensionales* y luego los esquemas *bidimensionales* propiamente dichos.

En los esquemas *cuasi-bidimensionales* se aplican las ecuaciones de *Saint-Venant unidimensionales* en un cauce principal, mientras que la llanura de *inundación* se representa mediante un recinto de almacenamiento de agua conectado al cauce.

3.3.6. Modelos bidimensionales

Se pueden dividir en esquemas clásicos y esquemas de alta resolución. Los esquemas clásicos se han utilizado con buenos resultados para flujo gradualmente variable, pero no sirven en general para rápidamente variable.

Igual que en el caso *unidimensional*, para la resolución de las ecuaciones de *Saint Venant* en dos dimensiones se han utilizado: el método de las *características*, métodos en

diferencias finitas y métodos en *elementos finitos*, pero en el caso *bidimensional* además se ha utilizado la técnica de discretización en *volúmenes finitos*. Se ha comprobado que la técnica de los *volúmenes finitos* es especialmente adecuada para estos casos.

Los esquemas *bidimensionales* de alta resolución se encuentran todavía en pleno desarrollo y no existen modelos comerciales que puedan utilizarse de forma generalizada, reduciéndose los modelos existentes a universidades u otros centros de investigación.

3.3.7. Elección de un Modelo

Dada una tan amplia gama de técnicas de *tránsito hidráulico e hidrológico*, seleccionar el método apropiado para cada problema específico no está definido claramente. Sin embargo, pueden usarse ciertos criterios generales para la selección de un método apropiado.

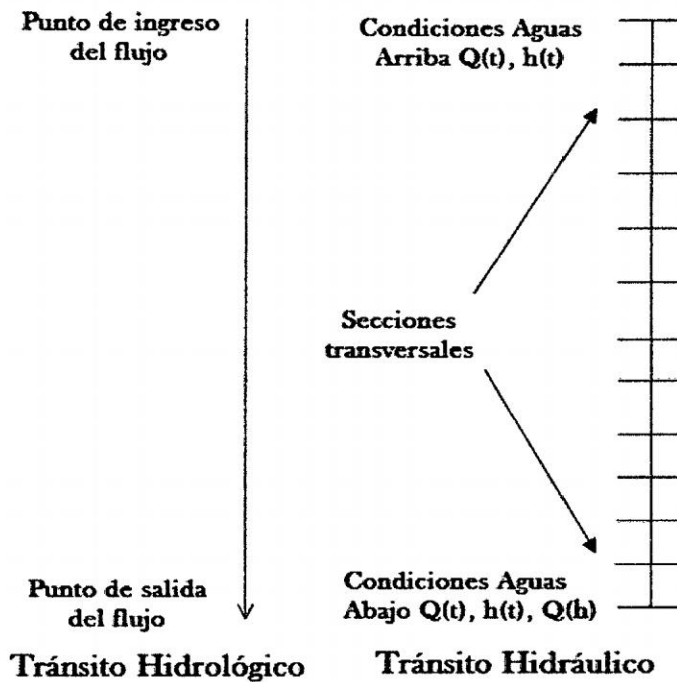


Figura 3.43: Modelos de tránsito (Linsley, 1977)

3.3.7.1. Método de Tránsito Hidrológico

Típicamente en el análisis de *precipitación-escorrentía*, los procedimientos son utilizados en la base de un aporte de rama por rama desde corriente arriba a río abajo. En general, el objetivo principal del estudio es calcular hidrogramas de descarga en varias

posiciones. En ausencia de efectos de remanso significativos, los *modelos hidrológicos* ofrecen las ventajas de simplicidad, facilidad de empleo, y la eficacia computacional.

También, la exactitud de los *métodos hidrológicos* en *hidrogramas de descargas* puede considerarse que están dentro de la gama de valores aceptables. Debería recordarse, sin embargo, que solo la ausencia de remanso significativo no siempre justifica el empleo de un *método hidrológico*. Hay muchos otros factores que deben ser considerados para decidir si un *modelo hidrológico* será apropiado, o si es necesario usar un *modelo hidráulico* más detallado.

3.3.7.2. Método de Tránsito Hidráulico

Las ecuaciones de flujo no permanentes completas tienen la capacidad de simular la gama más amplia de situaciones de flujo y características de canal. Los *modelos hidráulicos*, en general, tienen una base más física ya que ellos sólo tienen un parámetro (el coeficiente de rugosidad) para estimar o calibrar. Los coeficientes de rugosidad pueden ser estimados con algún grado de exactitud de la inspección del cauce, que hace que los *métodos hidráulicos* sean más aplicables a situaciones donde no existe la posibilidad de calibración con datos observados.

Además, se puede analizar algunos factores importantes para evaluar el método más apropiado para una situación.

A continuación se describen los principales factores a considerar en el proceso de selección recomendada por U.S. Army Corps of Engineers (*USACE, 1994*):

Efecto de remanso: Los efectos de remanso pueden ser producidos por fluctuaciones de marea, entradas significativas de tributarios, presas, puentes, acantarillas, y Constricciones de canal. Una onda de escurrimiento que está sujetado a las influencias de remanso será atenuado y retrasado en el tiempo. De los *métodos hidrológicos*, sólo el método *Puls modificado* es capaz de incorporar los efectos de remanso en la solución. De los *métodos hidráulicos*, sólo la técnica de *onda cinemática* no es capaz de incorporar las influencias de remanso sobre la onda de crecida. Esto se debe a que las ecuaciones de onda cinemática están basadas en suposiciones de flujo uniformes y una profundidad normal como condición de borde aguas abajo.

Efecto de las planicies de inundación: Cuando el *hidrograma de inundación* alcanza una magnitud que es mayor que la capacidad de los canales, el agua sale de los cauces e ingresa en las planicies de las riberas (bancas). Dependiendo de las características de estas riberas, el flujo puede reducir de manera importante su *tránsito*, y a menudo almacenar el agua. Los efectos de las llanuras *inundables* sobre el *escurrimiento* pueden ser muy significativos. Los factores que son importantes en la evaluación de la medida en que la llanura *inundable* afectará el *hidrograma* son la amplitud de la llanura *inundable*, su pendiente en la dirección lateral, y la resistencia que presente al flujo debido a la vegetación en la misma.

Pendiente del canal y características del hidrograma: La pendiente del canal no sólo afectará la velocidad del *escurrimiento*, sino también puede afectar la magnitud de la *atenuación* que ocurrirá durante el proceso. Pendientes de canales escarpadas aceleran el *escurrimiento*, mientras pendientes suaves son propensas a velocidades lentas y mayores atenuaciones del *hidrograma*. De todos los métodos de *tránsito* presentados, sólo las ecuaciones de flujo no permanente completas son capaces de estimar *escurrimientos* por canales que se extienden de escarpado a cuevas sumamente planas. Como generalmente las pendientes de los cauces se van haciendo más planas a medida que transitan hacia aguas abajo, muchos de los métodos comienzan a perder rigurosidad.

Redes de flujo: En un sistema de corriente dendrítica, si los flujos tributarios o los flujos de canal principales no causan remansos significativos en la confluencia de las dos corrientes, cualquiera de los métodos *hidráulicos* o *hidrológicos* puede ser aplicados. Si el remanso que ocurre en la confluencia de dos corrientes es realmente significativo, entonces deben aplicarse los *métodos hidráulicos* que pueden representar el remanso. Para redes numerosas, donde el flujo se divide y posiblemente cambia la dirección durante el acontecimiento, sólo pueden aplicarse las ecuaciones de flujo no permanente completas y las ecuaciones de onda de difusión.

Flujo subcrítico y supercrítico: Durante un acontecimiento de *inundación*, una corriente puede experimentar transiciones entre regímenes de flujo *subcríticos* y *super-*

críticos. Si la presencia de flujo *supercrítico* son por largas distancias, o si es importante calcular una etapa exacta dentro del alcance *supercrítico*, las transiciones entre el flujo *subcrítico* y *supercrítico* deberían ser tratadas como condiciones de bordes internas y el tramo de flujo *supercrítico* como una sección separada. Esto normalmente se logra con los *métodos hidráulicos* que tienen rutinas específicas para manejar el flujo *supercrítico*. En general, ninguno de los *métodos hidrológicos* tiene el conocimiento sobre el régimen de flujo (*supercrítico* o *subcrítico*). Si los tramos de flujo *supercríticos* son cortos, no tendrán un impacto sensible sobre el *hidrograma de descarga*.

Datos observados: En general, si los datos observados no están disponibles, los métodos que son basados en propiedades físicas del cauce son los preferidos y será más fácil para aplicarse. Cuando los datos calibrados están disponibles, todos los métodos deberían ser calibrados para emparejar flujos observados y etapas lo mejor posible. Los *métodos hidráulicos*, así como la técnica *Muskingum-Cunge*, son considerados físicamente basado en el sentido que ellos sólo tienen un parámetro (el coeficiente de rugosidad) que debe ser estimado o calibrado. Otros *métodos hidrológicos* incluyen más de un parámetro para ser estimado o calibrado. Muchos de estos parámetros, como el X y el K de *Muskingum*, no se relacionan directamente con los aspectos físicos del canal y el *hidrograma* de ingreso. A causa de esto, estos métodos generalmente no son usados en situaciones donde no existen los datos.

Tratamiento del lecho móvil: Aun cuando la consideración de los procesos de *erosión - sedimentación* asociados a la onda de rotura debe representar una mayor aproximación al análisis *hidráulico* respecto a la consideración de un análisis con lecho fijo, este último tipo de análisis es a menudo conservador y, por otra parte, los modelos de lecho móvil son todavía excesivamente complejos, de difícil aplicación a situaciones reales y no están implementados en los programas de cálculo accesibles. Por las razones anteriores, se considera suficiente la utilización de modelos con lecho fijo, si bien en los casos en que sea de prever una incidencia importante de los procesos de *erosión-sedimentación* deberán analizarse cualitativamente y de forma aproximada sus efectos.

Otros aspectos: La opción final de un modelo se ve influenciada también por otros factores, como la exactitud requerida, el tipo y la disponibilidad de datos, el tipo de información deseada (hidrográficos de flujo, etapas, velocidades, etc.). Aun cuando aparentemente no tengan incidencia en la calidad de los resultados, existen otros factores a tener en cuenta, relativos a la facilidad de manejo del programa, que, en la práctica, inciden de una manera apreciable. Desde este punto de vista, se tendrán en cuenta, a la hora de seleccionar el programa, criterios tales como la amigabilidad, el tipo y forma de introducción de datos, la potencia de los posibles preprocesadores, las posibilidades de comprobación de datos y de seguimiento del proceso de cálculo, la potencia de los posibles postprocesadores y la forma de presentación de los resultados. El usuario debe tomar todos estos factores en consideración seleccionando una técnica apropiada para un problema específico.

3.3.8. Software Existentes

A partir de la generalización de las computadoras, cada vez más económicas y potentes, ha ocurrido la popularización definitiva del uso de modelos numéricos en el campo de la *hidráulica*. En esta generación se han construido una serie de paquetes informáticos, o sistemas de modelación, económicos y de uso sencillo y amigable, de manera que un usuario distinto del constructor puede utilizarlos y crear sus propios modelos para problemas relativamente estándares. Los modelos requieren sin embargo personas con suficiente criterio y conocimiento en *hidráulica* para asegurar que los datos se han estado utilizando de manera correcta, y para una buena interpretación de los resultados.

El *ICOLD (1998)* en un estudio sobre "*Dam Break Flood Analysis*", realizado por el Subcomité de "*Analysis of dam break flooding and related parameters normally assumed*", describe y evalúa 27 modelos existentes en la actualidad (ver tabla adjunta), de los cuales únicamente algunos están normalmente extendidos en la práctica y son accesibles comercialmente.

Una primera familia de modelos que representa sin duda los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión, son aquellos que permiten estudiar cauces fluviales mediante la aproximación unidimensional y régimen gradualmente variado.

Entre ellos destaca el modelos del Hydraulic Engineering Center (*HEC*) del U.S. Army Corps of Engineers, *HEC-RAS*, junto con el modelo *WSPRO* del U.S. Federal Highway Administration. Estos modelos han ido evolucionando con el tiempo y aumentando sus capacidades, de manera que permiten representar ríos con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, pasos bajo vías, uniones, etc. A su vez, poseen cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados, comparando distintas hipótesis de funcionamiento, y realizar informes. El modelo *HEC-RAS* (*USACE, 2002*) ha incorporado la modelación no permanente a sus capacidades. Recientemente, el US Army corps of Engineers Hydrologic Engineering Center ha incorporado el modelo *UNET*, para flujo unidimensional, que utiliza un esquema en diferencias finitas implícitas de los cuatro puntos, en el conocido paquete *HEC-RAS*.

Softwares disponibles para el transito de crecidas y agencia que lo desarrollo (ICOLD, 1998)		
N°	Agencia	Nombre del modelo
1	USA / National Weather Service	DAMBRK (original)
2	USA / National Weather Service	SMPDBK (Simplifield Dambreak)
3	BOSS Internacional	BOSS DAMBRK
4	HAESTAD METHODS	HAESTAD DAMBRK
5	Binnie & Partners	UKDAMBRK
6	Departament of Weather Affairs and Forestry Pretoria, South Africa	DW AF - DAMBRK
7	USA / COE Hydrologic Engineering Center	HEC - programs (HEC-RAS)
8	Tams	LATIS
9	Institute of Wather Resources and Hydroelectric Power Research (IWHR), PR China	DBK1
10	Institute of Wather Resources and Hydroelectric Power Research (IWHR), PR China	DBK2
11	Royal Institute of Technology, Stockolm	TVDDAM
12	Cemagref	RUBAR3
13	Cemagref	RUBAR20
14	Cemagref	CASTOR
15	Delft Hydraulics	SOBEK
16	Delft Hydraulics	DELFT 2D
17	Consulting Engineers Reiter Ltd.	DYX 10
18	ANU - Reiter Ltd.	DYNET ANUFLOOD
19	Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	RECAS
20	Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	FLOOD2D
21	Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	STREAM
22	Danish Hydraulic Institute	MIKE II
23	Danish Hydraulic Institute	MIKE 21
24	ETH Zurich	FLORIS
25	ETH Zurich	2D-MB
26	EDF - Laboratoire National Hydraulique	RUPTURE
27	EDF - Laboratoire National Hydraulique	TELEMAR-2D

Tabla 3.1: Softwares disponibles para el tránsito de crecidas (Bustamanate, 2008)

Como este tipo de modelos se basan en resolver las ecuaciones de Saint Venant, lo que en algunos casos, como es la formación de discontinuidades, puede ser complejo, su uso debe hacerse con cuidado, ya que aunque el modelo dé una solución, el usuario debe asegurarse hasta qué punto ésta es acorde con la realidad.

3.3.9. Elección del modelo a utilizar

Por lo expuesto anteriormente se muestra la conveniencia, de trabajar con los siguientes softwares:

1) El modelo HEC-RAS: es uno de los programas más usados y conocidos por los profesionales de nuestro país; esto lo hace particularmente interesante para incorporar como metodología. Permite realizar la modelación en régimen permanente sin grandes esfuerzos y ofrece también la posibilidad de utilizar los modelos no permanentes en todas sus formas (dinámico completo o difusivo).

2) El programa HEC-HMS: es también un modelo de uso extendido en nuestro país. Es el modelo más simple que se propone utilizar con el tránsito estimado por Muskingum - Cunge. Se recomienda sobre todo por su simplicidad y rapidez para obtener valores preliminares.

Parte IV

APLICACIÓN PRÁCTICA

Capitulo 4

Aplicacion Practica

4.1. Aspectos Generales de la Cuenca de Aplicación

4.1.1. Ubicación política y geográfica

La cuenca del río Chillón se encuentra localizada en la región central y occidental del territorio peruano. Políticamente la cuenca del *Rio Chillón* se encuentra ubicado dentro de los límites del departamento de Lima; provincias de Lima y canta; distritos de Pte Piedra, Carabayllo, Comas, Ventanilla, parte de San Martín de Porras, y los Olivos que pertenecen a la provincia de Lima. Arahuy, Canta, Huamantanga, Huaros, Lachaqui, San Buenaventura, y Santa Rosa de Quives estos pertenecen a la provincia de Canta.

Geográficamente la cuenca del *Rio Chillon* se encuentra ubicada en el departamento de Lima, entre las siguientes coordenadas: Latitud Sur: $11^{\circ}15'$ - $12^{\circ}20'$; Longitud Oeste: $76^{\circ}25'$ - $77^{\circ}10'$. Altitudinalmente la cuenca oscila entre los 0 msnm en el límite con el océano Pacífico y los 5 000 msnm en la cordillera La Viuda, divisoria de las vertientes del Pacífico y Atlántico, alcanzando una altura media de 2370 msnm.

4.1.2. Extensión y Limites

La cuenca del *Río Chillón* limita por el sur con la Cuenca del *río Rímac*, por el norte con la Cuenca del *río Chancay Huaral* y por el este con la Cuenca del *río Mantaro* y por el oeste con el *Océano Pacífico*.

La cuenca en estudio abarca un área de 2353.53 Km^2 de superficie, de los cuales 1089 km^2 (46.5%), corresponden a la denominada cuenca húmeda o colectora. La superficie agrícola bajo riego del valle del río Chillón, es de 11185.5 *ha*.

4.1.3. Información climática y ecológica

La información climática de la cuenca del *Río Chillón* fue obtenida en base la distribución espacial de las principales variables meteorológicas según muestra el siguiente cuadro:

Tipos de Clima	Precipitación total anual (mm)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración potencial total anual (mm)	Area (km2)	Area (%)
Semi cálido muy seco	0 a 100	17.0 a 19.0	775 - 800	839.71	35.7
Semi cálido seco	100 a 250	14.5 a 17.0	675 a 775	510.42	21.7
Templado Subhúmedo	250 a 400	11.0 a 14.5	550 a 675	682.12	29.0
Frio o Boreal	400 a 850	6.5 a 11.0	450 a 550	321.28	13.7

Tabla 4.1: Información climática y ecológica de la cuenca del río Chillón (Fuente: EIRH de la cuenca del Río Chillón - INRENA, 2003)

Con respecto a la *ecología*, se han identificado trece (13) *Zonas de Vida*, que vienen a ser grandes unidades ecológicas claramente diferenciadas en base a sus características climáticas, relieve y suelos, Vegetación y uso actual de la tierra, Este *mapa ecológico* establece la distribución geográfica, basadas en el sistema de clasificación de las zonas de vida del mundo del Dr. Leslie R. Holdrige, lo cual fue desarrollado por un equipo multidisciplinario de Instituto Nacional de Recursos Naturales *INRENA* (1976), El mapa ecológico a escala 1 : 1,000,000 y su Guía Explicativa, en el cual se identifica las diversas unidades *ecológicas* que presenta el Perú, caracterizando en toda su magnitud el impresionante y complejo escenario natural de nuestro país, puesto de manifiesto en diferentes *zonas de vida*, estas zonas de vida de la cuenca del *Río Chillón* se describen en el Apéndice B.

4.1.4. Información Geológica y de suelos

Las diferentes *formaciones geológicas* datan del periodo Paleozoico al Cuaternario reciente. Tales formaciones poseen características litológicas y estructurales muy

particulares, representadas por una amplia variedad de rocas sedimentarias, intrusivas y extrusivas; las cuales han sufrido deformaciones, modificaciones tectónicas y procesos geodinámicos externos dando lugar a estructuras, como fracturas y plegamientos.

De acuerdo a las características geomorfológicas y estructurales de la región, la Cordillera de los Andes se ha elevado sobre 5,000 m, acumulándose rocas volcánicas, iniciadas por volcánicos sedimentarios de colores abirragados pertenecientes a la Formación Yantac. Así, en las altas cumbres se depositaron secuencias volcánicas como las del Grupo Calipuy, de características piroclásticas con intercalaciones de lavas y aglomerados.

La faja occidental andina está formada de volcánicos marinos, constituidos por andesitas básicas, brechas de lavas y sedimentos de aguas superficiales, mientras que la faja oriental se compone de una diferenciación litológica de volcánicos, que pasan a las areniscas, lutitas y calizas, que sobreyace a los esquistos paleozoicos.

4.2. Software ArcGIS y Extensiones Hec-GeoHMS y ArcHydro

ArcGIS es un "Software" de Sistema de Información Geográfica, diseñado por la empresa Californiana Environmental Systems Research Institute (*ESRI*) para trabajar a nivel multiusuario. Este software tiene una interfase entre *modelos hidrológicos* y *SIG*, lo cual, a partir de la información básica creada en *SIG vectorial*, permite la generación de *parámetros hidrológicos*. Igualmente es importante destacar la potencialidad de las extensiones geoespaciales *HEC-GeoHMS* (Geospatial Hydrologic Modeling System Extension) y *HEC-GeoRAS* (Geospatial River Analysis System Extension) Desarrolladas por US Army Corps of Engineers Civils - Hydrologic Engineering Center (www.hec.usace.army.mil).

HEC-GeoHMS es una interfase geoespacial para usar con el sistema de información geográfica vectorial *ArcGIS*. *HEC-GeoHMS* utiliza *ArcMap* y *Spatial Analyst* para desarrollar un número de datos de entrada para posterior *modelación hidrológica* con *HEC-HMS*, incluyendo las siguientes funciones: Procesamiento de datos: captura de datos y almacenamiento.

- Preprocesamiento de elementos del terreno.
- Procesamiento hidrológico: procesamiento de cuencas, características de cuencas y cursos y generación de archivos para modelado con *HMS*.
- Parámetros hidrológicos y *HEC-RAS*. McCormack

Analizando la información digital del terreno, *HEC-GeoHMS* transforma las redes de drenaje y elementos de cuencas en estructuras de datos *hidrológicas* que representan la respuesta de las cuencas a las precipitaciones.

Además, incluye capacidades para desarrollo de datos basados en grilla para transformación lineal del escurrimiento distribuido (*ModClark*), modelos basados en *HEC-HMS*, extracción de características físicas de cuencas y cursos y soporta archivos cartográficos como background. *HEC-GeoHMS* provee un ambiente de trabajo integrado para manejo de datos con capacidades interactivas y herramientas personalizadas.

Incluye módulos de preprocesamiento de elementos del terreno, construcción de temas hidrológicos, estructuras hidráulicas y otros puntos de control, procesamiento de cuencas (fusión y/o separación de cuencas, fusión y separación de tramos de cursos, generación de perfiles, delineación de subcuencas), extracción de características de cursos y cuencas (longitudes y pendientes de ríos, centroides de subcuencas, direcciones de flujo).

Posteriormente, las bases de datos generados con los resultados hidrológicos de *HEC-GeoHMS* son importadas al sistema *HEC-HMS* (Hydrologic Modeling System) donde la simulación hidrológica es realizada, con posibilidades de visualización espacial.

A continuación presentamos los pasos a seguir, para desarrollar un *modelo hidrológico* mediante herramientas *HEC-GeoHMS* y *Archydro*. Para luego generar un archivo de exportación para la simulación mediante *HEC-HMS*.

4.3. Modelacion Hidrologica mediante Interface Geoespacial HEC-GeoHMS

La extensión geoespacial proporciona los archivos de entrada necesarios para modelar posteriormente con *HEC-HMS*. El funcionamiento básico del programa puede

ser dividido en cuatro etapas:

4.3.1. Preprocesamiento del modelo de terreno

El Preprocesamiento del Terreno marca el primer paso en el desarrollo de un proyecto de *HEC-GeoHMS*. En este paso, un modelo de terreno se utiliza como ingreso para derivar ocho conjuntos de datos adicionales que describen en forma conjunta el comportamiento del drenaje de la cuenca y permite para un río la delimitación de su subcuenca. Los primeros cinco conjuntos de datos son capas tipo celda, que representan la dirección del flujo, la acumulación de flujo, red de ríos, segmentación de ríos, y la delimitación de las cuencas hidrográficas. Los siguientes dos conjuntos de datos son las capas vectoriales de las cuencas y ríos. El último conjunto de datos, las cuencas agregados, se utiliza sobre todo para mejorar el rendimiento en la delimitación de las cuencas.

La entrada a esta etapa es el *modelo digital del terreno (MDT)*, es decir, un conjunto de datos en formato raster que representan la topografía de la cuenca. Las salidas de esta etapa serán archivos denominados shape y vectoriales que representarán las subcuencas y los cursos. La totalidad del proceso del *HEC-GeoHMS* está basado en el *MDT* y todos los resultados se obtienen a partir de allí, por lo que deberá existir seguridad de que el mismo sea hidráulicamente correcto.

1. Crear nuevo proyecto vacío en *ArcMap* como se muestra en la figura:
2. Se recomienda crear una carpeta de trabajo, y sub carpetas para cada tipo de archivos, ya que el programa genera una gran cantidad de archivos y es necesario tenerlo bien organizados. Además dicha carpeta de trabajo debe ser guardado en un lugar de fácil acceso, de preferencia en el escritorio, ya que un archivo muy direccionado puede generar conflictos al momento del procesamiento de datos.
3. Mediante la pestaña *ArcCatalog*, que es equivalente al explorador de Windows, conectar la carpeta de trabajo, mediante el icono *Connect to Folder*.
4. Asegurese que las herramientas *ArcHydro* y *HEC-GeoHMS*, estén cargadas dentro del *ArcToolbox*, como se muestra en la figura 7.2.

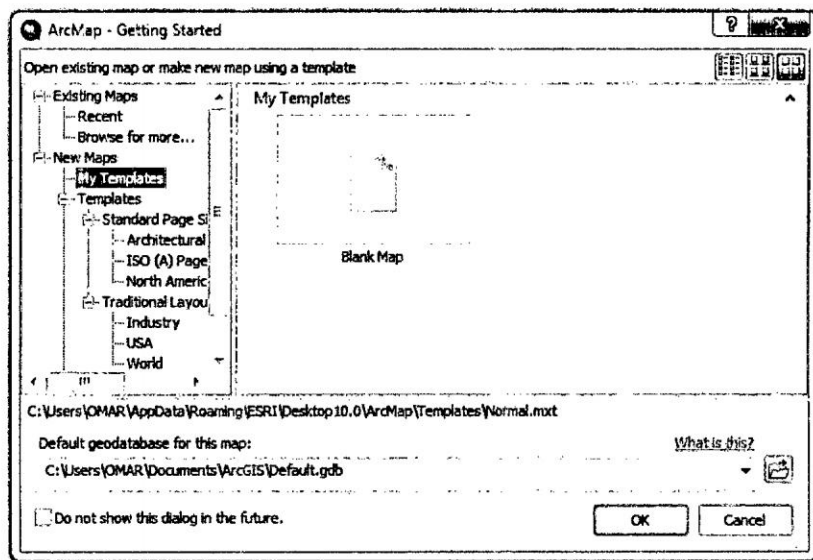


Figura 4.1: Abrir un nuevo proyecto

5. Cargar la barra de herramientas de *HEC-GeoHMS* y *ArcHydro*

- Seleccionar *Customize* → *Toolbars* y check sobre la herramienta *HEC-GeoHMS*, Ver figura 7.3.
- Seleccionar *Customize* → *Toolbars* y check sobre la herramienta *Arc Hydro Tools*, Ver figura 7.4.

6. Cargar datos del terreno

- El terreno será representado mediante un *Modelo Digital del Terreno (DTM)* en formato Raster, una de las agencias que provee estos datos de manera gratuita es la *NASA* (<http://www.echo.nasa.gov/>), así como muchos otros.
- El formato raster se obtiene a partir de capturas de información mediante los medios: Scanners, Satélite, fotografía aérea, cámaras de video, entre otros. Son fotografías, imágenes digitales capturadas por satélites (*landSat*, *Spot*) o información digital de un mapa. Trabaja con celdas de igual tamaño que poseen un valor; el tamaño de la celda define el nivel de detalle de la información. Este modelo está orientado para representar fenómenos tradicionalmente geográficos que varían continuamente en el espacio como la pendiente del terreno, altitud o precipitación. El modelo raster también es llamado imagen.

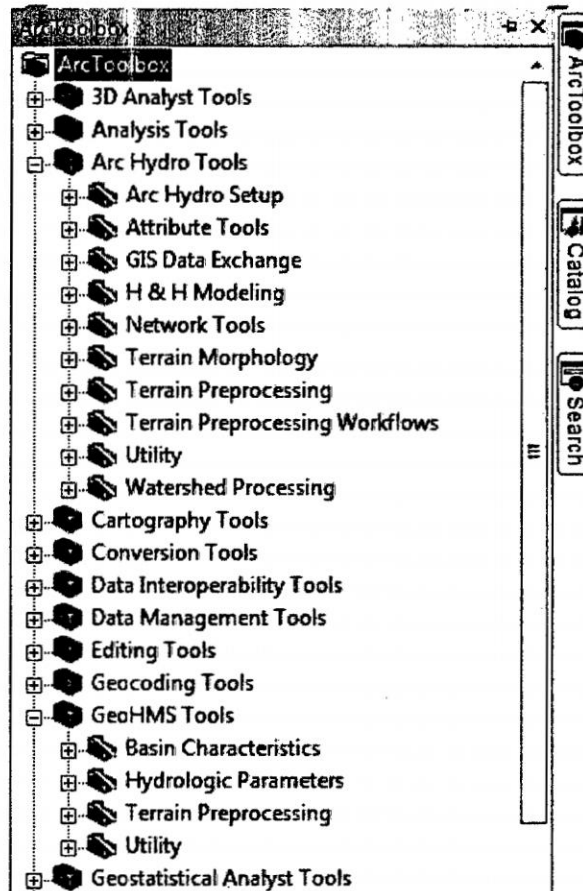


Figura 4.2: Herramientas Arc Hydro tools y GeoHMS tools

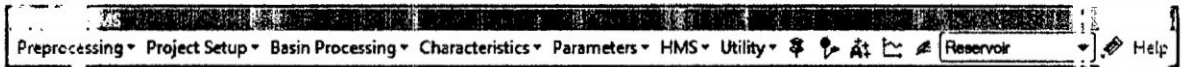


Figura 4.3: Barra de Herramientas HEC-GeoHMS

- Podemos ver las propiedades del terreno haciendo clic derecho sobre los datos del terreno y seleccionando Propiedades. Tenga en cuenta que hay más de nueve millones de celdas (3447 filas x 2639 columnas) con una resolución de treinta metros (Figura 7.5). Esto cubre un área rectangular de 8,630 kilómetros cuadrados, de las cuales la cuenca en estudio abarca 2,211 kilómetros cuadrados.
7. Guardar el proyecto en nuestro directorio creado. Ningún otro documento *ArcMap* debe estar en este directorio. Para este ejemplo, el proyecto fue nombrado "Hidrologico" y se guarda en el directorio "C:\ GIS_Chillon". La ubicación del proyecto es importante porque los conjuntos de datos derivados posteriores

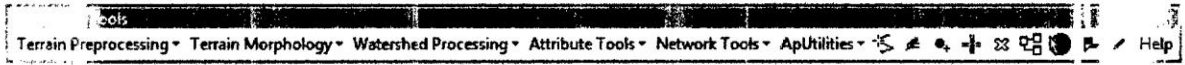


Figura 4.4: Barra de Herramientas Arc Hydro tools

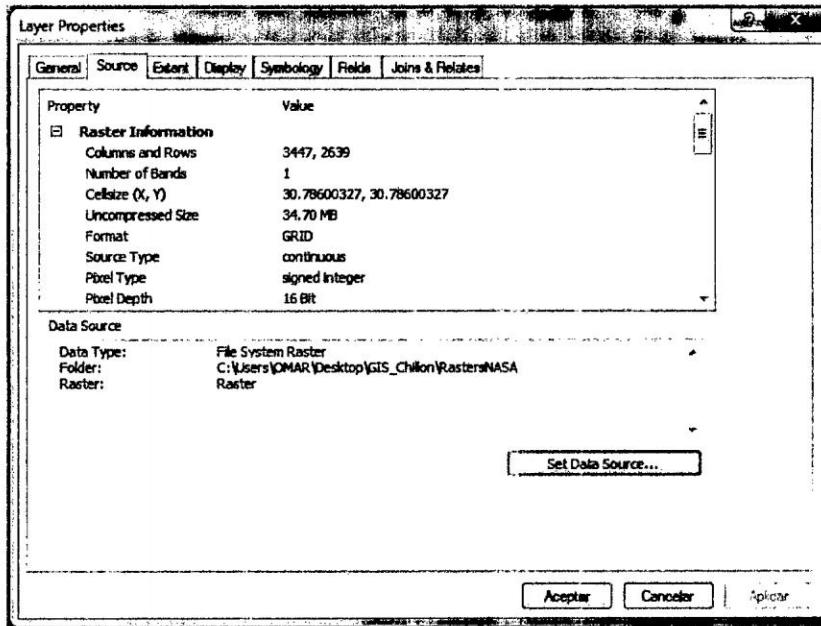


Figura 4.5: Cuadro de propiedades del archivo Raster

se almacenan en este directorio.

8. Realizar el análisis de drenaje, mediante 8 pasos, que se describen:

A. Fill Sinks (Rellenar depresiones): Si existieran depresiones, las mismas son a menudo consideradas errores en el *MDT* debidas al remuestreo e interpolación de la grilla, y podrían no tener una salida. Por lo tanto, para prevenir esto el programa realiza un llenado de depresiones, incrementando el valor de todas las celdas dentro de la depresión para hacerla coincidente con el valor de las celdas vecinas, y así permitir que exista un flujo.

■ *Terrain Preprocessing* → *Dem Manipulation* → *Fill Sinks*

B. Flow Direction (dirección de flujo): El próximo paso en el preprocesamiento del terreno es la determinación de la dirección de flujo. En esta etapa cada celda es analizada, determinándose la dirección de la pendiente de escurrimiento, que se asume

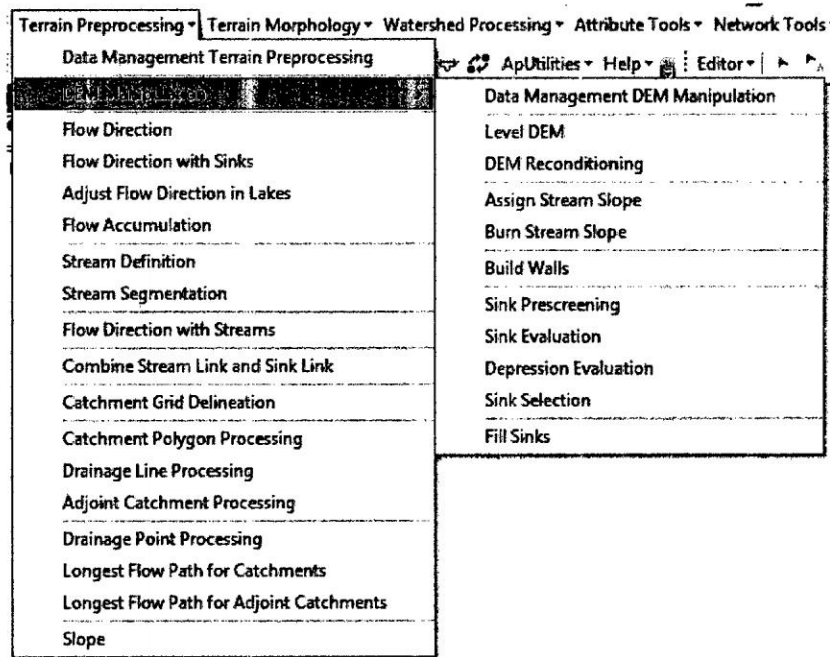


Figura 4.6: Herramientas Archydro de preprocesamiento de terreno

como el camino del flujo que escurre por cada celda. A cada celda se le asigna entonces el valor correspondiente a la dirección del gradiente aguas abajo.

- *Terrain Preprocessing* → *Flow Direction*

C. Flow Accumulation (acumulacion de flujo): A continuación se determina el flujo acumulado. Esta operación calcula y asigna a cada celda un valor representativo del número de celdas que convergen en ella; las celdas cercanas a los puntos altos tendrán valores menores debido a la menor cantidad de celdas que aportan, mientras que los valores mayores corresponderán a las cercanas a la salida de la cuenca. Este valor, multiplicado por el área de cada celda, debería dar el área total de la cuenca de drenaje.

- *Terrain Preprocessing* → *Flow Accumulation*

D. Stream Definition (definición de causes): Luego se realiza la definición de causes de agua. Aquí el usuario deberá definir un área mínima a partir de la cual se forma un curso de agua, a la que se denomina umbral de escurrimiento. Un valor pequeño

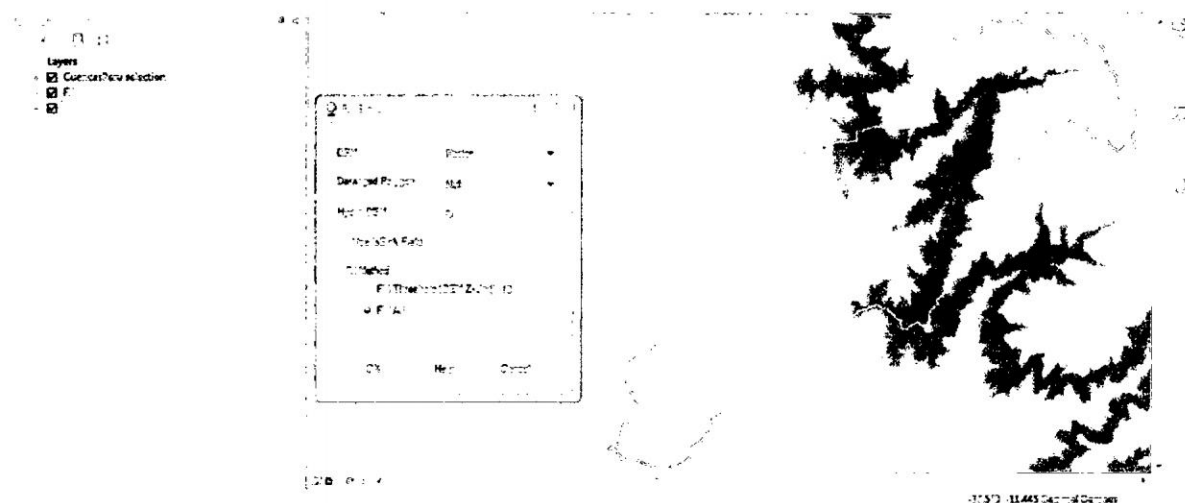


Figura 4.7: celdas de relleno de depresiones

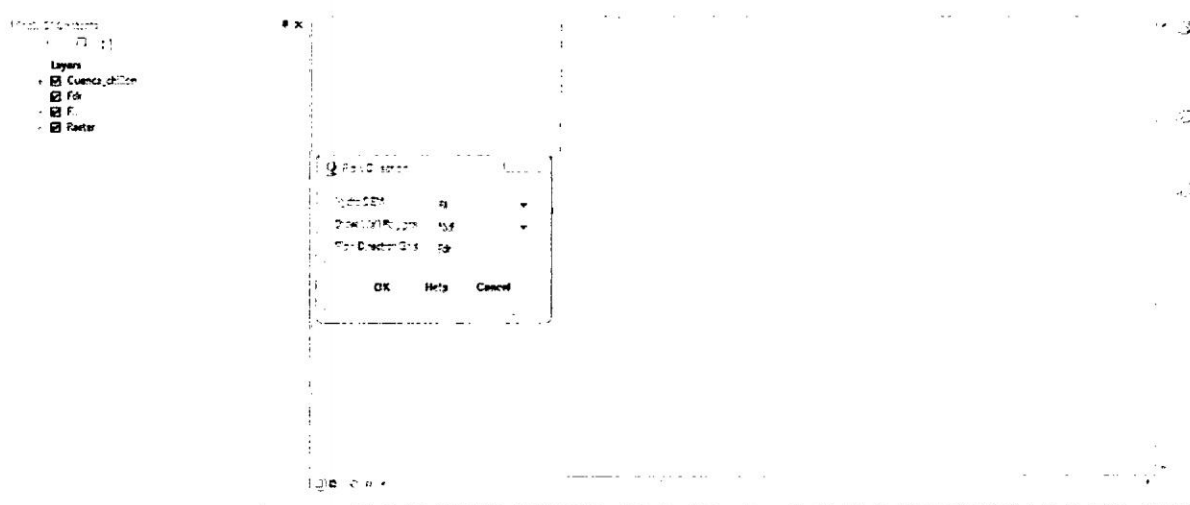


Figura 4.8: Celdas de Dirección de flujo

de éste determinará un mayor número de tributarios pequeños, mientras que valores mayores de umbrales podrán solamente definir los tramos principales del curso. Esto determinará el número y tamaño de las subcuencas que se calcularán posteriormente. El modelo por defecto propone un umbral de escurrimiento correspondiente al 10 % del área total de la cuenca, aunque a veces es conveniente realizar la comparación entre la red extraída desde un *SIG* y la trazada en los mapas topográficos para definir el umbral.

- *Terrain Preprocessing* → *Stream Definition*.

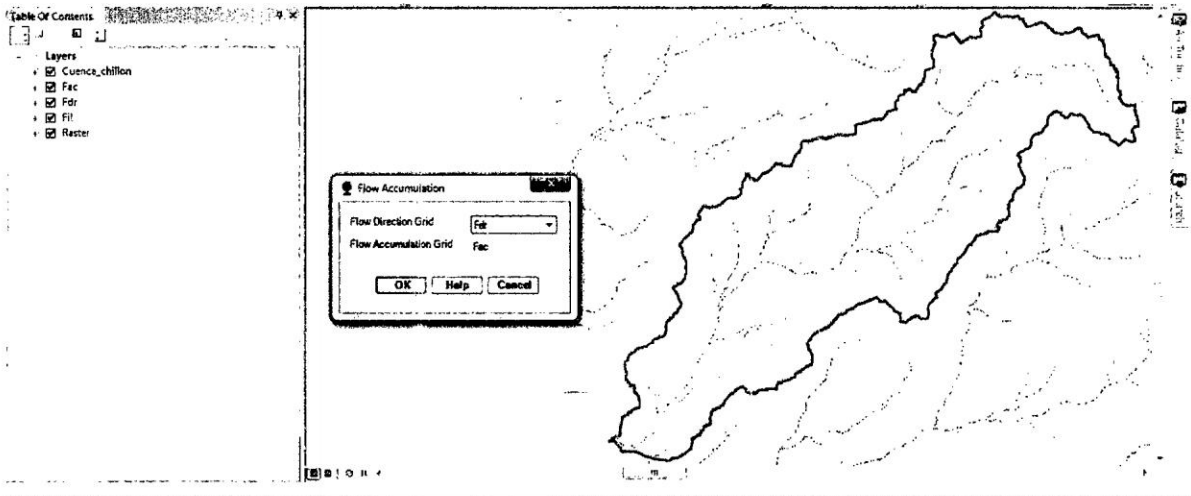


Figura 4.9: Celdas de flujo acumulado

E. Stream Segmentacion (división de causes): Una vez que la red de drenaje principal es definida pueden delimitarse las subcuencas. El primer paso a dar es la segmentación de los causes, en donde se secciona el curso arriba de una confluencia y a partir de allí se obtiene la delimitación de las subcuencas (*watershed delineation*) de acuerdo con cada segmento de cauce. Hasta aquí todas las capas se almacenaron en formato raster; luego de esta operación los datos se vectorizan, realizándose sucesivamente operaciones de procesamiento de polígonos (*watershed polygon processing*), en donde se convierten los polígonos representados en grilla a formato vectorial, procesamiento de segmentos de cauces (*stream segment processing*) en que los segmentos de cauce se presentan en forma vectorial y agregación de subcuencas (*watershed aggregation*) que permite agrupar las subcuencas aguas arribas de cada confluencia de curso. Este paso es requerido para mejorar la eficiencia computacional y no tiene ningún significado hidrológico.

- *Terrain Preprocessing* → *Stream Segmentacion*

F. Catchment Grid Delineation (delimitación de la subcuenca): En este paso se delimita la subcuenca para cada segmento del cauce

- *Terrain Preprocessing* → *Catchment Grid Delineation*

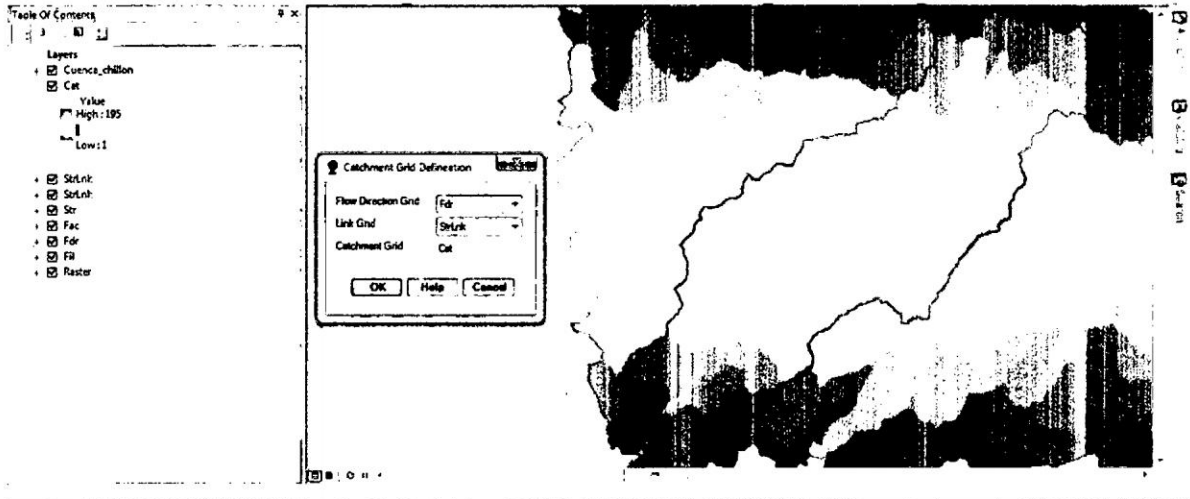


Figura 4.10: Celdas de la delimitación de subcuencas

G. Catchment Polygon Processing (procesamiento del polígono de la subcuenca): En este paso se crea la capa vectorial de las subcuencas usando el cálculo del paso anterior.

- *Terrain Preprocessing* → *Catchment Polygon Processing*

H. Drainage Line Processing (procesamiento de la línea de drenaje): Este paso crea una capa del vector cauce

- *Terrain Preprocessing* → *Drainage Line Processing*

I. Adjoint Catchment Processing (procesamiento de subcuencas): Este paso agrega las subcuencas aguas arriba en cada confluencia con el río. Este es un paso necesario y se lleva a cabo para mejorar el rendimiento computacional para subcuencas interactivas, que son delimitados y para mejorar la extracción de datos en la definición de un proyecto *HEC-GeoHMS*. Este paso no tiene ninguna importancia *hidrológica*.

- *Terrain Preprocessing* → *Adjoint Catchment Processing*

Con este último paso se concluye el preprocesamiento del terreno con las herramientas *ArcHydro*, a continuación se continúa con el preprocesamiento del terreno, con las herramientas de *HEC-GeoHMS*.

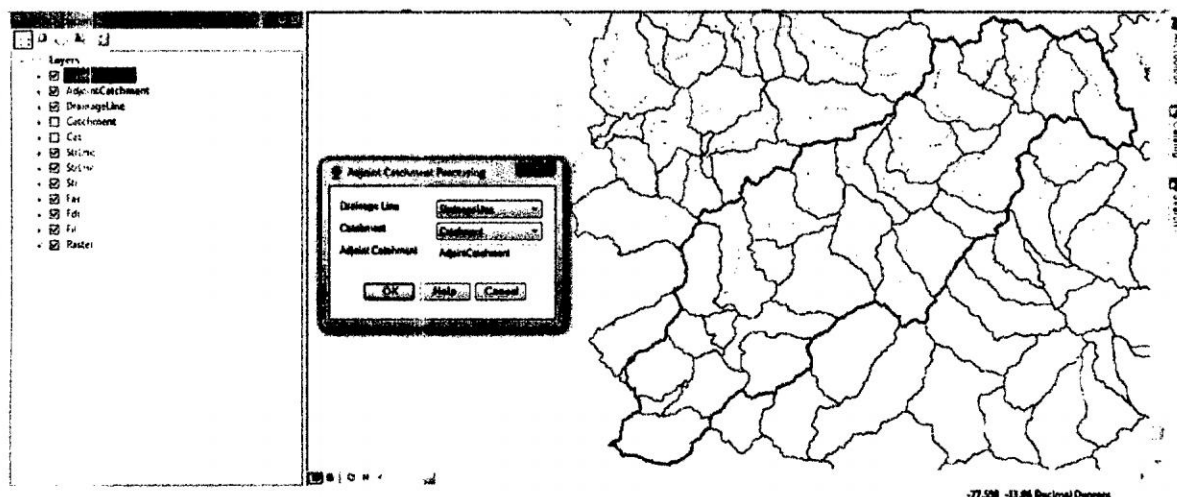


Figura 4.11: procesamiento de subcuencas

4.3.2. Project Setup (Configuración del proyecto)

El menú *Project Setup*, es responsable para extraer datos que serán usados en el desarrollo de la información necesaria para crear un proyecto de *HEC-HMS*. El enfoque para la extracción, implica especificar un punto de control aguas abajo a la salida. Esta localización representa las condiciones aguas abajo para el proyecto *HEC-HMS*. Después de definir la salida aguas abajo, *HEC-GeoHMS*. Extrae datos del conjunto de datos creados usando las herramientas del preprocesamiento del terreno, para el área de drenaje aguas arriba de la salida. Entonces *HEC-GeoHMS* puede usar o refinar la subcuena y delineaciones de ríos, extraer características físicas de las subcuencas y los ríos, estimar parámetros del modelo y preparar el archivo de entrada para *HEC-HMS*. Múltiples proyecciones de salida pueden ser definidos en un mismo proyecto, estos proyectos son manejados a través de dos clases características: proyecto punto (*Project Points*) y Proyecto área (*Project Area*). Las herramientas a usarse se muestra en la figura siguiente:

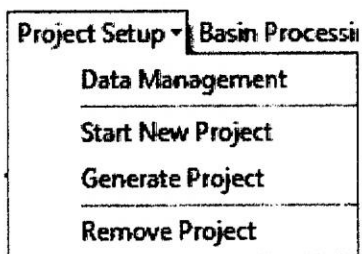


Figura 4.12: Herramientas de configuración del proyecto

En primer lugar se transferirá todo los archivos generados con *Archydro* a las herramientas de *HEC-GeHMS* y se creara un nuevo proyecto con los siguientes pasos:

A. Data Management (gestión de datos): En este paso se muestra una ventana donde se seleccionan las capas creados en los pasos con el *ArcHydro*, los cuales serán incluidos al nuevo proyecto.

- *Setup* → *Data Management*

B. Start New Project (iniciar nuevo proyecto): Para definir un nuevo nombre de proyecto y crear un directorio que contendrá los datos extraídos y los archivos relacionados, ir al menú de configuración del proyecto. El usuario ya debe tener definido la salida, antes de seleccionar estas opciones del menú.

- *Setup* → *Start New Project*

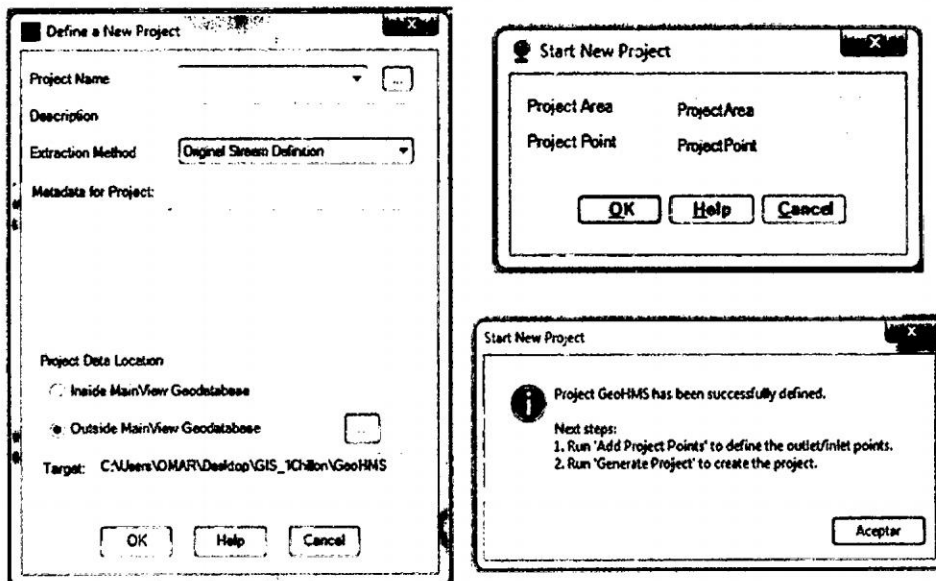


Figura 4.13: Editor para definir un nuevo proyecto

C. Generate project (generar proyecto): La primera vez que se selecciona la opción de generar proyectos, un editor de gestión de datos se abrirá dejando que el usuario verifique los datos correctos estén asociados a las capas de proyectos requeridos. Luego haga clic en el botón *OK* después de comprobar los datos.

El mapa se ampliará automáticamente a la zona de aguas arriba desde el punto de salida quedando el área de drenaje sombreado. El editor de generar proyecto se abrirá preguntando si el usuario quiere crear un proyecto para el área sombreada. Pulse el botón *sí*.

Un nuevo nombre de capa del proyecto será abierta, como se muestra en la figura 7.14, el usuario puede aceptar los nombres por defecto o sobrescribir con nombres personalizados.

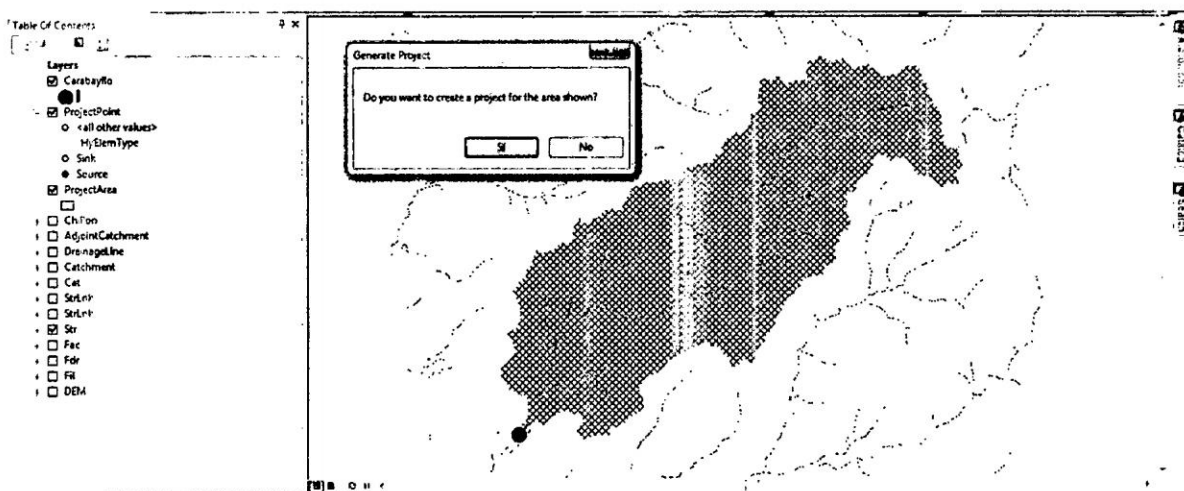


Figura 4.14: Selección del punto de aforo y delimitación de cuenca

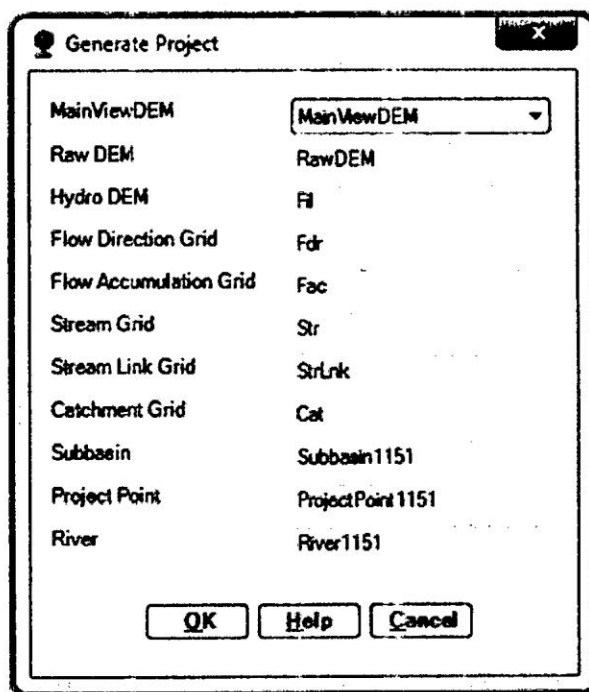


Figura 4.15: editor para nombrar el conjunto de datos creado en el nuevo proyecto

4.3.3. Características de los ríos y subcuencas

Ahora se continúa con el procesamiento de la cuenca, con las herramientas de *HEC-GeoHMS*, para la *modelación hidrológica*.

HEC-GeoHMS calcula varias características topográficas de los cursos de ríos y subcuencas que se pueden utilizar para estimar *parámetros hidrológicos*. El usuario debe verificar y comparar las características físicas con la información publicada antes de la estimación de los *parámetros hidrológicos*. Las características físicas de flujo y subcuencas se almacenan en tablas de atributos, que pueden ser exportados para su uso con una hoja de cálculo y otros programas.

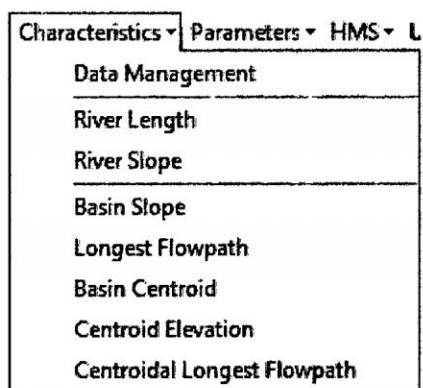


Figura 4.16: Herramientas de características de los ríos y subcuencas

A. River Length (Longitud del río): Este paso calcula la longitud del río para tramos seleccionados o todo el tránsito, en la capa de río. Un campo denominado "*RivLen*" se añade a la tabla de atributos de la capa de río y llena de valores. Las unidades de "*RivLen*" se toman de las unidades del *DEM*.

- *Characteristics* → *River Length*

B. River Slope (pendiente del río): Este paso extrae la elevación de aguas arriba hacia aguas abajo de un tramo de río y calcula la pendiente. La elevación y el talud de aguas arriba y aguas abajo se agregan a la tabla de atributos de la capa de río con los títulos de las columnas: "ElevDS" "ElevUP", y "SLP".

- *Characteristics* → *River Slope*

C. Basin slope (Pendiente de la Cuenca): Esta función calcula la pendiente media de la cuenca. Este calculo será utilizado para el determinar el parámetro de tiempo de retardo *CN*. la herramienta pendiente de la cuenca opera sobre un conjunto seleccionado de subcuencas en la capa de subcuenca. La pendiente de la cuenca se determina promediando los valores de una cuadrícula pendiente para cada subcuenca.

Antes del cálculo de la pendiente de la cuenca, Creamos un Raster de pendientes, de la siguiente manera (ver figura 7.14).

- *Arctoolbox* → *Spatial Analyst Tools* → *Surface* → *Slope*
- *Characteristics* → *Basin Slope*

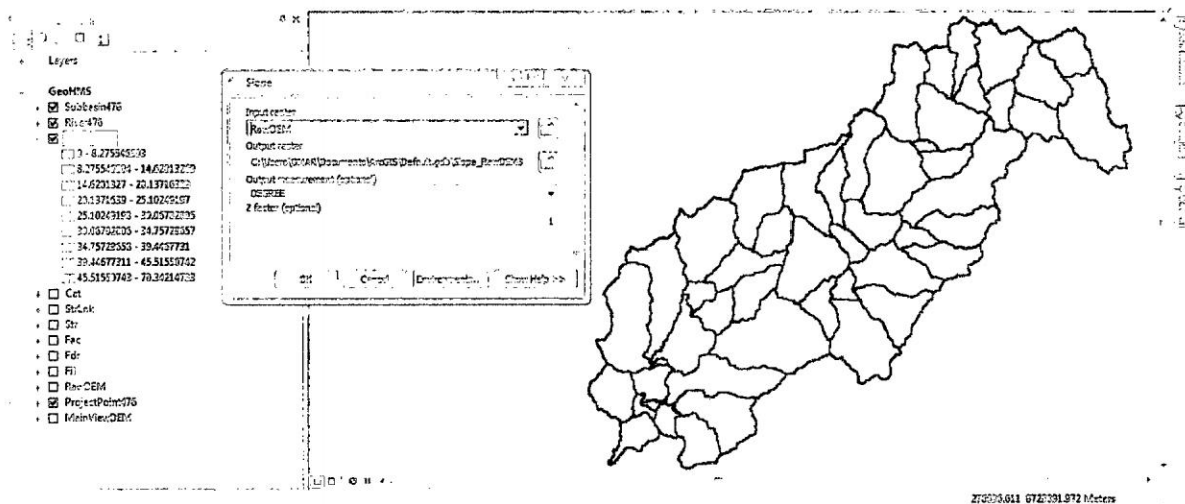


Figura 4.17: Raster de pendientes

D. Longest Flowpath (cause mas largo de flujo): La herramienta *Longest Flowpath*, calcula varias características físicas como: la longitud más larga del flujo, elevación aguas arriba, elevación aguas abajo y pendientes entre los puntos finales. Esta características son almacenados en la capa de *Longest flow path*.

- *Characteristics* → *Longest Flowpath*

E. Basin Centroid (centroide de la cuenca): La herramienta *basin centroid*, nos identificara el centroide de cada subcuenca. La localización del centroide de la Cuenca puede ser estimado de cuatro formas. Tres métodos pueden ser usados para definir el

centroide, cada uno tiene diferentes algoritmos y estos nos dan resultados diferentes. La calidad de los resultados estará en función de la forma de la subcuenca y deberán ser evaluados después de que se generen. El cuarto método es de uso específico, donde el usuario mueve el centroide a la ubicación deseada después de que ha sido creada.

- *Characteristics* → *Basin Centroid*

F. Centroid Elevation (elevación del centroide): Esta operación calcula la elevación para cada punto del centroide usando un *DEM*. La elevación es almacenada en la capa del centroide, y se puede ver en su tabla de atributos.

- *Characteristics* → *Centroid Elevation*

G. Centroidal Flow Path (centroide del curso de flujo: Esta operación calcula el centroide de la trayectoria de flujo más largo, proyectando el centroide sobre la trayectoria más larga.

- *Characteristics* → *Centroidal Longest Flowpath*

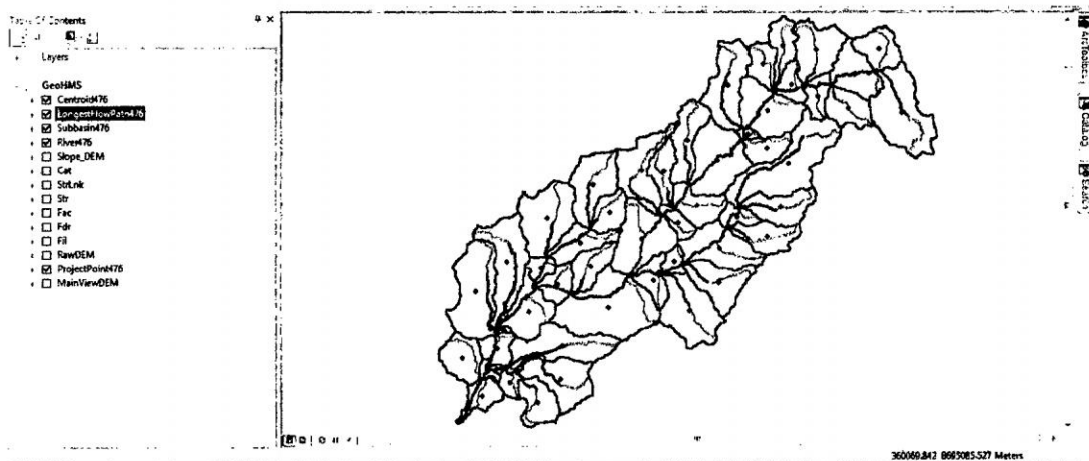


Figura 4.18: centroides y trayectorias de flujo de cada subcuenca

4.3.4. Estimación de Parámetros Hidrológicos

Después de que las características físicas de los ríos y sub cuencas se han extraído, El usuario tiene la opción de estimar una serie de *parámetros hidrológicos*.

Estos parámetros pueden ser estimados como un promedio de la subcuenca, utilizando las bases de datos de suelos y uso de la tierra. Otros *parámetros hidrológicos*, tales como el tiempo de concentración y parámetros de transito de muskingum-Cunge pueden obtenerse a partir del terreno, de los datos analizados y de los datos de una *precipitación*.

El programa puede ayudar en la estimación de un número de parámetros para métodos de pérdida, muskingum-Cunge y parámetros de transito de onda cinemática, el tiempo de concentración de la subcuenca y tiempo de retraso (lag time) de la subcuenca. Esta información se incluirá en el archivo de modelo *HEC-HMS* generada por *HEC-GeoHMS*, ahorrando tiempo al usuario en la parametrización del modelo. El usuario debe comparar y verificar estos *parámetros hidrológicos* estimados contra la información publicada. Los valores de los parámetros calculados utilizando fuentes de datos de *SIG* deben ser tratados como estimaciones iniciales. La calibración y validación del modelo *HEC-HMS* deben ser utilizadas para refinar los parámetros del modelo.

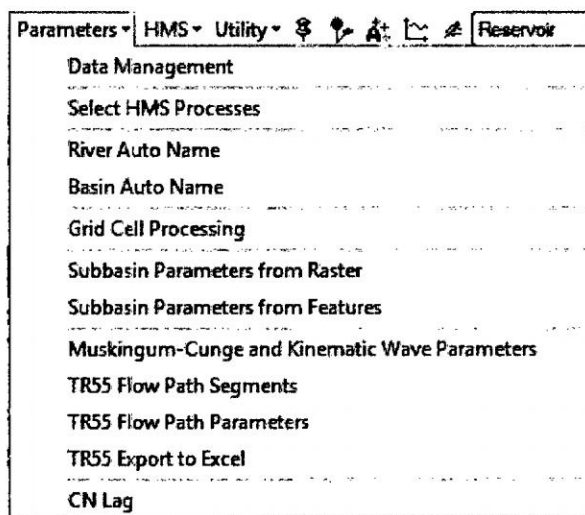


Figura 4.19: Herramientas para la estimación de parámetros

A. Select HMS Processes (selección de procesos HMS): Esta herramienta permite al usuario seleccionar los métodos de modelado *HEC-HMS* que se utilizarán en el estudio. Esta información se guarda en tablas de atributo para las capas de las subcuencas y ríos, se incluirá en los archivos del proyecto *HEC-HMS* creados por *HEC-GeoHMS*.

- *Parameters* → *Select HMS Processes*

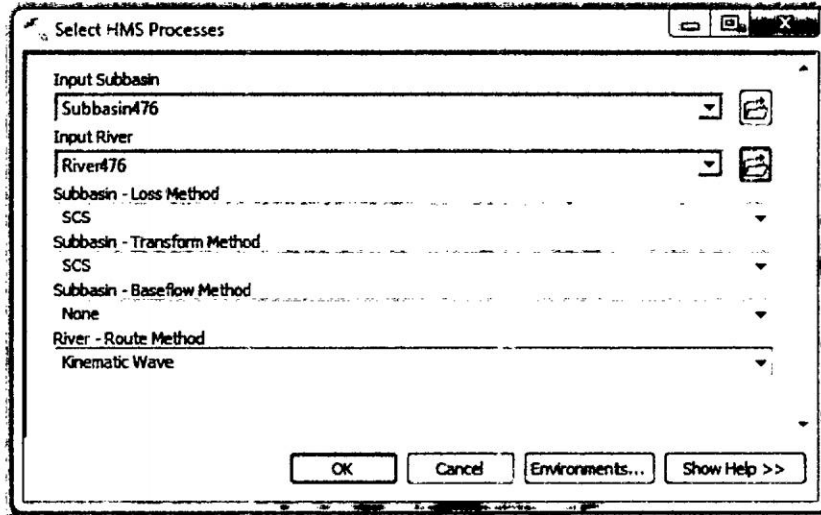


Figura 4.20: Métodos de modelamiento con HMS

B. River Auto Name (nombrar los ríos): Estos procesos nombran los tramos en secuencia de aguas arriba a aguas abajo. La convección a nombrar combina la letra "R" y un número. Por ejemplo, el tramo aguas arriba comienza con R500 y R490 a continuación, R480, R470, etc. son los nombres de tramos procedentes de aguas abajo. La intención de esta herramienta es nombrar rápidamente los tramos. El usuario debe cambiar los nombres por defecto a un nombre más descriptivo

- *Parameters* → *River Auto Name*

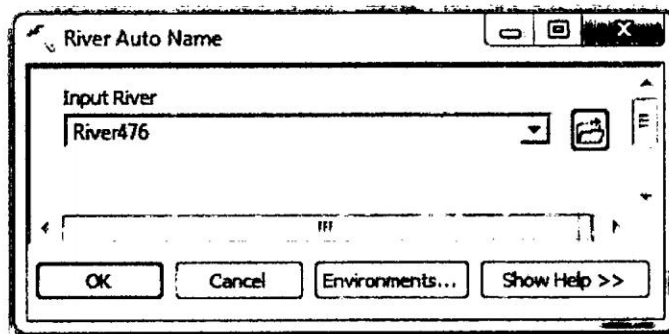


Figura 4.21: Herramienta para nombrar los ríos

C. Basin Auto Name (nombrar las subcuencas): Este proceso nombra las subcuencas en secuencia desde aguas arriba hacia aguas abajo. La convección de nombrar combina la letra "W" y un número. Por ejemplo, la subcuenca aguas arriba comienza con W500 y luego W490, W480, W470, etc. son los nombres de la subcuenca procedentes de aguas abajo. La intención de esta herramienta es nombrar rápidamente las subcuencas. El usuario debe cambiar los nombres por defecto a un nombre más descriptivo.

- *Parameters* → *Basin Auto Name*

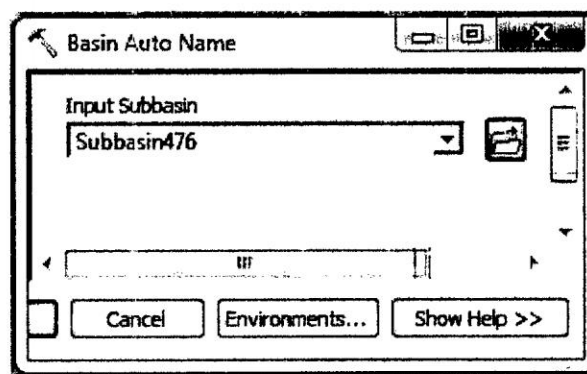


Figura 4.22: Herramienta para nombrar las subcuencas

D. Muskingum - Cunge and Kinematic Wave Parameters (Parametros de Muskingum - Cunge y Onda Cinematica): Esta herramienta facilita la entrada manual de los parámetros de tránsito de Muskingum-Cunge y de onda cinemática. En la mayoría de los casos, el usuario no será capaz de obtener la geometría precisa del canal desde el DEM, el cual es a menudo demasiado gruesa. Sin embargo, el usuario puede utilizar como - dibujos construidos, fotos, datos de la encuesta, y otra información que muestran la forma de canal y la geometría. Esta información puede servir de base para que el usuario especifique la dimensión del canal, formas, y otros parámetros.

- *Parameters* → *Muskingum - Cunge and Kinematic Wave Parameters*

4.3.5. Sistema de Modelo Hidrológico (HMS)

HEC-GeoHMS desarrolla una serie de entradas hidrológicas para *HEC-HMS*: archivos de formas de fondo, archivos de modelo de la cuenca, archivos de parámetros

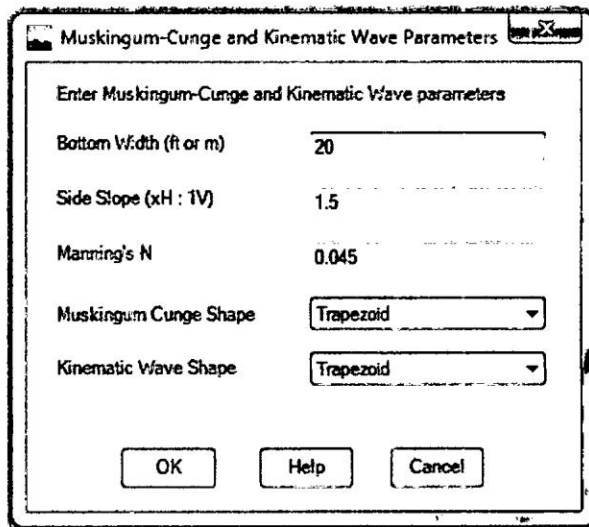


Figura 4.23: Parámetros del modelo de Onda Cinemática

de celda de la cuadrícula, y archivos de modelos meteorológicos. En este acápite se discutirá las herramientas para generar archivos de modelo *HEC-HMS*. A continuación se muestra el resumen de sus herramientas:

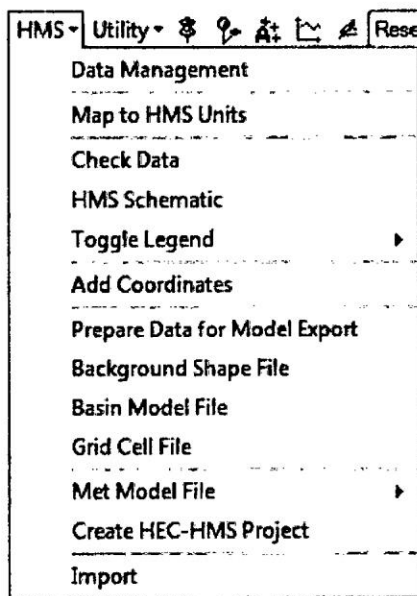


Figura 4.24: Herramienta de modelo hidrológico HMS

A. Map to HMS Units (mapa de unidades HMS): Este paso convierte las características físicas de los tramos y subcuencas a un sistema de unidades seleccionado por el usuario. El usuario tiene la opción de convertir las unidades del mapa a sistema inglesa o internacional (SI).

- *HMS* → *Map to HMS Units*

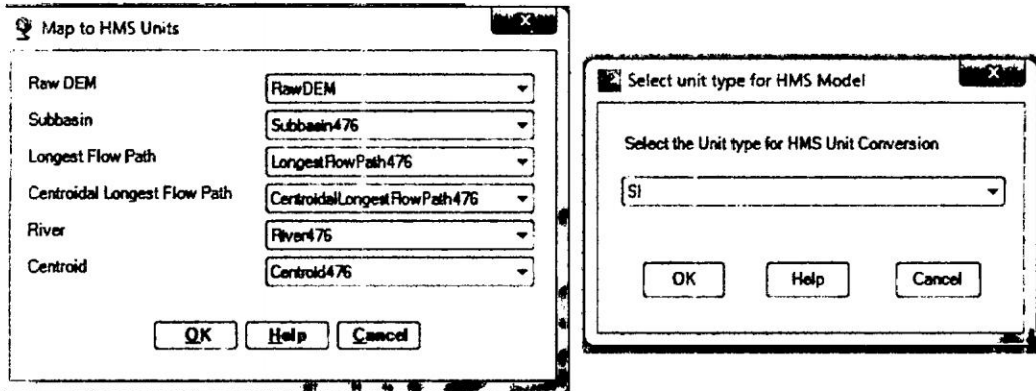


Figura 4.25: Configuración de unidades y características

B. HMS Data Check (verificación de datos HMS): Este paso comprueba los conjuntos de datos para la consistencia en la descripción de la estructura del *modelo hidrológico*. Por ejemplo, el programa comprueba que sean usados nombres únicos, los que fueron utilizados para tramos de río y subcuencas. Además, el programa comprueba que los tramos de ríos y centroides, estén contenidas dentro de una subcuenca. Esto es necesario para la colocación de los nombres de los elementos hidrológicos y los elementos de conectividad hidrológica. En general, el programa realiza un seguimiento de la relación entre los segmentos del río, subcuencas y puntos de salida. Estas verificaciones son necesarias porque las relaciones entre los *elementos hidrológicos* pueden haber sido separado por el uso intencional de la subdivisión y fusión de herramientas.

El programa produce un archivo de texto "*SkelConsChk.txt*", que contiene el resumen de la verificación de datos. Este paso no resuelve ninguno de los problemas; sin embargo, el usuario puede solucionar los problemas de forma manual utilizando *HEC-GeoHMS* o *HEC-HMS*.

- *HMS* → *Check Data*

C. HEC-HMS Basin Schematic (esquema de la cuenca en HEC-HMS): La cuenca esquemática *HMS* es la representación de *SIG* del modelo *HEC-HMS*. Esta herramienta va a construir una red hidrológica simple que contiene los elementos del

```

SkelConstCheck: Bloc de notas
-----
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
HMS consistency checking Log
-----
Project: GeoHMS
File Creation Date: 27/11/2014
File Creation Time: 01:00:00

Checking uniqueness of names ...
Checking River HydroID uniqueness:
End of checking River HydroID uniqueness - all IDs are unique.
Checking River Name uniqueness:
End of checking River Name uniqueness - all Names are unique.
Checking Drainage Area HydroID uniqueness:
End of checking Drainage Area HydroID uniqueness - all IDs are unique.
Checking Drainage Area Name uniqueness:
End of checking Drainage Area Name uniqueness - all Names are unique.
Checking VIP Name uniqueness:
End of checking VIP Name uniqueness - all Names are unique.
End of checking uniqueness of names.

Checking river containment...
End of checking river containment.

Checking centroid...
End of Checking centroid.

Checking river's connectivity...
End of checking river's connectivity.

Checking project points [VIP points]...
Checking VIP Point: Carabayllo x=279033.4012, y=8687791.2716
End of checking point: name=Carabayllo oid=1 - No PROBLEM found.
End of checking project points [VIP points].

Checking Finished: 01:00:01

CHECKING SUMMARY
*****
Unique names           - no problems.
River containment      - no problems.
Center containment     - no problems.
River connectivity     - no problems.
VIP relevance          - no problems.

```

Figura 4.26: Comprobación de datos para la consistencia

modelo *HEC-HMS* y muestra su conectividad. Este paso crea una capa de enlace de *HMS*, que muestra la conectividad, y la capa *HMS Node*, que muestra las ubicaciones de las subcuencas y del nodo de conexiones. Las ubicaciones de nodo para subcuencas se colocan en el centro de gravedad de la subcuenca.

- *HMS* → *HMS Schematic*

D. HMS Legend (leyenda HMS): Esta herramienta utiliza los iconos de elemento de *HEC-HMS* para representar puntos y líneas características de los *HMS* nodo y capas *Link HMS*. El usuario tiene la opción de cambiar entre la leyenda *HMS* y la leyenda regular.

- *HMS* → *Toggle Legend* → *HMS Legend*

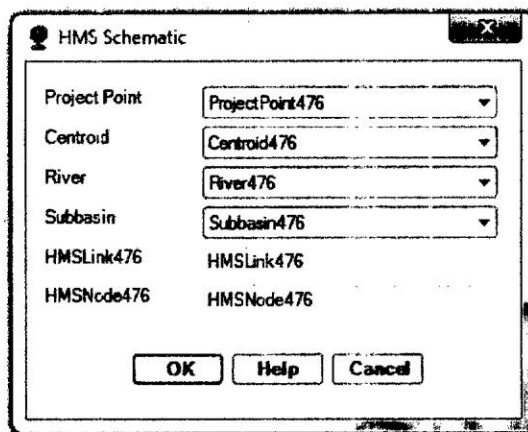


Figura 4.27: Creación del esquema de la cuenca

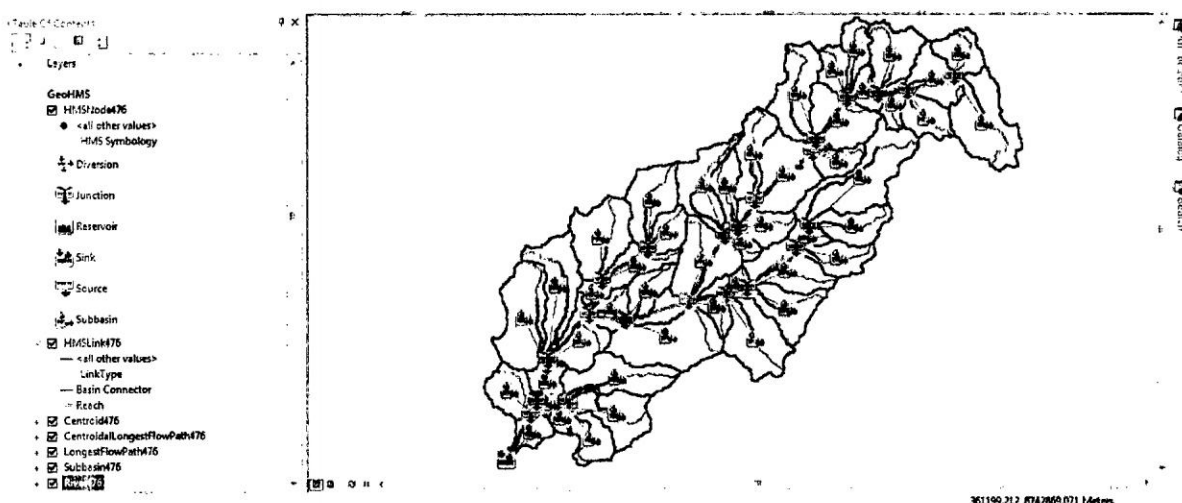


Figura 4.28: Herramienta para crear iconos de elemento de HMS

E. Add Coordinates (agregar coordenadas): En este paso se une las coordenadas geográficas a las características en el nodo de *HMS* y capas *HMS* de enlace. Las coordenadas se añaden a la tabla de atributos. La fijación de coordenadas permite que los datos *SIG* puedan ser exportados a un formato *ASCII* y conserva la información geoespacial.

- *HMS* → *Add Coordinates*

F. Prepare Data For Model Export (preparación de datos para modelo de exportación): Un archivo de modelo de cuenca *HMS* contiene la estructura de datos hidrológicos, que incluye los elementos hidrológicos, su conectividad y

SrcType	CanvasX	CanvasY	Elevation	DownElemID	HyElemType
0	279033.4012	8687791.2716	0	-1	Sink
1	290914.5722	8690711.0695	1058	161	Subbasin
2	287638.0891	8695287.6634	549	309	Junction
1	282591.2448	8691674.5008	342	159	Subbasin
1	279593.4899	8697331.5649	925	166	Subbasin
2	282373.6825	8694087.0093	347	311	Junction
1	286766.0572	8693642.3446	608	169	Subbasin
2	286160.3609	8695872.5975	484	308	Junction
1	283404.2568	8695355.38	371	166	Subbasin
1	284871.8033	8695758.2345	432	174	Subbasin
2	283235.6906	8695841.8115	373	310	Junction
1	294315.4451	8694181.1563	1254	161	Subbasin
1	294506.1982	8699116.7212	1072	169	Subbasin
1	284829.4965	8698722.3384	474	174	Subbasin

Figura 4.29: Agregar coordenadas

parámetros relacionados. *HEC-GeoHMS* pueden exportar algunos de los parámetros hidrológicos en el archivo modelo de cuenca *HMS*; sin embargo, el usuario debe terminar la parametrización del modelo de cuenca, una vez que se importa en *HEC-HMS*.

- *HMS* → *Prepare Data for Model Export*

G. Background Shape File (forma de archivos de fondo): Formas de archivos de fondo capturan la información geográfica de los límites de las subcuencas y de los tramos de corriente. *HEC-HMS* contiene opciones para ajustar las propiedades de visualización de archivos de formas, propiedades de polígonos y líneas.

- *HMS* → *Background Shape File*

H. Basin Model File (archivo del modelo de cuenca): El modelo de cuenca captura los elementos hidrológicos, su conectividad, e información geográfica derivada en un archivo de texto *ASCII* que se puede cargar en un proyecto *HEC-HMS*, en este paso se crea el archivo de exportación para *HEC-HMS*.

- *HMS* → *Basin Model File*

4.3.6. Cálculo de la Tormenta de Diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema y los caudales resultantes a través de este se hallan utilizando procedimientos de lluvia - escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, que especifique el patrón espacial de la precipitación.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Para nuestro caso práctico, obtendremos las tormentas de diseño mediante una información histórica de precipitación, cuyo registro con el que se cuenta son los siguientes:

Fecha	ESTACIONES PLUVIOMETRICAS (Precipitación Máxima en 24 hrs)						
	Lachaqui	Canta	Arahuay	Huamantanga	Pariacancha	Huaros	Pte Madgalena
05/03/2003	20.50	2.80	0.50	2.10	17.50	7.50	0.00
06/03/2003	15.90	0.90	0.70	9.70	1.40	4.90	0.00
07/03/2003	6.80	6.80	1.50	3.70	6.50	19.10	0.00
08/03/2003	3.20	8.60	5.40	2.70	12.70	0.00	0.00
09/03/2003	7.90	5.60	10.10	7.50	2.30	0.00	0.00
10/03/2003	14.30	0.40	1.50	2.90	1.40	3.20	0.00

Tabla 4.2: Precipitación máxima en 24 hrs (Elab. Propia)

Distribución de la precipitación Máxima en 24 horas, según la NRSC (ex SCS) 1986: El Soil Conservation Service del U.S. Departmental of Agriculture (1986) desarrollo hietogramas sintéticos de tormentas para utilizarse en los Estados Unidos con duraciones de 6 y 24 horas. Estos hietogramas se dedujeron al utilizar la información presentada por Hershfield (1961) y Miller, Frederick y Tracey (1973) y datos de tormentas adicionales. Existen cuatro tormentas de 24 horas de duración, llamadas tipo I, IA, II y III, respectivamente; Los tipos I y IA corresponden al clima marítimo del pacifico con inviernos húmedos y veranos secos. El Tipo III corresponde al Golfo de Mexico y las áreas costeras del Atlantico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes. El Tipo II corresponde al resto del país.

Por lo tanto por analogía la precipitación que se asemeja a nuestra realidad es la

del tipo I, el cual tomaremos para determinar la tormenta de diseño, en el siguiente cuadro se muestra los factores calculados para nuestra cuenca de aplicación.

Tormenta de 24 horas						Tormenta de 24 horas cuenca de aplicacion		
		P_t/P_{24}						
Hora t	$t/24$	Tipo I	Tipo IA	Tipo II	Tipo III	Tiempo (hr)	% P_acum	% P_incrern
0	0	0	0	0	0	0	0.000	
2.0	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020	1	0.018	0.0175
4.0	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043	2	0.035	0.0175
6.0	0.250	0.125	0.206	0.080	0.072	3	0.056	0.0205
7.0	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089	4	0.076	0.0205
8.0	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115	5	0.101	0.0245
8.5	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130	6	0.125	0.0245
9.0	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148	7	0.156	0.0310
9.5	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167	8	0.194	0.0380
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178	9	0.254	0.0600
10.0	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189	10	0.515	0.2610
10.5	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216	11	0.624	0.1090
11.0	0.459	0.624	0.624	0.235	0.250	12	0.682	0.0580
11.5	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298	13	0.727	0.0450
11.75	0.489	0.669	0.655	0.357	0.339	14	0.767	0.0400
12.0	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500	15	0.799	0.0315
12.5	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702	16	0.830	0.0315
13.0	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751	17	0.854	0.0240
13.5	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785	18	0.878	0.0240
14.0	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811	19	0.902	0.0240
16.0	0.667	0.830	0.800	0.880	0.886	20	0.926	0.0240
20.0	0.833	0.926	0.906	0.952	0.957	21	0.945	0.0185
24.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	22	0.963	0.0185
						23	0.982	0.0185
						24	1.000	0.0185

Fuente: U. S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 1973, 1986.

Tabla 4.3: factores para la tormenta de diseño (Chow, 1994)

4.3.7. Calculo de la precipitación media sobre una zona

En general, la altura de la precipitación que cae en un sitio dado, difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos.

Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en la que está instalada el aparato. Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar referida a la altura de la precipitación diaria, anual, media mensual, media anual.

- **Altura de precipitación diaria y media diaria:** *diaria* es la suma de las lecturas observadas en un día y *media diaria* es el promedio aritmético de las lecturas observadas en un día.
- **Altura de precipitación mensual y media mensual:** *mensual* es la suma de las alturas diarias, ocurridas en un mes y *media mensual* es el promedio aritmético de las alturas de precipitación mensual

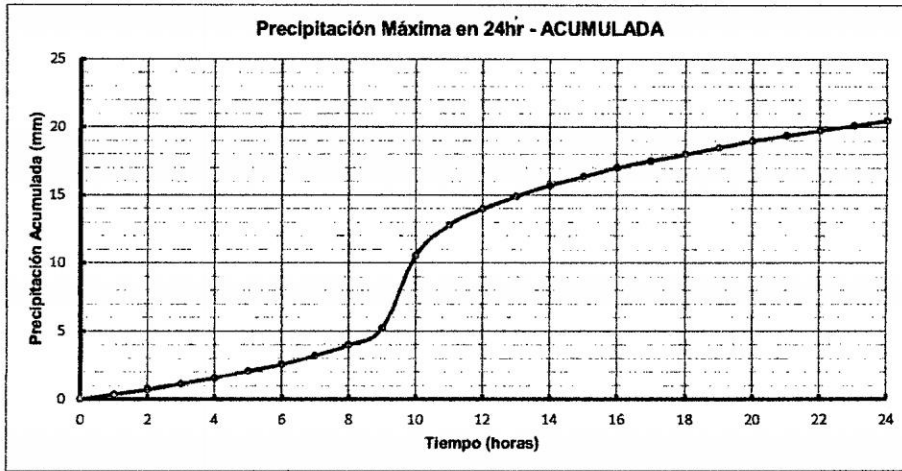


Figura 4.30: Precipitación acumulada (Elab. Propia)

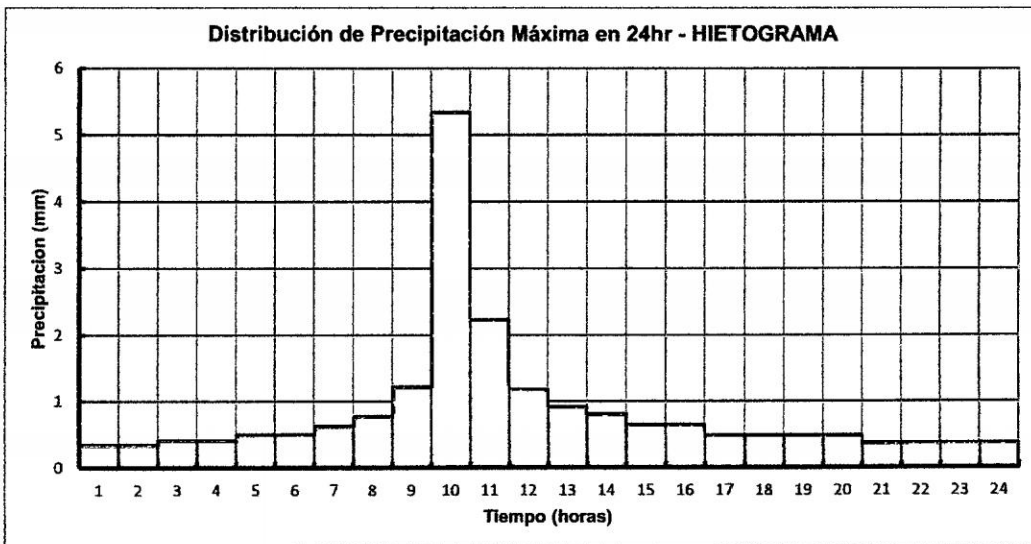


Figura 4.31: Histograma de diseño (Elab. Propia)

- **Altura de precipitación anual y media anual:** *anual* es la suma de las alturas de precipitación mensual, ocurridas en un año. *media anual* es el promedio aritmético de las alturas de precipitación anual, correspondientes a un cierto número de años.

En nuestro caso práctico, contamos con datos altura de precipitación diaria, y calcularemos la precipitación media de la tormenta mediante el método del *polígono de Thiessen*.

Para la aplicación de este método, es necesario conocer la localización de las estaciones en el área de estudio, ya que su aplicación, se requiere delimitar la zona de

influencia de cada estación, el software *ArcMap 10.0* tiene una herramienta para interpolar y determinar las zonas de influencia de cada estación, con el cual se obtiene el polígono de thiesen, de la siguiente manera:

- *Arctoolbox* → *Analysis Tools* → *Proximity* → *Create Thiessen Polygons*.

Subcuenca	Estaciones	Area (Km2)	%	Subcuenca	Estaciones	Area (Km2)	%
SC-01	Huaros	26.157	100%	SC-24	Lachaqui	9.610	69%
SC-02	Paricancha	33.419	67%	Arahuay	4.412	31%	
	Huaros	16.476	33%	SC-25	Huamantanga	15.327	22%
SC-03	Paricancha	30.961	100%	Arahuay	22.523	33%	
SC-04	Paricancha	83.985	100%	Pte Madgalena	30.939	45%	
SC-05	Paricancha	41.619	100%	SC-26	Huamantanga	16.565	64%
SC-06	Huaros	24.581	41%	Pte Madgalena	9.418	36%	
	Canta	35.913	59%	SC-27	Huamantanga	8.933	13%
SC-07	Huaros	12.389	63%	Pte Madgalena	61.099	87%	
	Paricancha	7.372	37%	SC-28	Lachaqui	17.516	51%
SC-08	Paricancha	31.981	100%	Arahuay	16.798	49%	
SC-09	Huaros	18.219	100%	SC-29	Arahuay	56.740	100%
SC-10	Huaros	22.765	100%	SC-30	Pte Madgalena	33.275	100%
SC-11	Huaros	0.018	100%	SC-31	Pte Madgalena	68.535	100%
SC-12	Huaros	24.590	42%	SC-32	Pte Madgalena	12.701	100%
	Canta	34.644	58%	SC-33	Arahuay	46.047	100%
SC-13	Canta	4.283	100%	SC-34	Arahuay	10.820	100%
SC-14	Paricancha	5.329	5%	SC-35	Pte Madgalena	23.789	100%
	Huaros	14.112	14%	SC-36	Pte Madgalena	81.806	100%
	Canta	26.922	27%	SC-37	Arahuay	69.048	100%
	Lachaqui	54.538	54%	SC-38	Pte Madgalena	112.442	100%
SC-15	Canta	27.622	38%	SC-39	Pte Madgalena	30.273	100%
	Lachaqui	27.008	37%	SC-40	Pte Madgalena	22.311	100%
Huamantanga	18.111	25%	SC-41	Pte Madgalena	44.986	100%	
SC-16	Canta	22.771	100%	SC-42	Pte Madgalena	1.694	100%
SC-17	Huamantanga	42.225	100%	SC-43	Pte Madgalena	20.361	100%
SC-18	Huamantanga	56.067	100%	SC-44	Pte Madgalena	62.659	100%
SC-19	Huamantanga	54.512	100%	SC-45	Pte Madgalena	54.949	100%
SC-20	Lachaqui	5.346	16%	SC-46	Pte Madgalena	2.509	100%
	Arahuay	20.359	60%	SC-47	Pte Madgalena	5.532	100%
	Huamantanga	8.357	25%	SC-48	Pte Madgalena	11.352	100%
SC-21	Huamantanga	26.198	100%	SC-49	Pte Madgalena	34.678	100%
SC-22	Lachaqui	40.366	100%	SC-50	Pte Madgalena	22.008	100%
SC-23	Arahuay	14.418	100%	SC-51	Pte Madgalena	32.727	100%

Tabla 4.4: Áreas de influencia de los estaciones para cada subcuenca (Elab. Propia)

La precipitación media, por el método del polígono de thiesen se calcula usando como peso el área de influencia correspondiente, mediante la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{1}{A_T} \sum (A_i \cdot P_i) \quad (4.1)$$

Donde:

P_m = Precipitación media

A_t = Área total de la cuenca

A_i = Área de influencia del polígono de thiessen correspondiente a la estación i

P_i = Precipitación de la estación i

n = numero de estaciones tomadas en cuenta.

Ver *polígono de thiessen* de la cuenca en el plano 03

4.3.8. Método SCS para Abstracciones

Según Chow (1986): El Soil Conservation Service (1972) desarrollo un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - I_a$.

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica.

$$I_a = 0.2S \quad (4.2)$$

El número de curva y S se relaciona por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.3)$$

Donde:

I_a = Pérdidas iniciales (mm)

S = Retención potencial máxima (mm)

CN = Numero de curva

Condición de humedad antecedente (AMC): Los números de curva, se aplican para condiciones o estados de humedad, que tiene en cuenta los antecedentes previos

de humedad de la cuenca; determinado por la lluvia total en periodo de 5 días anterior a la tormenta.

El *SCS* usa tres intervalos de *AMC*:

- *AMC I*, Es el límite inferior de humedad o el límite superior de S. hay un mínimo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están lo suficientemente secos para permitir el arado o cultivos.
- *AMC II*, Es el promedio o en condiciones normales.
- *AMC III*, Es el límite superior de humedad o el límite inferior de S, hay máximo potencia de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por lluvias anteriores.

El *SCS* presenta la siguiente tabla 4.5 (Chow, 1994), para estimar *CHA*, considerando el antecedente de 5 días de lluvia, el cual es simplemente la suma de la lluvia, de los 5 días anteriores al día considerado.

Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

(Fuente: Soil Conservation Service, 1972, tabla 4.2, p. 4.12).

Tabla 4.5: Clasificación de AMC (Chow, 1994)

El número de curva equivalente para las condiciones I y III se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (4.4)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (4.5)$$

Estimación de los CN: Los números de curva han sido tabulados por el SCS con base en el tipo de suelo y su cobertura. Para el caso de tipos de suelo se han clasificado en cuatro grupos: A, B, C y D, cuyas características se describen líneas abajo.

Los valores de CN para varios tipos de uso de la tierra en estos tipos de suelos se dan la tabla 4.6.

- *Grupo A:* son suelos que tiene altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento) aun cuando están enteramente mojados y están constituidos en su gran mayoría por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas.
- *Grupo B:* Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente de suelos profundos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.
- *Grupo C:* son suelos que tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituidos mayormente por suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina.
- *Grupo D:* son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración, muy bajas cuando están completamente mojados y están formados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla, en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable.

Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de tierra, se puede calcular un CN compuesto, dado por:

$$CN_{comp} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (4.6)$$

Dónde:

CN_i : Valor de CN de la subdivisión "i"

A_i : Area de la subdivicion "i"

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Tabla 4.6: Estimación Numero de Curva (Chow, 1994)

Para estimar el número de curva en nuestro caso de estudio, se ha utilizado el mapa de ecológico, desarrollado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA 1994). (ver Apéndice A, tablas 4.7 y Plano 03).

Item	Zona de Vida Ecológica		Area (km ²)
01	Nival Tropical	NT	10.48
02	Tundra Pluvial Alpino Tropical	tp-AT	58.44
03	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	262.62
04	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	191.81
05	Estepa Montano Tropical	e-MT	264.18
06	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	192.79
07	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	77.64
08	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	146.89
09	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	302.34
10	Desierto Peradico Montano Bajo Tropical	dp-MBT	28.80
11	Desierto Supérido Subtropical	ds-S	287.18
12	Desierto Desechado Subtropical	dd-S	96.71
13	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	70.30

Tabla 4.7: Zonas de vida de la cuenca del Río Chillón (Elab. Propia)

Sub cuenca	Zonas de vida según Holdrige	Area	%	Tipo de Suelo	CN	CN ponderado	
SC-01	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	10.924	41.76%	D	83	80.0
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	12.010	45.91%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	3.223	12.32%	C	81	
SC-02	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	2.819	5.65%	D	83	80.3
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	10.242	20.53%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	36.833	73.82%	C	81	
SC-03	Tundra Pluvial Alpino Tropical	tp-AT	12.793	41.32%	C	81	82.2
	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	18.168	58.68%	D	83	
SC-04	Nival Tropical	NT	10.476	12.47%	D	89	82.7
	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	27.864	33.18%	D	83	
	Tundra Pluvial Alpino Tropical	tp-AT	45.645	54.35%	C	81	
SC-05	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	14.839	35.66%	D	83	79.1
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	26.779	64.34%	C	77	
SC-06	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	38.111	63.00%	C	77	78.4
	Estepa Montano Tropical	e-MT	18.523	30.62%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	3.860	6.38%	C	79	
SC-07	Estepa Montano Tropical	e-MT	2.790	14.12%	C	81	80.1
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	8.567	43.35%	C	77	
	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	8.404	42.53%	D	83	
SC-08	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	1.917	5.99%	D	83	77.4
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	30.064	94.01%	C	77	
SC-09	Estepa Montano Tropical	e-MT	2.311	12.68%	C	81	77.5
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	15.909	87.32%	C	77	
SC-10	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	1.192	5.23%	D	83	77.7
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	19.346	84.98%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	2.227	9.78%	C	81	
SC-11	Estepa Montano Tropical	e-MT	0.018	100.00%	C	81	81.0

Tabla 4.8: Estimación del CN de las Subcuencas del Río Chillón (Elab. Propia)

Con los CN obtenida para cada subcuenca, para condiciones normales ACM II, se obtiene para condiciones secas (AMC I) y húmedas (AMC III), tabla 4.12:

Sub cuenca	Zonas de vida según Holdridge		Area	%	Tipo de Suelo	GN	GN ponderado
SC-12	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	13.731	23.18%	C	77	79.4
	Estepa Montano Tropical	e-MT	18.226	30.77%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	23.093	38.99%	C	79	
	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	4.185	7.07%	D	83	
SC-13	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	4.28	100.00%	C	79	79.0
SC-14	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	62.941	62.38%	D	83	81.7
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	12.894	12.78%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	25.067	24.84%	C	81	
SC-15	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	6.321	8.69%	C	77	79.4
	Estepa Montano Tropical	e-MT	19.162	26.34%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	34.030	46.78%	C	79	
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	13.229	18.19%	B	79	
SC-16	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	1.001	4.40%	D	83	79.8
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	5.756	25.28%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	13.008	57.13%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	3.006	13.20%	C	79	
SC-17	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	19.725	46.71%	C	77	78.8
	Estepa Montano Tropical	e-MT	16.015	37.93%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	6.486	15.36%	C	79	
SC-18	Estepa Montano Tropical	e-MT	21.512	38.37%	C	81	79.8
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	23.188	41.36%	C	79	
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	11.366	20.27%	B	79	
SC-19	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	3.341	6.13%	C	79	75.7
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	32.965	60.47%	B	79	
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	18.207	33.40%	B	69	
SC-20	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	13.139	38.57%	C	79	79.5
	Estepa Montano Tropical	e-MT	8.000	23.49%	C	81	
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	1.342	3.94%	B	79	
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	11.582	34.00%	B	79	
SC-21	Estepa Montano Tropical	e-MT	18.181	69.40%	C	81	80.4
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	8.018	30.60%	C	79	
SC-22	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	23.581	58.42%	D	83	81.5
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	6.705	16.61%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	10.080	24.97%	C	81	
SC-23	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	1.602	11.11%	C	79	79.0
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	6.241	43.28%	B	79	
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	6.575	45.60%	B	79	
SC-24	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	6.684	47.67%	C	79	80.0
	Estepa Montano Tropical	e-MT	7.338	52.33%	C	81	
SC-25	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	29.233	42.50%	B	69	74.8
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	12.525	18.21%	B	79	
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	27.031	39.30%	B	79	
SC-26	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	4.134	15.91%	B	79	70.6
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	21.849	84.09%	B	69	
SC-27	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	5.138	7.34%	B	79	69.5
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	48.217	68.85%	B	69	
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	16.676	23.81%	A	68	
SC-28	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT	10.096	29.42%	D	83	80.1
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	10.770	31.39%	C	77	
	Estepa Montano Tropical	e-MT	10.062	29.33%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	3.385	9.87%	C	79	

Tabla 4.9: continuación estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón

Sub cuenca	Zonas de vida según Holdrige		Area	%	Tipo de Suelo	CN	CN ponderado
SC-29	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	4.989	8.79%	C	77	79.3
	Estepa Montano Tropical	e-MT	14.832	26.14%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	19.038	33.55%	C	79	
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	13.148	23.17%	B	79	
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	4.732	8.34%	B	79	
SC-30	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	16.289	48.95%	B	79	73.4
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	16.985	51.05%	A	68	
SC-31	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	16.667	24.32%	B	69	68.2
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	37.010	54.00%	A	68	
	Desierto Desechado Subtropical	dd-S	14.858	21.68%	A	68	
SC-32	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	12.70	100.00%	A	68	68.0
SC-33	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat	2.471	5.37%	C	77	79.8
	Estepa Montano Tropical	e-MT	21.931	47.63%	C	81	
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	11.553	25.09%	C	79	
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	4.463	9.69%	B	79	
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	5.629	12.23%	B	79	
SC-34	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	2.218	20.50%	B	79	78.5
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	8.075	74.63%	B	79	
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	0.527	4.87%	B	69	
SC-35	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	7.451	31.32%	B	79	72.4
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	0.687	2.89%	B	79	
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	15.651	65.79%	B	69	
SC-36	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	18.383	22.47%	B	69	67.5
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	34.445	42.11%	A	68	
	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	28.977	35.42%	B	66	
SC-37	Estepa Montano Tropical	e-MT	15.014	21.74%	C	81	79.4
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT	27.562	39.92%	C	79	
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	21.484	31.11%	B	79	
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT	4.990	7.23%	B	79	
SC-38	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT	19.083	16.97%	B	79	69.9
	Desierto Peradico Montano Bajo Tropical	dp-MBT	20.429	18.17%	B	66	
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	44.843	39.88%	B	69	
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	28.086	24.98%	A	68	
SC-39	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	19.831	65.51%	B	69	68.7
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	10.442	34.49%	A	68	
SC-40	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	22.311	100.00%	A	68	68.0
SC-41	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	3.652	8.12%	B	69	68.1
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	20.534	45.65%	A	68	
	Desierto Desechado Subtropical	dd-S	20.800	46.24%	A	68	
SC-42	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	1.69	100.00%	A	68	68.0
SC-43	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	1.114	5.47%	A	68	67.9
	Desierto Desechado Subtropical	dd-S	18.225	89.51%	A	68	
	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	1.022	5.02%	B	66	
SC-44	Desierto Peradico Montano Bajo Tropical	dp-MBT	8.026	12.81%	B	66	67.7
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	12.076	19.27%	B	69	
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	33.884	54.08%	A	68	
	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	8.673	13.84%	B	66	
SC-45	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT	29.291	53.31%	B	69	68.4
	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	21.522	39.17%	A	68	
	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	4.137	7.53%	B	66	
SC-46	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	2.509	100.00%	A	68	68.0
SC-47	Desierto Supéarido Subtropical	ds-S	5.532	100.00%	A	68	68.0
SC-48	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	11.352	100.00%	B	66	66.0

Tabla 4.10: continuación estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón (Elab. Propia)

Sub cuenca	Zonas de vida según Holdrige		Area	%	Tipo de Suelo	CN	CN ponderado
SC-49	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	12.299	35.46%	B	66	67.3
	Desierto Supérido Subtropical	ds-S	11.125	32.08%	A	68	
	Desierto Desechado Subtropical	dd-S	11.255	32.45%	A	68	
SC-50	Desierto Desechado Subtropical	dd-S	18.614	84.58%	A	68	67.7
	Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical	dp-MBS	3.394	15.42%	B	66	
SC-51	Desierto Supérido Subtropical	ds-S	27.937	85.36%	A	68	68.1
	Desierto Perárido Premontano Tropical	dp-PT	4.790	14.64%	B	69	

Tabla 4.11: continuación estimación del numero de curva de las Subcuencas del Río Chillón

Sub cuenca	Secas (I)			Normales (II)			Húmedas (III)		
	CN	S (mm)	I (mm)	CN	S (mm)	I (mm)	CN	S (mm)	I (mm)
SC-01	63.59	145.42	29.08	80.61	61.08	12.22	90.53	26.56	5.31
SC-02	68.77	115.34	23.07	83.98	48.44	9.69	92.34	21.06	4.21
SC-03	67.87	120.26	24.05	83.41	50.51	10.10	92.04	21.96	4.39
SC-04	69.67	110.58	22.12	84.54	46.44	9.29	92.64	20.19	4.04
SC-05	61.44	159.41	31.88	79.14	66.95	13.39	89.72	29.11	5.82
SC-06	62.52	152.29	30.46	79.88	63.96	12.79	90.13	27.81	5.56
SC-07	63.90	143.50	28.70	80.82	60.27	12.05	90.65	26.20	5.24
SC-08	58.93	176.99	35.40	77.36	74.34	14.87	88.71	32.32	6.46
SC-09	60.02	169.17	33.83	78.14	71.05	14.21	89.16	30.89	6.18
SC-10	60.10	168.65	33.73	78.19	70.83	14.17	89.19	30.80	6.16
SC-11	72.07	98.45	19.69	86.00	41.35	8.27	93.39	17.98	3.60
SC-12	64.12	142.11	28.42	80.97	59.69	11.94	90.73	25.95	5.19
SC-13	61.24	160.76	32.15	79.00	67.52	13.50	89.64	29.36	5.87
SC-14	67.19	124.05	24.81	82.98	52.10	10.42	91.81	22.65	4.53
SC-15	63.67	144.91	28.98	80.67	60.86	12.17	90.56	26.46	5.29
SC-16	66.70	126.78	25.36	82.67	53.25	10.65	91.65	23.15	4.63
SC-17	63.75	144.44	28.89	80.72	60.67	12.13	90.59	26.38	5.28
SC-18	65.20	135.59	27.12	81.69	56.95	11.39	91.12	24.76	4.95
SC-19	56.63	194.55	38.91	75.66	81.71	16.34	87.73	35.53	7.11
SC-20	63.63	145.15	29.03	80.64	60.96	12.19	90.55	26.51	5.30
SC-21	68.57	116.41	23.28	83.86	48.89	9.78	92.28	21.26	4.25
SC-22	66.83	126.05	25.21	82.75	52.94	10.59	91.69	23.02	4.60
SC-23	61.24	160.76	32.15	79.00	67.52	13.50	89.64	29.36	5.87
SC-24	66.70	126.84	25.37	82.66	53.27	10.65	91.64	23.16	4.63
SC-25	55.42	204.28	40.86	74.75	85.80	17.16	87.19	37.30	7.46
SC-26	50.20	251.95	50.39	70.59	105.82	21.16	84.66	46.01	9.20
SC-27	48.90	265.46	53.09	69.50	111.49	22.30	83.97	48.47	9.69
SC-28	65.07	136.35	27.27	81.60	57.27	11.45	91.07	24.90	4.98
SC-29	63.65	145.06	29.01	80.65	60.93	12.19	90.56	26.49	5.30
SC-30	53.66	219.33	43.87	73.38	92.12	18.42	86.38	40.05	8.01
SC-31	47.44	281.42	56.28	68.24	118.20	23.64	83.17	51.39	10.28
SC-32	47.16	284.59	56.92	68.00	119.53	23.91	83.01	51.97	10.39
SC-33	66.02	130.72	26.14	82.23	54.90	10.98	91.41	23.87	4.77
SC-34	60.55	165.51	33.10	78.51	69.51	13.90	89.37	30.22	6.04
SC-35	52.45	230.30	46.06	72.42	96.73	19.35	85.79	42.06	8.41
SC-36	46.61	290.97	58.19	67.52	122.21	24.44	82.70	53.13	10.63
SC-37	63.45	146.29	29.26	80.52	61.44	12.29	90.48	26.71	5.34
SC-38	49.38	260.39	52.08	69.90	109.36	21.87	84.23	47.55	9.51
SC-39	47.91	276.11	55.22	68.66	115.97	23.19	83.44	50.42	10.08
SC-40	47.16	284.59	56.92	68.00	119.53	23.91	83.01	51.97	10.39
SC-41	47.25	283.53	56.71	68.08	119.08	23.82	83.07	51.78	10.36
SC-42	47.16	284.59	56.92	68.00	119.53	23.91	83.01	51.97	10.39
SC-43	47.04	285.91	57.18	67.90	120.08	24.02	82.95	52.21	10.44
SC-44	46.77	289.07	57.81	67.66	121.41	24.28	82.79	52.79	10.56
SC-45	47.60	279.62	55.92	68.38	117.44	23.49	83.26	51.06	10.21
SC-46	47.16	284.59	56.92	68.00	119.53	23.91	83.01	51.97	10.39
SC-47	47.16	284.59	56.92	68.00	119.53	23.91	83.01	51.97	10.39
SC-48	44.91	311.54	62.31	66.00	130.85	26.17	81.70	56.89	11.38
SC-49	46.35	293.97	58.79	67.29	123.47	24.69	82.55	53.68	10.74
SC-50	46.81	288.65	57.73	67.69	121.23	24.25	82.81	52.71	10.54
SC-51	47.33	282.68	56.54	68.15	118.73	23.75	83.11	51.62	10.32

Tabla 4.12: CN para condiciones normales, secas y húmedas (Elab. Propia)

4.3.9. Tiempo de concentración

Se han propuesto diversas fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración (t_c). No obstante no existe una expresión universal válida. Se ha comprobado que las fórmulas que parten de la geomorfología de las cuencas dan buenos resultados, tales como las que proponen Kirpich y Rowe. Por otro lado se observa la necesidad de evaluar formulaciones que distingan cuencas urbanas de las no urbanas, entre ellas se tiene la de J.R. Temez.

Método de Kirpich:

$$t_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (4.7)$$

Donde:

L =longitud del cauce principal, en m

S =Pendiente del cauce principal, en m/m

t_c =tiempo de concentración, en horas

Método de Rowe: aplicable a cuencas grandes

$$t_c = \left(\frac{0.83L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (4.8)$$

Donde:

L = longitud del cauce principal, en km

H = desnivel del cauce principal, en m/m

t_c = tiempo de concentración en horas

Método de Temez: para cuencas No urbanas, rural (urbanización < 4% del área de la cuenca)

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{S_o^{0.25}} \right)^{0.75} \quad (4.9)$$

Donde

t_c = tiempo de concentración en horas

L = longitud del cauce principal

S_o = diferencia de cotas sobre L , en %

Para los datos relacionados a la información geomorfológica, se calculó el tiempo de concentración para los diferentes métodos, para esta investigación se consideró el promedio de los tres métodos, también se calculó el tiempo de retardo (*Lag Time*) el cual según aproximaciones empíricas representa aproximadamente el 60% del tiempo de concentración. los cálculos se muestra en la siguiente tabla 4.13:

El último parámetro a ingresar es el porcentaje de impermeabilidad, que es el porcentaje del área de la subcuenca en el cual no se presentan perdidas por infiltración, evaporación u otros procesos.

No obstante, los valores del número de curva que figuran en las tablas desarrolladas por el SCS ya incluyen este porcentaje de impermeabilidad. Por lo tanto, si se adoptan estos valores el porcentaje de impermeabilidad es cero.

4.3.10. Simulación Mediante HEC-HMS

Para realizar la simulación de la cuenca mediante el software *HEC-HMS 3.5*, se requiriere primeramente la obtención de parámetros de la cuenca, para obtener como resultado la descarga en nuestro punto de interés o a la salida de la cuenca, dichos parámetros se describen y obtiene en las secciones anteriores.

Las componentes básicas del modelo *HEC-HMS* fueron descritas con mayor detalle en el capítulo 4, los cuales son:

Modelo de cuenca: El modelo de la cuenca, se desarrolla en el software *ArcMAP*, con datos de distribución geoespacial y mediante sus herramientas y extensiones *HEC-GeoHMS* y *ArcHydro Tools*, y luego es importado al *HEC-HMS*, para la simulación de la descarga pico. La cuenca importada es como se muestra en la figura 4.32.

Datos de series de tiempo: Los *modelos hidrológicos* requieren de serie-tiempo de datos de *precipitación* para estimar la precipitación promedio. Una serie-tiempo de datos de flujo, a menudo llamados flujos observados o descargas observadas, es útil para la calibración del modelo y para su optimización.

Para nuestro caso práctico contamos con datos de *precipitación diaria* de los días 05 marzo del 2003 al 10 de marzo del 2003, de las 7 estaciones pluviométricas (Lachaqui,

Subcuenca	Long (Km)	S (m/m)	tc			tc Prom. (min)	Lag Time (min)
			Kirpich (hr)	Rowe (hr)	Temez (hr)		
SC-01	4.932	0.243	0.390	0.391	0.546	26.542	15.925
SC-02	4.061	0.129	0.429	0.430	0.531	27.802	16.681
SC-03	0.065	0.015	0.041	0.041	0.036	2.337	1.402
SC-04	10.508	0.036	1.453	1.455	1.375	85.677	51.406
SC-05	8.373	0.040	1.176	1.178	1.139	69.860	41.916
SC-06	11.710	0.149	0.917	0.918	1.145	59.612	35.767
SC-07	5.621	0.048	0.807	0.808	0.817	48.624	29.174
SC-08	2.644	0.163	0.282	0.282	0.369	18.644	11.187
SC-09	4.869	0.076	0.604	0.605	0.672	37.610	22.566
SC-10	0.666	0.455	0.066	0.066	0.108	4.790	2.874
SC-11	0.136	0.287	0.023	0.023	0.036	1.638	0.983
SC-12	8.455	0.063	0.994	0.996	1.054	60.870	36.522
SC-13	1.925	0.038	0.387	0.387	0.382	23.113	13.868
SC-14	18.553	0.072	1.728	1.730	1.852	106.191	63.714
SC-15	12.879	0.052	1.477	1.479	1.496	89.027	53.416
SC-16	0.169	0.130	0.037	0.037	0.049	2.461	1.477
SC-17	6.921	0.258	0.495	0.496	0.696	33.741	20.245
SC-18	10.214	0.123	0.888	0.889	1.071	56.964	34.179
SC-19	8.472	0.055	1.048	1.049	1.082	63.578	38.147
SC-20	5.246	0.037	0.845	0.846	0.814	50.094	30.056
SC-21	3.400	0.188	0.324	0.324	0.433	21.619	12.971
SC-22	6.452	0.155	0.571	0.571	0.726	37.369	22.421
SC-23	2.530	0.043	0.454	0.455	0.458	27.339	16.404
SC-24	4.432	0.074	0.568	0.569	0.630	35.328	21.197
SC-25	12.559	0.028	1.835	1.837	1.647	106.395	63.837
SC-26	2.160	0.081	0.315	0.315	0.361	19.814	11.888
SC-27	6.925	0.043	0.990	0.991	0.975	59.116	35.470
SC-28	4.237	0.221	0.360	0.360	0.496	24.318	14.591
SC-29	10.424	0.090	1.016	1.017	1.152	63.694	38.217
SC-30	8.845	0.053	1.103	1.104	1.127	66.697	40.018
SC-31	17.968	0.027	2.465	2.468	2.175	142.169	85.301
SC-32	6.828	0.031	1.101	1.102	1.022	64.511	38.707
SC-33	5.712	0.122	0.571	0.571	0.694	36.718	22.031
SC-34	3.619	0.067	0.505	0.506	0.551	31.256	18.753
SC-35	6.219	0.058	0.811	0.812	0.850	49.482	29.689
SC-36	12.926	0.030	1.841	1.843	1.668	107.024	64.214
SC-37	8.140	0.098	0.813	0.814	0.942	51.392	30.835
SC-38	11.793	0.026	1.818	1.820	1.601	104.806	62.883
SC-39	3.866	0.061	0.550	0.551	0.589	33.784	20.270
SC-40	6.307	0.023	1.179	1.180	1.025	67.676	40.606
SC-41	10.036	0.018	1.844	1.846	1.518	104.141	62.485
SC-42	1.030	0.014	0.355	0.355	0.290	19.985	11.991
SC-43	6.487	0.017	1.334	1.336	1.101	75.413	45.248
SC-44	10.996	0.058	1.252	1.254	1.301	76.134	45.681
SC-45	11.814	0.052	1.385	1.386	1.403	83.491	50.095
SC-46	3.632	0.031	0.685	0.686	0.640	40.224	24.134
SC-47	2.594	0.010	0.812	0.813	0.613	44.758	26.855
SC-48	2.489	0.026	0.544	0.545	0.497	31.703	19.022
SC-49	0.524	0.019	0.185	0.185	0.164	10.676	6.406
SC-50	8.393	0.024	1.431	1.433	1.255	82.383	49.430
SC-51	5.414	0.056	0.736	0.737	0.770	44.859	26.916

Tabla 4.13: CN para condiciones normales, secas y húmedas (Elab. Propia)

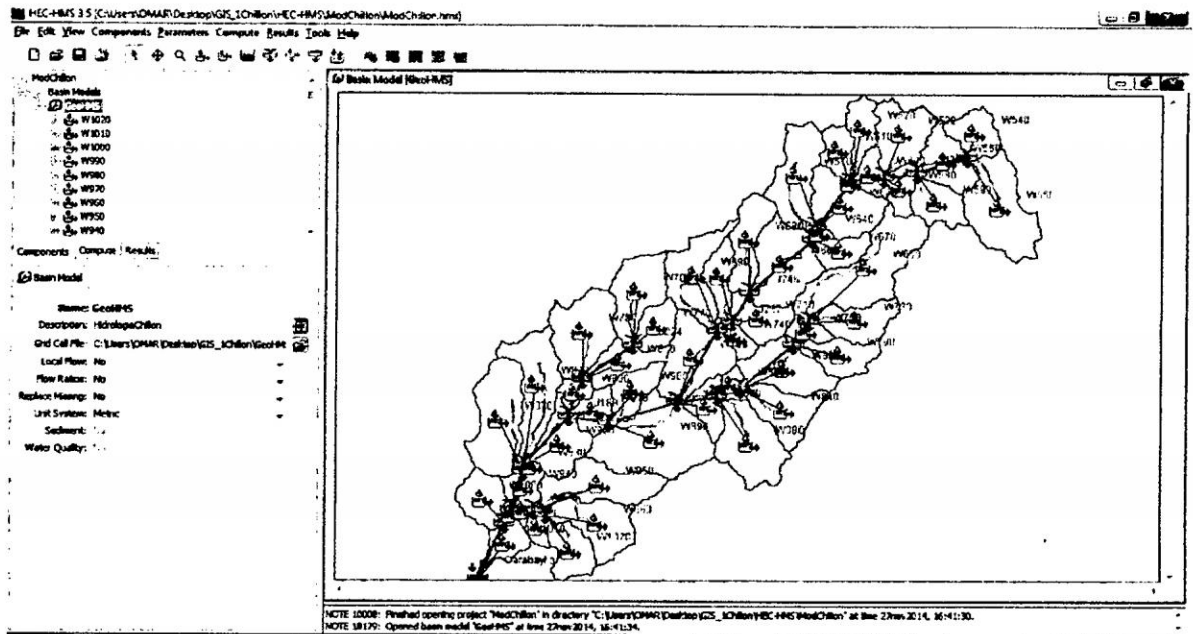


Figura 4.32: Modelo de la cuenca exportado a HEC-HMS

Canta, Arahuay, Huamantanga, Pariacancha, Huaros, Puente Madgalena), con los cuales se ha elaborado las tormentas de diseño para la simulación de la cuenca.

Mediante el método del *polígono de Thiessen* se han obtenido los hietogramas para cada subcuenca, y ha sido creadas y agregadas al modelo *HEC-HMS* como se muestra en la figura 4.33.

Modelo meteorológico: Los modelos meteorológicos son uno de los principales componentes de un proyecto. Su propósito principal es preparar las condiciones de contorno meteorológicas para las subcuencas. En consecuencia, debe crear por lo general al menos un modelo de cuenca antes de crear un modelo meteorológico. Un modelo meteorológico se puede utilizar con muchos modelos diferentes de cuenca. Sin embargo, los resultados calculados por el modelo meteorológico serán emparejados con las subcuencas de los modelos de cuencas utilizando el nombre de la subcuenca.

En esta componente principalmente se designan a cada subcuenca la precipitación de la estación al cual pertenece, esto se evalúa mediante los polígonos de Thiessen, el cual nos indica el área de influencia de cada estación, si una subcuenca se encuentra en la intersección del área de influencia de dos o más estaciones, se procede a calcular los pesos de cada estación en función a las áreas de influencia. Estas se realizan para las subcuencas SC-02, SC-06, SC-07, SC-12, S-14, SC-15, SC-20, SC-24, SC-25, SC-26,

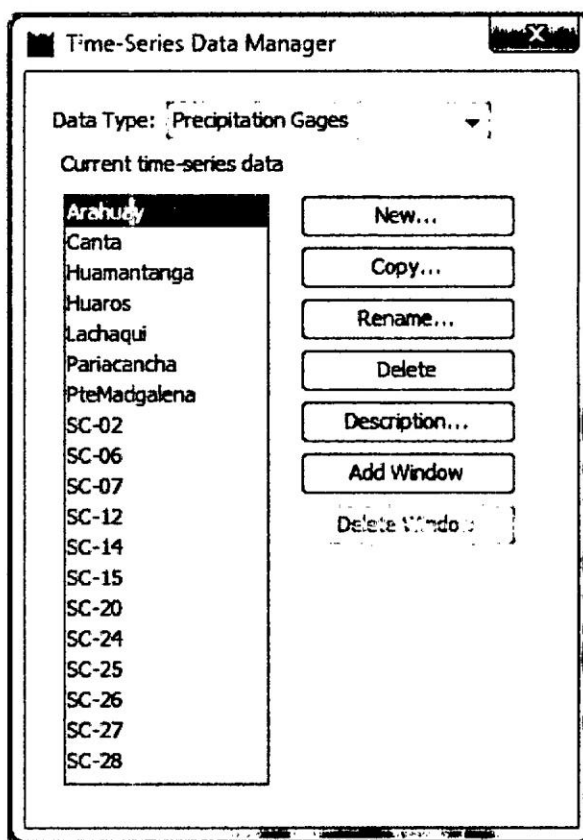


Figura 4.33: Creación de hietograma en el HEC-HMS

SC-27, SC-28, cuyos pesos se muestran en la tabla 4.4

Especificaciones de control: Las especificaciones de control son uno de los principales componentes de un proyecto, a pesar de que no contienen datos de muchos parámetros. Su principal propósito es para controlar cuándo se van a iniciar y detener las simulaciones, y qué intervalo de tiempo se utiliza en la simulación.

4.3.11. Resultados de la Simulación mediante el HEC-HMS

El objetivo del modelamiento es determinar el hidrograma de tormenta producto de una lluvia, con el fin de conocer los caudales pico y el tiempo en el que se producen. Un hidrograma de tormenta consta de dos componentes: la escorrentía directa y el flujo base.

Para nuestro caso práctico se ha considerado el flujo igual a cero, debido a que el caudal del río Chillón, tiene registros de caudales ceros en épocas de estiaje.

La escorrentía directa para el modelamiento de la cuenca del río Chillón, se han

obtenido mediante el modelo del *HEC-HMS*, con los parámetros geomorfológicos extraídos del software *ArcGIS 10.0*, y con los tormentas de diseño para cada subcuenca, de las siete estaciones pluviométricas con las que se cuenta, la cuenca del Rio chillon. El hidrograma de salida o caudal pico encontrado en nuestro punto de análisis, que es la Urbanizacion de Sol de Carabayllo es de $53.90 \text{ m}^3/\text{s}$, como se muestra en las siguientes figuras.

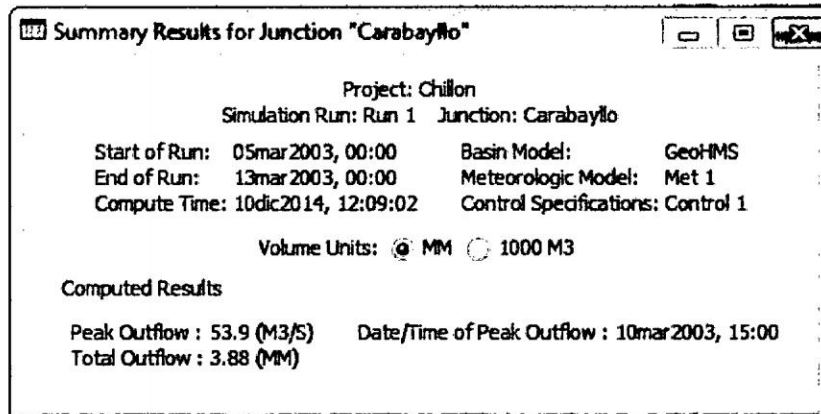


Figura 4.34: Descarga pico del modelamiento hidrológico del Rio Chillón

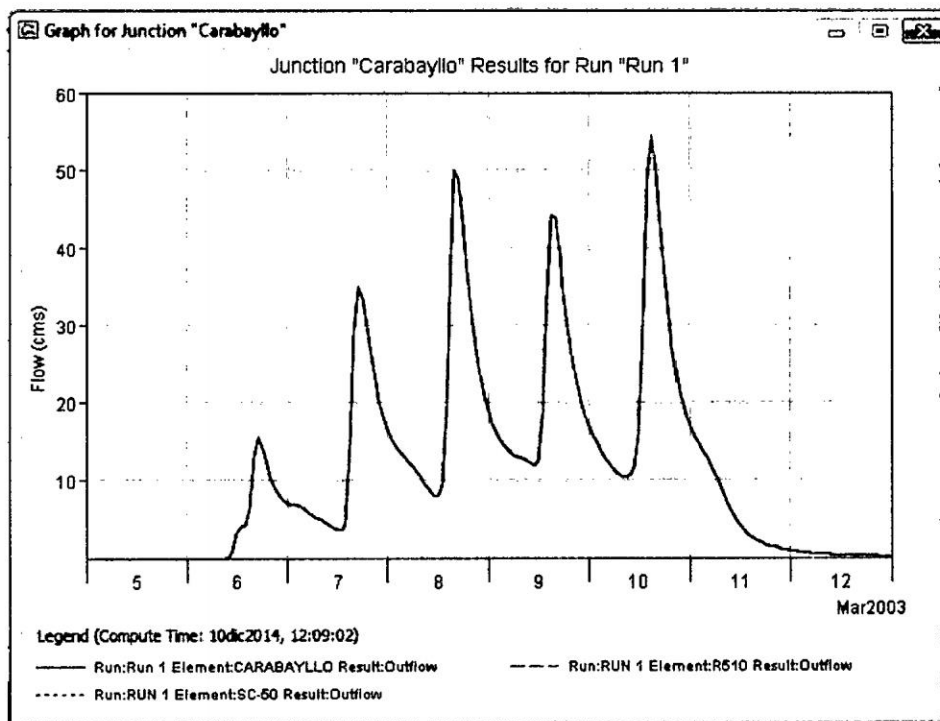


Figura 4.35: Hidrograma de salida en la Urbanización Sol de Carabayllo

4.3.12. Calibración Del Modelo

La calibración es un proceso por el cual se modifican los valores de algunos parámetros que contienen el modelo hasta que los resultados obtenidos a través de mismo se ajusten lo mejor posible a la información histórica.

Los modelos matemáticos incluidos en el *HEC-HMS*, que se simulan los procesos físicos que se llevan a cabo en una cuenca, requieren del ingreso de parámetros para su correcto funcionamiento. Las expresiones para el cálculo de los parámetros, en función de las características de la cuenca, fueron estudiadas anteriormente. Las expresiones y metodologías para calcular los parámetros del modelo permiten obtener estimaciones iniciales de los mismos, ya que la mayoría son formulas empíricas obtenidas a través de la observación y experimentación en otras cuencas. Para esto, los resultados obtenidos empleando estas fórmulas no deben considerarse como valores definitivos, sino que deben verificarse comparando los hidrogramas calculados con los hidrogramas observados en estaciones hidrométricas.

Por tanto los parámetros calculados sirven solo como buenas estimaciones iniciales. Los parámetros definitivos son los que se obtienen mediante el proceso de calibración.

La calibración puede realizarse en forma manual (mediante técnica del tanteo, modificando los valores de los parámetros) o en forma automática (opción del *HEC-HMS*).

Una medida cuantitativa del ajuste entre los hidrogramas calculados y observados es la función objetivo, la cual mide el grado de variación entre ambos. Si la función objetivo es igual a cero, significa que ambos hidrogramas coinciden exactamente. En la calibración automática los valores de los parámetros se modifican hasta que se logre minimizar la función objetivo, con lo cual se tienen los valores óptimos de los parámetros.

Para el caso de la calibración de nuestro *modelo hidrológico*, en primera instancia se realizó una calibración automática, logrando resultados no muy satisfactorios, por lo que se procedió a realizar la calibración manual, obteniendo mejores resultados.

El punto de comparación de caudales es la bocatoma del río Chillón ubicada en las coordenadas $11^{\circ}48'$ de latitud y $77^{\circ}00'$ de longitud, a 350 msnm. Los registros de caudales se muestran a continuación:

El *HEC-HMS* tiene cinco funciones objetivo, que puede ser utilizado para optimizar los parámetros del modelo. La función objetivo utilizada es la raíz cuadrada de la diferencia ponderada elevada al cuadrado.

Esta función compara cada una de las ordenadas, eleva estas diferencias al cuadrado, y la asigna un peso a cada una de estas diferencias. El peso asignado a cada ordenada es proporcional a la magnitud de la misma. A las ordenadas mayores al promedio de las ordenadas del hidrograma observado se les asigna un peso mayor a uno, y viceversa. Naturalmente, el pico del hidrograma tendrá mayor peso asignado. La suma de estas diferencias ponderadas elevadas al cuadrado se divide entre el número de ordenadas, y finalmente se halla la raíz cuadrada de este valor. Esta función también se mide implícitamente el ajuste entre las magnitudes de los picos, volúmenes, y tiempo para el cual se produce el pico de los hidrogramas.

$$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(i) - q_s(i))^2 \left(\frac{q_o(i) + q_o(prom)}{2q_o(prom)} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (4.10)$$

Hora	Q (m3/S)			
	08-mar-03	09-mar-03	10-mar-03	11-mar-03
01:00	-	52.3	41.69	34.09
02:00	-	53.82	48.39	35.51
03:00	-	53.23	42.42	33.78
04:00	-	51.46	39.64	30.52
05:00	-	50.29	38.23	30.6
06:00	-	49.79	36.77	29.45
07:00	-	46.96	36.26	27.97
08:00	-	44.23	33.73	26.39
09:00	-	43.06	33.29	26.39
10:00	-	41.22	32.87	27.33
11:00	-	40.12	27.28	25.82
12:00	36.45	38.95	30	25.5
13:00	35.07	38.98	33.79	26.17
14:00	36.94	40	32.13	25.51
15:00	36.45	37.81	30.75	23.63
16:00	37.72	36.79	30.46	22.98
17:00	36.81	37.04	29.33	23.86
18:00	36.49	36.85	30.36	21.49
19:00	34.77	36.99	28.74	22.75
20:00	36.45	37.17	28.81	24
21:00	36.69	37.05	26.83	24.37
22:00	51.14	38.15	31.1	23.7
23:00	53.49	40.97	30.6	26.39
00:00	53.2	39.92	33.13	32.25

Tabla 4.14: Descargas Reales horarios del Rio Chillón para calibración (SENAMHI)

Donde:

Z = Función Objetivo.

NQ = número de ordenadas calculadas en el hidrograma.

$q_o(i)$ = caudal observado.

$q_s(i)$ = caudal calculado.

$q_o(prom)$ = Caudal promedio.

La optimización de la función objetivo es un proceso de prueba y error. Para obtener el valor mínimo de la función objetivo el *HEC-HMS* tiene dos métodos de búsqueda automática, el utilizado será el de la gradiente univariada. Este método consiste en evaluar y ajustar un solo parámetro a la vez, manteniendo los demás parámetros constantes. Se evalúa la función objetivo para distintos valores de los parámetros, estos son modificados continuamente hasta que se alcance el valor mínimo de la función objetivo.

El *HEC-HMS* tiene en cuenta restricciones durante el proceso de optimización cada uno de los parámetros de los diversos modelos matemáticos que incluye el *HEC-HMS* tiene un rango de valores entre los cuales puede fluctuar cuando se realiza la optimización de la función objetivo, con el fin de mantener los límites razonables. Se excluyen aquellos valores que pudieran causar inestabilidad o errores en los cálculos o aquellos que no tengan un significado físico.

	Flujo Pico (m3/seg)	Tiempo Pico (m3/seg)
simulado	53.90	10/03/2003, 15:00 hrs
Observado	53.82	09/03/2003, 02:00 hrs
Diferencia	0.08	37:00 hrs

Tabla 4.15: Comparacion entre caudales pico simulado y observado (Elab. Propia)

De la comparación de los caudales pico observado y simulado, podemos notar que existen una considerable diferencia de tiempo entre el observado y simulado; esto podemos explicar debido a que la tormenta de diseño se modela con precipitaciones máximas de 24 horas y con modelos de probables ocurrencias de distribución de la precipitación en 24 horas; la estimación sería más exacta y real si es que se contara con datos registrados por pluviografos, que registran las precipitaciones de manera continua; otra

de las razones seria debido a que la precipitación es muy variado en su distribución espacial, esta deficiencia seria mejor aproximado con datos de precipitación obtenido con radares ó satelites, en las cuales representan mejor la distribución espacial de la precipitación.

Ademas de la comparación podemos notar que la diferencia entre el caudal pico simulado y observado es pequeño ($0.08 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo que podemos decir que los parámetros de la simulación hidrológica están calibrados.

4.4. Generación de máximas avenidas para diferentes periodos de retorno

Luego de calibrado el *modelo hidrológico*, se procedió a la generación de máximas avenidas para diferentes periodos de retorno siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Recopilación de registros pluviométricos (precipitaciones máximas en 24 horas) de cada estación de la cuenca durante los años 1992-2001 (ver Apéndice B). Debido a la coincidencia en el intervalo de tiempo registrado con esta información se elige la precipitación máxima en 24 horas para cada año.

Año	Canta	Lachaqui	Pariacancha	Huamantanga	Arahuay	Huaros
1992	0.9	20	26.8	19.4	12	11.7
1993	9.4	21.7	24.8	22.8	27	21
1994	15.5	30.9	27.7	22	16.5	26.4
1995	12.4	17.1	29.2	29.6	11.4	25
1996	16.7	17.7	17.7	19.5	18.5	23.6
1997	30	24.8	24.2	17.8	25.4	20.9
1998	30.5	26.8	38	33.6	30.2	20.5
1999	24.1	14.7	20.9	25.4	23.8	23
2000	19.2	19.5	25	27.5	31.7	22.3
2001	33.5	26.2	22.6	19.4	21.5	24.4

Tabla 4.16: Registro de datos históricos 1992-2001 (Elab. Propia)

2. Se aplican los diferentes métodos de análisis estadístico, ayudado por el programa *HEC-4*, para la generación de los caudales de diferentes periodos de retorno. Este programa nos muestra a que distribución se ajusta mejor los datos.

3. Procedemos a la desagregación de la precipitación generada por el programa *HEC-4*; de acuerdo a la curva de tormenta SCS tipo I.
4. Con la precipitación desagregada se genera la lluvia horaria, se ingresan al modelo *HEC-HMS* calibrado anteriormente.
5. Finalmente obtenemos los hidrogramas que son resultado del modelamiento hidrológico, con los cuales podemos conocer a las máximas avenidas para los diferentes periodos de retorno, en la siguiente figura se muestra el hidrograma de salida para un $Tr=500$ años.

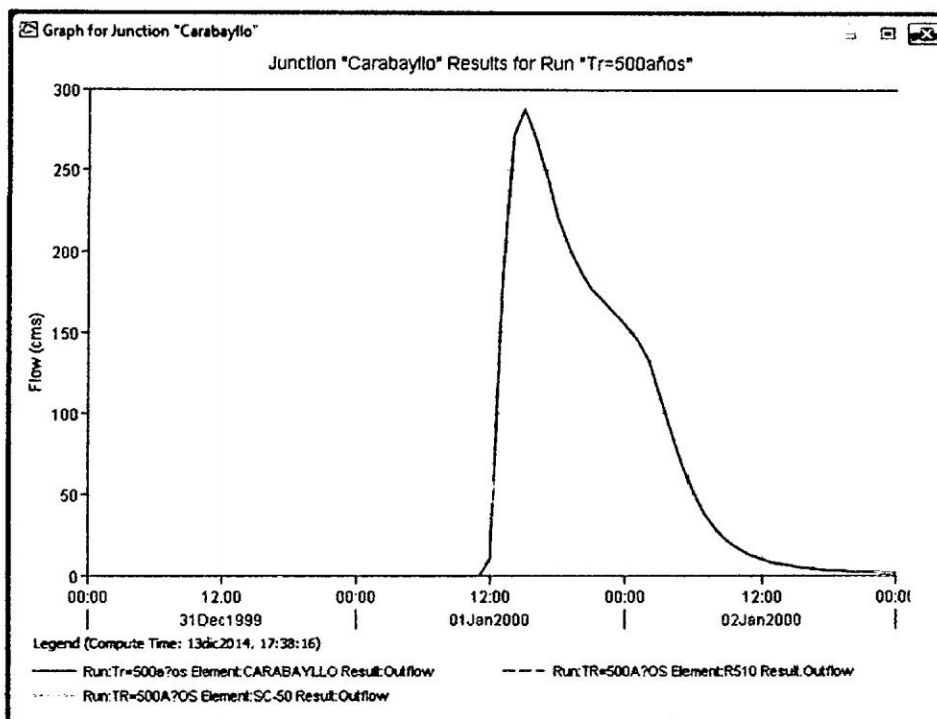


Figura 4.36: Hidrograma de salida para un $Tr=500$ años

6. Los caudales generados para los diferentes periodos de retorno son similares a los

Estacion	Distribucion	Tiempo de Retorno (años)					
		5	20	50	100	200	500
Canta	Normal	28.00	36.30	40.50	43.40	46.00	49.10
Lachaqui	Log-Gamma	26.00	31.70	35.20	37.80	40.40	43.70
Pariancha	Gumbel	29.60	35.90	39.90	42.80	45.80	49.70
Huamantanga	Weibull-3	27.60	33.70	37.30	39.80	42.10	45.10
Arahuay	Weibull-2	27.90	33.60	36.30	38.10	39.70	41.70
Huaros	Normal	25.30	28.60	30.20	31.30	32.30	33.60

Tabla 4.17: Resultados HEC-4 (Elab. Propia)

obtenidos en muchos estudios. Por lo que podemos decir que se realizó un buen modelamiento de la cuenca, cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro:

Estacion	Descarga Pico (m ³ /s) para diferentes Tr					
	5	20	50	100	200	500
Carabayllo	64.90	124.30	161.40	199.60	235.60	287.30

Tabla 4.18: Caudales Pico para diferentes Tr (Elab. Propia)

4.5. Modelación Hidráulica mediante Interface Geoespacial HEC-GeoRAS

En la actualidad, el gran crecimiento poblacional de la ciudad de Lima, ha generado demanda de terrenos para urbanizaciones, y se están utilizando terrenos que anteriormente fueron áreas de cultivo, a causa de ello los negocios inmobiliarios también han crecido sustancialmente, una de los cuales es "La Inmobiliaria Los Portales" que viene ejecutando la construcción de condominios y zonas residenciales en áreas aledañas al cauce del río Chillón, denominados Urbanización Sol de Carabayllo, perteneciente al distrito de Carabayllo. Estas urbanizaciones evidentemente están inminentes a sufrir inundaciones, si es que se producen caudales extraordinarios del Río Chillón, en este acápite analizaremos las posibles inundaciones, con los caudales generados para varios tiempos de retorno y posteriormente en el siguiente acápite se planteará un sistema SCADA para la previsión de inundaciones.

En el capítulo 5, *Modelación hidráulica mediante el SIG*, se ha descrito los pasos a seguir para realizar un modelamiento hidráulico con ayuda de software de sistemas de información geográfica en nuestro caso del Software *ArcGIS (ArcMap)* y herramientas de extensión *ArcHydro* y *HEC-GeoHMS*.

A continuación solo se describirá los pasos importantes y resultados de la *modelación hidráulica* y se determinará las planicies de *inundación* en la urbanización Sol de Carabayllo.

1. Se crea un nuevo archivo en *ArcMap*.

2. Se conecta el folder de trabajo, donde serán guardados en forma ordenada, los archivos que se requieren para la modelación.
3. Se recomienda contar con imágenes satelitales georeferenciados, de la zona de estudio, para visualizar mejor las planicies de inundación.

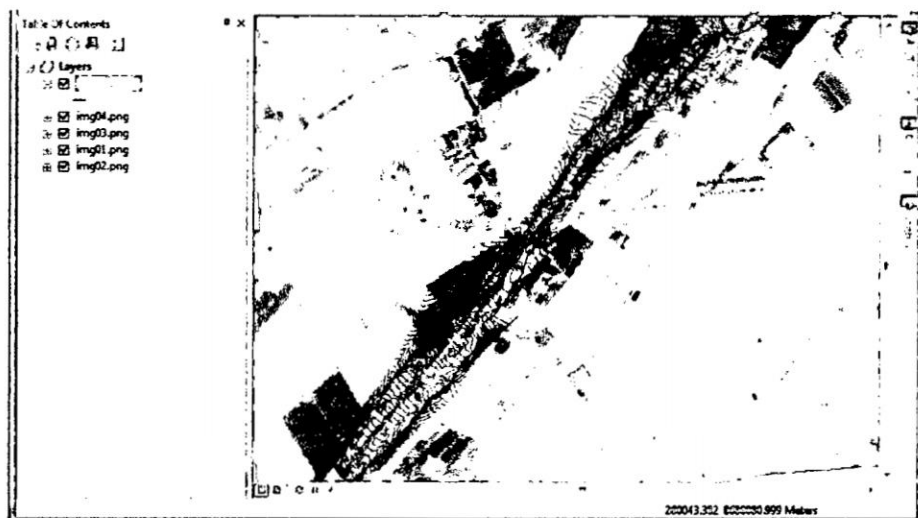


Figura 4.37: Conversión de curvas de nivel en formato CAD a shapefile

4. Debemos contar con un modelo digital de terreno (*MDT*), el cual se puede obtener de diversas maneras, pero en nuestro caso de estudio se generara a partir de curvas de nivel que se cuenta en formato *CAD* (*.dwg*), el cual puede ser convertido facilmente en formato *GIS* (*shapefile*).
5. Con las curvas de nivel en formato *shapefile*, se creara un *TIN*, que representa el terreno, se creara de la siguiente manera:
 - *Arctoolbox* → *3D Analyst Tools* → *TIN Mangement* → *Create TIN*
6. Ingresar la longitud aproximada de del tramo de análisis del rio , mediante la herramienta *TIN Data Area*, asi:
 - *Arctoolbox* → *3D Analyst Tools* → *TIN Mangement* → *Delineate TIN Data Area*.

A partir de esta parte se utilizaran las herramientas del *HEC-GeoRAS*



Figura 4.38: Modelo Digital del terreno mediante un TIN

7. Crear la capa del eje del río o más conocido como Línea de *Talweg*, activando el *editor*, trazar dicha línea, de aguas arriba hacia aguas abajo.
8. Se crea la capa de los bancos del río, y activado el *editor* se traza los *bancos*, de aguas arriba hacia aguas abajo, además se traza primero el lado izquierdo y luego el derecho.
9. Se crea las trayectorias de flujo (*flow path*), se activa el *editor* y se traza de aguas arriba hacia aguas abajo.
10. Se asigna el *talweg* del río así como las trayectorias del flujo mediante las herramientas *Assign RiverCode and Reach Code to River Select* y *Select Flowpath and Assing LineType attributes*, respectivamente.
11. Se crea las secciones transversales, y se configuran mediante la herramienta *Construct XS Cut Lines*, activando el *editor*.
12. Exportar datos para *HEC-RAS*
 - *HEC-GeoRAS* → *Ras Geometry* → *Export RAS Data*.
13. Abrir el *HEC-RAS* e importar los datos para su procesamiento y modelamiento.

abajo (downstream) y para condiciones de flujo en régimen supercrítico solo se requieren condiciones de contorno aguas arriba (upstream), si el flujo es mixto o no se conoce en que régimen se encuentra, se ingresan las condiciones de ambos extremos, tal es nuestro caso.

17. Antes de ejecutar la simulación del proyecto se requiere crear un "*plan*" que es el conjunto condiciones elegidas para efectuar el cálculo (geometría, caudal, régimen), seguidamente se ejecuta la simulación.
18. El último paso son la visualización de los resultados de la simulación, donde se puede ver el perfil del río, secciones transversales, valores de los diversos elementos del modelo hidráulico, etc. En nuestro caso nos interesa los resultados de las superficies de agua, el cual exportaremos al *ArcGIS* para mostrar la superficie de *inundación* del tramo en análisis, la exportación se realiza mediante:
 - *File* → *Export GIS Data*.
19. Ahora volvemos al *ArcMap* e importamos los datos exportados de la simulación de *HEC-RAS*, mediante
 - *HEC-GeoRAS* → *Ras Mapping* → *Import RAS Data*
20. Una vez importado el archivo se procede a generar las mapas de inundación mediante las herramientas del *HEC-GeoHMS*, de la siguiente manera:
 - *HEC-GeoRAS* → *Ras Mapping* → *Inundation mapping* → *Water Surface generation*.
 - *HEC-GeoRAS* → *Ras Mapping* → *Inundation mapping* → *Floodplain delineation Using Raster*.
21. Se genera el mapeo de las inundaciones para los diferentes tiempos de retorno ($Tr=50,100,200,500$ años), donde podemos notar que para caudales de $Tr=50$ años, ya se genera inundaciones en las áreas urbanizadas de la zona de la urbanización sol de Carabayllo (Ver Mapa N° 03), para un $Tr=500$ años es más notable las áreas de inundación (Ver Mapa N° 04), por lo tanto, dichas zonas se

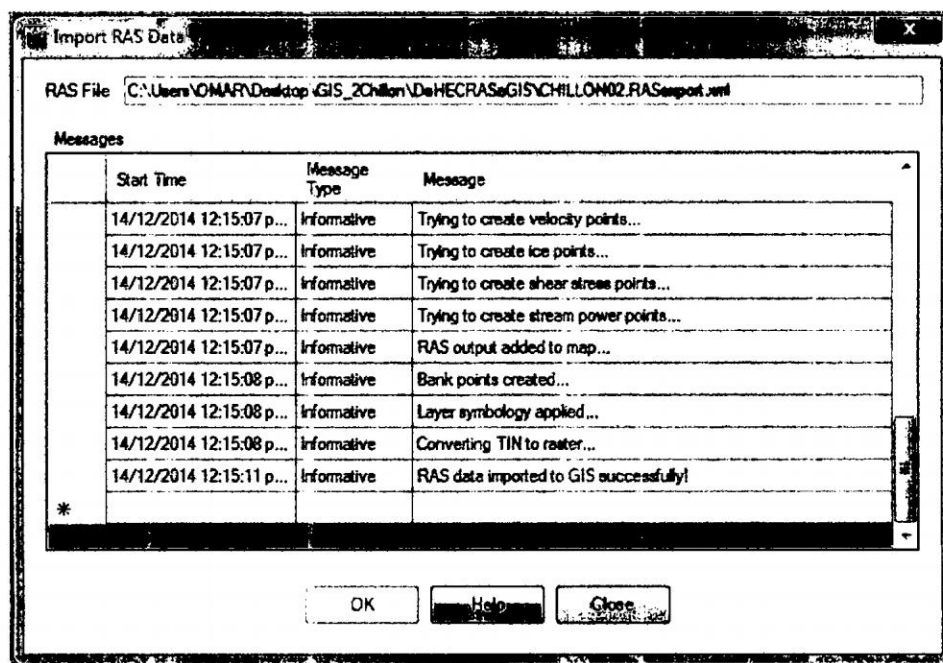


Figura 4.40: Datos de importación de HEC-RAS

encuentran expuestas a inundaciones, por lo que se propone un modelo *SCADA* para el control de avenidas en el Río Chillón, tramo del distrito de Carabayllo, zona de la urbanización Sol de Carabayllo.

4.6. Propuesta de modelo SCADA para control de avenidas en el Río Chillón

4.6.1. Componentes del modelo

El principal componente físico de un sistema de alerta temprana son las estaciones de medición automática ya sean pluviométricas o hidrométricas estas a su vez se componen de otros elementos que son indispensables para su correcto funcionamiento.

En la cuenca del Río Chillón se recomienda la instalación de estaciones automáticas, actualmente solo existen dos estaciones automáticas con transmisión de datos en tiempo real (Estación Huaros y puente Magdalena), una estación automática pero sin transmisión en tiempo real (Estación Arahuy); el resto son estaciones convencionales, que además, no funcionan de una manera adecuada y organizada.

Cada estación pluviométrica automática de transmisión de datos en tiempo real

debe constar básicamente del siguiente equipo: un pluviómetro, un panel solar, una batería, una antena y un módulo electrónico de registro y control instalado en el interior de un gabinete metálico.

Dada la importancia de operar en forma continua las estaciones, especialmente bajo condiciones ambientales muy adversas, por ejemplo durante una tormenta, es necesario diseñar la estación considerando dichas situaciones adversas y con protecciones especiales, evidentemente la alimentación eléctrica de los equipos es esencial, para garantizar un suministro permanente e independiente de energía, se necesita equipar las estaciones de registro de precipitación con una batería y un panel solar, además de un circuito para controlar la carga y la regulación del voltaje.

De esta manera en el día la celda convierte la energía solar en electricidad y carga la batería que de noche toma esta carga para su funcionamiento, los equipos se deben diseñar y dimensionar de manera que, aun bajo condiciones prolongadas de intensas nubladas en los cuales el panel es poco eficiente en su proceso de conversión de luz solar en energía eléctrica, la estación pudiese operar sin problemas por lapsos de varias semanas para el registro de lluvia, cada estación debe contar con un sensor y un contador electromecánico de respaldo.

En el caso de estaciones hidrométricas automáticas el tipo de almacenamiento de datos y de transmisión es similar al de las estaciones pluviométricas, es decir se puede componer de un panel solar, una batería, una antena y un módulo electrónico de registro y control instalado en el interior de un gabinete metálico.

Para la medición de niveles de caudal existen diversos tipos de equipos por ejemplo, sensor de flotación, sensor neumático de presión y sensor tipo radar.

Para nuestro caso de la cuenca del chillón se recomienda el sensor tipo radar, ya que, para su funcionamiento no requiere estar en contacto con el agua, evitando así malos funcionamientos ocasionados por choque de piedras u otros elementos que el Río Chillón transporta en épocas de avenidas.

4.6.2. Reglas de Operación

Como ya conoce, un sistema *SCADA* de alerta temprana de inundaciones, está basado en un conjunto de estaciones pluviométricas e hidrométricas ubicadas en zonas

estratégicas y adecuadamente distribuidas de la cuenca a monitorear.

Estas estaciones miden la precipitación acumulada, la intensidad de lluvia y los niveles de los cauces y envían la información por telemetría a una estación central de registro que debe estar en funcionamiento las 24 horas del día.

La transmisión de los datos desde las estaciones automáticas (pluviométricas e hidrométricas) hacia la estación central será en tiempo real y se realizara mediante el uso de satélites. Se propone que la frecuencia mínima de medición y transmisión de datos sea de una hora, es decir, que no se debe de pasar de una hora sin tener datos de todas las estaciones.

El uso de la transmisión vía radio frecuencia no es recomendable por la dificultad de encontrar una línea de visión entre estaciones remota y estación central, debido principalmente a la topografía de la cuenca.

La estación central, recoge, procesa y analiza, para esto se necesita de un programa que permite la conversión de las señales de los pluviómetros en milímetros de lluvia (este programa debe ser proporcionado por el proveedor de los pluviómetros automáticos) y luego estos datos serán procesados y analizados por el *modelo hidrológico* para el pronóstico de avenidas, creado especialmente para la cuenca, la información de niveles de caudal recogidas por las estaciones hidrométricas servirá para la calibración y ajuste del *modelo hidrológico*.

Al sobrepasar ciertos umbrales establecidos, se activan alarmas indicando a los usuarios, principalmente autoridades de los distritos afectados, defensa civil, policía nacional y bomberos, sobre el peligro de la posible ocurrencia de *inundaciones* que pudiesen provocar daños en las zonas vulnerables, y poner en marcha un plan de emergencia previamente establecido.

como se muestra en las mapas de *inundación*, la zona de la urbanización de Sol de Carabaylo, se encuentra en una inminente riesgo de *inundación*, para caudales generados con un $Tr=50$ años, y mas aun para una caudal de un $Tr=500$ años, por ello se recomienda la instalación de un sistema *SCADA* para previsión de inundaciones, con las características arriba descritas.

4.6.3. Implementación del proyecto

En la implementación del proyecto se está considerando la instalación de 5 estaciones pluviométricas automáticas (Arahuay, Huamantanga, Lachaqui, Pariacancha, Canta) que deberán mantener similitud con las ya instaladas en Huaros y puente Magdalena. Y la instalación de una estación hidrométrica automática en la parte baja de la cuenca para completar las mediciones de la estación hidrométrica automática del puente Magdalena.

La ubicación de las nuevas estaciones serán en los mismos lugares de las estaciones pluviométricas convencionales de la cuenca, y deberán ser administradas por *SENAMHI*.

4.6.4. Programación

para realizar la programación e implementación del sistema *SCADA* de control de avenidas se ha tomado en cuenta la programación propuesta para el *SAT* de la cuenca del río Piura.

- Movilización
- Preparación de infraestructura de estaciones remotas.
- Preparación de infraestructura de estación central.
- Transporte, aduanas y almacenaje.
- Instalación del sistema de hardware (instalación de equipos pluviométricos e hidrométricos)
- Instalación de paquetes software.
- Pruebas de ajuste y puesta en operación.
- Capacitación del personal
- Desmovilización.

4.6.5. Presupuesto Referencial de instalación

A continuación se presenta un presupuesto referencial de la instalación de un sistema SCADA de previsión de avenidas, ver cuadro 4.19; así como también el un presupuesto referencial de la operación y mantenimiento anual ver cuadro 4.20.

Fuente: estos datos son extraídos de la ponencia: Modelamiento en ingeniería Hidráulica, aplicación al control de inundaciones - HIDRODIA - GEAAH - FIC, por el MSc. Ing. Roberto Campaña Toro.

Item	Descripción	Unidad	Metrado	Costo Unitario	Subtotal
01	Obras Preliminares				
1.01	Movilizacion y Desmovilizacion	und	5.0	\$300.00	\$1,500.00
1.02	Trazo y Replanteo	und	5.0	\$100.00	\$500.00
1.03	Cartel de Obra	und	5.0	\$40.00	\$200.00
02	Infraestructura				
2.01	Losa de concreto para estacion remota	und	5.0	\$1,500.00	\$7,500.00
2.02	Cerco de proteccion con malla y puerta	und	5.0	\$800.00	\$4,000.00
2.03	Preparacion y/o remodelacion est. central	und	1.0	\$2,000.00	\$2,000.00
2.04	Losa para caseta de grupo electrogeno	und	1.0	\$800.00	\$800.00
03	Equipamiento				
3.01	pluviometro automatico	und	5.0	\$1,997.00	\$9,985.00
3.02	Soporte para pluviometro	und	5.0	\$212.00	\$1,060.00
3.03	Panel Solar	und	5.0	\$1,195.00	\$5,975.00
3.04	Equipamiento adicional y transmision	und	5.0	\$5,247.00	\$26,235.00
3.05	Sistema de proteccion, pararrayos	und	5.0	\$100.00	\$500.00
3.06	Grupo Electronico	und	1.0	\$1,400.00	\$1,400.00
3.07	Equipo de aire acondicionado	und	2.0	\$600.00	\$1,200.00
3.08	Equipamiento y muebles estaion central	glb	1.0	\$1,490.00	\$1,490.00
3.09	Equipo de computo	glb	1.0	\$1,800.00	\$1,800.00
3.10	Software	glb	1.0	\$2,492.00	\$2,492.00
3.11	Montaje	glb	1.0	\$600.00	\$600.00
04	Varios				
4.01	Stock basico de repuestos	glb	1.0	\$1,000.00	\$1,000.00
4.02	Herramientas reparacion	glb	1.0	\$1,500.00	\$1,500.00
4.03	Herramientas mantenimiento	glb	1.0	\$1,200.00	\$1,200.00
COSTO TOTAL DIRECTO					\$72,937.00

Tabla 4.19: Presupuesto referencial de instalación de un SCADA

Item	Descripcion	Unidad	Metrado	Costo Unitario	Subtotal
01	Local				
1.01	Alquiler de estacion central	mes	12	\$200.00	\$2,400.00
02	Personal				
2.01	Jefe del sistema de alerta	mes	12	\$900.00	\$10,800.00
2.02	Tecnico de mantenimiento	mes	12	\$460.00	\$5,520.00
03	Mantenimiento de Estaciones				
3.01	Movilidad	mes	12	\$242.00	\$2,904.00
3.02	Viaticos	mes	12	\$91.00	\$1,092.00
3.03	Stock adicional de repuestos	gbl	1	\$1,000.00	\$1,000.00
COSTO TOTAL DIRECTO					\$23,716.00

Tabla 4.20: Presupuesto referencial de operación y mantenimiento anual

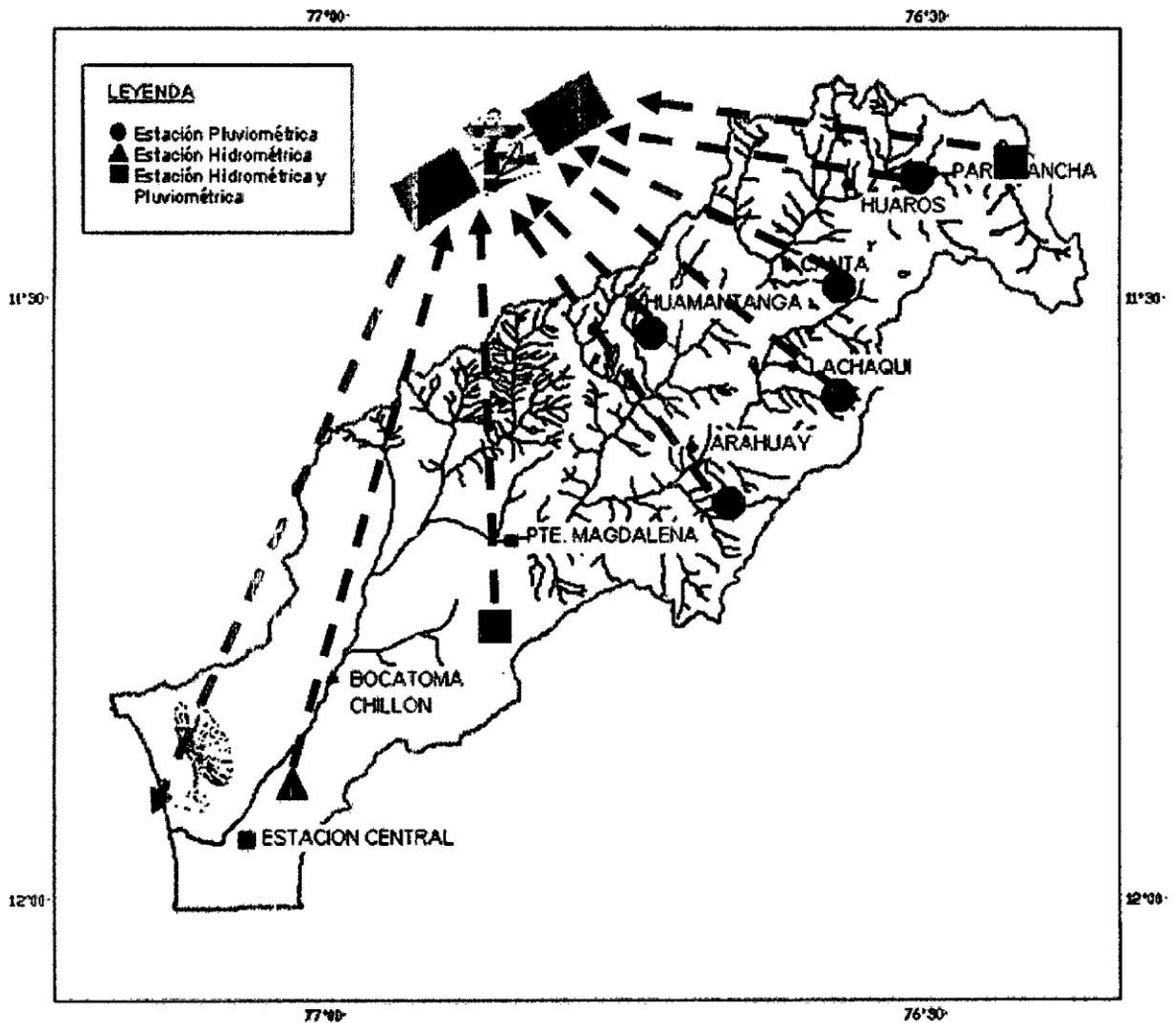


Figura 4.41: Componentes de la Propuesta de un SCADA para la prevision de crecidas

Parte V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Capitulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- De la investigación sobre la estimación de la precipitación mediante satélites, podemos decir que tiene una gran ventaja sobre la precipitación obtenida de los pluviómetros o pluviografos convencionales, ya que esta precipitación, representa mejor la variabilidad espacial de la lluvia. pero deben de ser calibrados para su uso.
- El desarrollo de la tecnología ha supuesto un avance considerable en la prevención de eventos y anticipación a fenómenos adversos en la gestión de los recursos hidricos en una cuenca, el cual mediante el uso de un sistema integrado (hardware, software), se puede predecir eventos de avenidas en uno o varios puntos de aforo con anticipación, el tiempo de anticipación dependerá de las características morfogeológicas de la cuenca. tal como se pudo apreciar de la investigación de los sistemas SCADA.
- Los SIG son un potente conjunto de herramientas para recoger, almacenar, consultar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real.
- En la actualidad existen numerosos softwares, asi como numerosos modelos hidrológicos e hidráulicos para simular respuestas a eventos particulares; en nuestro caso particular se ha utilizado el software ArcGIS y aplicaciones para modelar la cuenca, debido a que este software es de facil acceso y es de uso muy

difundido a nivel mundial, lográndose simulaciones con muy buena aproximación, comparando con otros estudios.

- El software ArcGIS, que es el producto estandarte de ESRI (Environmental Systems Research Institute), se compone de aplicaciones y un servidor independiente; la aplicación de nuestro interés son la interacción con los programas del HEC (Hydrologic Engineering Center), mediante sus extensiones HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS, diseñado con fin de procesar datos georreferenciados y modelar con mayor precision las características y parámetros geoespaciales, para la toma de decisiones y una correcta y ordenada disposicion de los datos.
- La cuenca del rio Chillón se ha discretizado en 51 subcuencas, tal que cada subcuenca se ha tomado como una unidad de respuesta hidrológica independiente, el cual nos permitió una mejor distribución de la precipitación disponible de las estaciones pluviométricas y mediante el polígono de Thiesen se determinó el área de influencia de cada subcuenca como podemos ver en la Tabla 4.4. Lográndose así una distribución más real de la precipitación y por ende una mejor aproximación en la determinación del caudal en nuestro punto de interés. .
- De estudio de los modelos de tránsito de caudales en ríos, se pudo apreciar la gran variedad de modelos usados a nivel mundial, muchos de los cuales son de difícil acceso y restringidos; eligiendo para nuestro caso el modelo del HEC, que es de fácil acceso y muy difundido en nuestro país; obteniéndose resultados satisfactorios.
- Una vez definido nuestras herramientas de modelamiento se procedió a la discretización de la cuenca en subcuencas, encontrándose 51 subcuencas.
- podemos decir que para un adecuado modelamiento de la cuenca es fundamental una adecuada estimación de los parámetros de la cuenca, en nuestro caso el principal parametro es el Numero de Curva de Escorrentía (CN), del cual depende en gran medida el hidrograma en la salida de la cuenca y este mas acorde a la realidad,ya que es un parámetro muy sencible. para lo cual fue necesario la calibración de la misma.

- Para la estimación del Número de curva de escurrentía, se utilizó el Mapa Ecológico del Perú, que proporciona el INRENA, para lo cual se extrajo dicha mapa para la Cuenca del Río Chillón (Ver mapa 05), en donde se describe las características de uso de suelo, vegetación y uso de la tierras, dándonos el criterio suficiente para mediante las tablas proporcionadas por el SCS para diversos tipos de suelo, estimar adecuadamente el Número de curva (CN), que en la calibración podemos comprobar que son bastante aproximados.
- Podemos notar que en la comparación de la descarga de salida simulada vs descarga observada (tabla 4.15), existe una diferencia considerable en el tiempo pico, esto sería debido a que la precipitación utilizada para la simulación es una precipitación máxima en 24 hrs, que es lo que registra las estaciones con las que se cuenta, la aproximación sería más cercana si es que tuvieran registros horarios de precipitación o continuos como las que se obtienen de los pluviógrafos.
- Se generaron máximas avenidas para diferentes periodos de retorno, mediante datos los históricos de precipitación máxima en 24 horas, periodo 1991-2001, con los que se modeló y se obtuvo hidrogramas de salida en nuestro punto de aforo (Urbanización sol de Carabayllo). Modelando estos caudales en el tramo de aforo, se obtuvo que se producirán inundaciones para los diferentes caudales obtenidos.
- Teniendo en cuenta las inminentes inundaciones debido a los caudales extraordinarios se plantea instalar un sistema SCADA de previsión de avenidas en la cuenca del Río Chillón, para así alertar a la población y poner en marcha un plan de emergencia para evacuar la zona de inminente inundación.
- El sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones, debería contar con estaciones hidrométricas y pluviométricas que transmitan la información en tiempo real.
- El costo estimado de la instalación de un sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones, asciende a \$ 73,263.00 dolares americanos.
- El costo estimado de la operación y mantenimiento anual del sistema SCADA de alerta temprana de inundaciones, asciende a \$ 23,716.00 dolares americanos.

5.2. Recomendaciones

- Tener bastante cuidado y criterio para utilizar los softwares de modelamiento, sobre todo en la estimación de los parámetros y es indispensable calibrarlos, para que modelamiento tenga validez, y este acorde a la realidad, ya que un desconocimiento de estos puede generar sub-estimaciones o sobre-estimaciones a momento de la toma de decisiones.
- Modernizar las estaciones hidrométricas y pluviométricas, y realizar el adecuado mantenimiento anualmente, para así obtener datos confiables y tener mayor precisión al momento del modelamiento de la cuenca, actualmente la institución encargada del manejo y control de los datos meteorológicos e hidrológicos SENAMHI, no realiza un adecuado mantenimiento de dichas estaciones.
- A las instituciones públicas y privadas, del rubro de Gestión de recursos hídricos y afines, implementar modernas técnicas para la obtención de datos hidrológicos tal es el caso de: obtención de precipitación satelital y sistemas SCADA de alerta temprana.
- De acuerdo al análisis general de la tesis, podemos notar una gran potencialidad de continuar la investigación en el tema de modelamiento hidrológico mediante precipitación obtenido de satélites, ya que actualmente podemos acceder fácilmente a estos datos mediante el internet, como se ha descrito en el capítulo 2; existen varios modelos para estimar estas precipitaciones, pero requiere de una adecuada calibración, el cual podría ser usado en zonas no aforadas, y con escasos registros de precipitación, el cual es un problema muy común en nuestro ámbito nacional, trabajar con datos extrapolados, que traen consigo imprecisiones e incertidumbre en los diseños.

Apéndice A

Zonas de Vida Ecologicas - Cuenca Rio Chillon

Desierto desecado - Subtropical (dd-S)

- **Relieve y Suelos:** El relieve topográfico es plano a ligeramente ondulado, variando a abrupto, en los cerros aislados o en la cordillera antigua de la costa. El escenario edáfico está representado por suelos de textura variable, entre ligeros a finos, con cementaciones salinas, cálcicas o gípsicas (yeso) y con incipiente horizonte a superficial con menos de 1% de materia orgánica. Los grupos edafogenicos representativos son los Yermosoles cálcicos o gípsicos, Solonchaks (suelos salinos), Fluviosoles (propio de los valles costeros irrigados) y, donde predominan las arenas, los Regosoles, como formaciones dunosas. Los litosoles y las formaciones líticas son típicos de aquellas áreas empinadas en donde aparece el material rocoso. Completan el cuadro edáfico suelos de naturaleza volcánica (Andosoles vitricos).
- **Vegetación:** La vegetación no existe o es muy escasa, apareciendo especies halófitas distribuidas en pequeñas manchas verdes dentro del extenso y monótono arenal grisáceo eólico.
- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Mayormente, el uso agropecuario se ubica en los valles costeros que disponen de riego permanente; en ellos, se han desarrollado una agricultura amplia y diversificada, incluyendo pastizales,

con rendimientos unitarios de los más elevados del país. Potencialmente, en la mayoría de las tierras de estas zonas de vida, actualmente eriazas, es posible mediante riego, llevar a cabo o fijar una agricultura de carácter permanente y económicamente productiva.

Desierto Superarido - Subtropical (ds-S)

- **Relieve y Suelos:** El relieve varía desde plano u ondulaciones hasta inclinado a empinado, este último cuando las Zonas de Vida cubren las estribaciones de los Andes Occidentales. Los suelos son generalmente profundos, de texturas variables y acumulan calcio y yeso (Yermosoles y Xerosoles). Donde dominan las arenas profundas aparecen los Regosoles y cuando los suelos son someros y predominan materiales fragmentados o rocosos, los litosoles. Los Fluvisoles, de morfología estratificada, aparecen a lo largo de los cursos o valles aluviales que cortan a estas Zonas de Vida.
- **Vegetación:** Aquí, la vegetación es un tanto más abundante que las zonas de Vida del desierto desecado? Premontano Tropical o en el desierto desecado Subtropical. Aparecen arbustos xerófilos, como gramíneas efímeras, en aquellos lugares un tanto más húmedos, propios de las vegas y lechos de los ríos secos o al lado de las riberas de los valles aluviales irrigados; así, se tiene el "algarrobo", "sapote" y "faique" de los géneros (*Prosopis*, *Capparis* y *Accasia*, respectivamente), "caña brava" (*Gynerium sagittatum*), "pájaro bobo" (*Tesaria integrifolia*) y "Chilca" (*Baccharis* sp.) entre los más importantes.
- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** La mayor extensión de esta Zona de Vida carece de actividad agrícola y pecuaria, salvo en aquellos lugares en los que se dispone de agua de regadío permanente. Los terrenos con riego acusan un alto valor agrícola, debido a las condiciones ecológicas muy favorables para la fijación de un amplio cuadro de cultivos tropicales y subtropicales, tanto intensivos como permanentes.

Desierto Perarido - Premontano Tropical (dp-PT)

- **Relieve y Suelos:** La configuración topográfica varía desde suave plano colindo, propio de la planicies de la llanura costera del departamento de Piura, hasta muy accidentado, característico de las laderas de la vertiente occidental andina. El molde edáfico es bastante heterogéneo, apareciendo suelos relativamente profundos, de texturas variadas, que acumulan calcio y yeso (Yermosoles y Xerosoles) así como suelos muy arcillosos y profundos (Vertisoles o integrados a estos), suelos arenosos (Regosoles) así como suelos de morfología netamente estratificada, de origen aluvionico y texturas variadas (Fluvisoles). Los suelos de la vertiente occidental andina se caracterizan por ser rocosos o pañascosos y muy someros (Litosoles y Formaciones Líticas).
- **Vegetación:** El escenario vegetacional es más abundante que en los desiertos superaridos, observando manchales de "algarrobo" (*Prosopis juliflora*) "bichayo" (*Copparis ovalifolia*) "sapote" (*Copparis angulata*) "charramusque" (*Pectis* sp.) y "mostaza" (*Brassica campestris*), entre las más importantes. Entre las cactáceas que tipifican el escenario vegetativo, aparecen los cactus gigantes prismáticos (*Cerus macrostibas*), ubicados en el nivel superior de esta Zona de Vida en su límite con el matorral desértico.
- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Las tierras irrigadas dentro de esta Zona de Vida son de muy alto valor agrícola. Actualmente, son utilizadas para la siembra de una gran variedad de cultivos económicos tales como el algodón, caña de azúcar, arroz, frutales, hortalizas y plantas forrajeras para ganadería extensiva y estabulada.

Desierto Perarido - Montano Bajo Tropical (dp-MBT)

Desierto Perarido - Montano Bajo SubTropical (dp-MBS)

- **Relieve y Suelos:** La configuración topográfica es predominantemente accidentada, con pendientes pronunciadas que sobrepasan el 70%, alternando con algunas áreas de topografía más suave. Los suelos son generalmente superficiales (Litosoles) y donde mejora la topografía aparecen los Xerosoles de textura media y general-

mente calcáreas o gípsicos (yeso). Asimismo, se tiene androsoles vitricos (dominados por materiales volcánicos).

- **Vegetación:** La vegetación es escasa y se circunscribe a hierbas anuales de vida efímera, dominando las gramíneas así como arbustos, subarbustos y cactaceas de los géneros *Cereus* y *Opuntia*. Se puede puntualizar al "*Gereus candelaris*" que presenta una forma de candelabro gigante. "*Opuntia subulata*" y la "*fraseria fruticosa*", que crece de forma dispersa o entremezclada con otras plantas.
- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Donde se dispone de riego permanente, prosperan cultivos de hortalizas, maíz, trigo, papa, alfalfa y frutales Prunoideos y Pomoideos (de hueso). En general, se presta para cultivos tanto intensivos como permanentes de tendencia Criofilica.

Matorral Desértico - Premontano Tropical (md-PT)

- **Relieve y Suelos:** El relieve topográfico varía entre ondulado y quebrado con algunas áreas de pendientes suaves (parte central de los vales costeros). El escenario edáfico es muy similar a lo indicado para las zonas de vida monte espinoso - tropical y matorral desértico tropical, a excepción de la parte meridional de esta formación, departamentos de Lima, Ica y Arequipa, donde predominan suelos delgados de naturaleza Litosolica esencialmente. Regosoles de naturaleza arenosa son bastante frecuentes hacia la altura de Olmos, asociados con fluviosoles de morfología estratificada. Andosoles vítricos aparecen en la zona de arequipa.
- **Vegetación:** Está compuesta por arboles pequeños, algunas veces muy achaparrados, como el "sapote" (*Capparis angulada*); "algarrobo" (*Prosopis juliflora*) y arbustos como el "Bichayo" (*Capparis ovalifolia*) así como una vegetación herbácea rala en su mayoría, como gramíneas pequeñas y de corto periodo vegetativo. Las cactáceas se encuentran presentes, principalmente y como indicador el *cecus macrostibas*, cactus columnar prismático gigante. Otras especies muy comunes, especialmente en los valles encajonados de la vertiente occidental, son el "molle" (*Schinus molle*); "Tara" (*Caesalpinia tinctoria*); "falque" (*Acacia* sp.); "caña brava" (*Gynerium* sp.) y el "pájaro bobo" (*tessaria integrifolia*).

- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** La mayor parte de los terrenos de estas zonas de vida es utilizada para el pastoreo de ganado caprino, aprovechando los pastos estacionales que prosperan durante el periodo de lluvias veraniegas. En los terrenos con dotación de riego. Se lleva a cabo una agricultura en pequeña escala, muchas veces solamente con carácter de subsistencia. El aprovechamiento del bosque como recurso maderero ha estado centrado a la extracción del "algarrobo" para a producción de carbón vegetal y construcciones rurales así como para la utilización de la vainas, del alto contenido proteico, para la alimentación de ganado vacuno y caprino. Asimismo la madera "hualtaco" (*Loxopterygium husango*) para la fabricación de parquet; arboles pequeños y "carrizo" (*Arundo donax*) para la construcción de casas de campo y la "caña brava" (*Gynerium sagittarum*) para la fabricación de canastas y esteras.

Matorral Desértico - Montano Bajo Tropical (md-MBT)

- **Relieve y Suelos:** El relieve topográfico por lo general grada de quebrado a abrupto, siendo muy escasas las áreas que presentan un paisaje ondulado o suave. Los suelos son, por lo general, superficiales, de naturaleza litosolica y, en los lugares donde la topografía se forma suave, aparecen grupos de suelo un tanto más profundo, de naturaleza calcárea, muchas veces con impregnación volcánica, propios del departamento de Arequipa. Pertenecen a los grupos edafogenicos de Yermosoles, Xerosoles y Andosoles vitricos. A lo largo del litoral, predominan los suelos litosolicos y donde el suelo es un poco más profundo y arenoso, aparecen las formas Regosólicas.
- **Vegetación:** La vegetación es escasa y de tipo xerofítico. Durante la época de lluvias, desarrolla una cubierta temporal de hierbas efímeras, entre las que se observan algunas gramíneas anuales aprovechadas por el ganado caprino, principalmente. Las especies de cataceas son escasa. En el matorral desértico ? Montano Bajo Subtropical, es característica la presencia del *Cerus candelaris*, que se distingue por la configuración de un gigantesco candelabro de proximadamente 5 metros de altura. En las laderas escarpadas de los cerros, son frecuentes las "achupallas" (*puya spp.*) y la "pacpa" (*Fourcroya sp.*). a lo largo de los cursos

de agua, el monte ribereño esta compuesto por el "sauce" (*salix* sp.); "aliso" (*Alnus jorullensis*), sobre cuyas ramas se ven abundantes epifitas (*Tillandsia* sp.); "Chilca" (*Baccharis* sp.) y el "pájaro bobo" (*Tessaria integrifolia*).

- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Son Zonas de vida donde se lleva a cabo una agricultura bajo riego y de subsistencia, no siendo posible la fijación de cultivos de secano ni tampoco la siembra de cultivos propios del Trópico (Premontano) o Subtropical, debido a las temperaturas promedio más bajas y a la ocurrencia de escarchas durante algunas noches de los meses de invierno (Junio, Julio, Agosto). Los cultivos que prosperan bien en estas Zonas de Vida son el Maíz, los cereales de grano chico (trigo), papa, hortalizas, frutales de climas templados (de hueso), alfalfa y otros forrajes. Desde el punto de vista forestal, tiene muchas limitaciones; sin embargo, existen plantas de "eucalipto" (*Eucalyptus*).

Estepa Espinosa - Montano Bajo Tropical (ee-MBT)

- **Relieve y Suelos:** El relieve topográfico es dominante empinado, ya que fisiográficamente ocupan las laderas largas del flanco occidental y las paredes de los valles interandinos. El escenario edáfico está representado por suelos de naturaleza calcárea, relativamente profundos, de textura tendente a arcillosa, bajos en el contenido orgánico, pertenecientes a los grupos edafogénicos Xerosoles, Kastanozems y Litosoles sobre materiales litológicos diversos.
- **Vegetación:** Presenta una fisonomía dominante semiárida que se cubre durante los meses de lluvias veraniegas de una vegetación estacional que es aprovechada para el pastoreo de ganado caprino, principalmente. Durante el resto del año, prevalecen especies xerofíticas. Las especies vegetales indicadoras de esta zona de vida son: la "tuna", "chamana" y el "molle" en los lugares un poco más abrigados y el "ccasi" (*Haplorus*, peruviana) en las partes elevadas, muy cerca a los límites con la estepa Montana. Se observa esta última especie en las laderas de los cerros que circundan el río Mantaro entre la Mejorada y Mayoc. Entre las gramíneas, se distribuyen especies de los géneros *Stipa*, *Melica*, *Adropogon*, *Eragrostis* y *Pennisetum*, que se secan al comienzo de la estación invernal.

- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Estas zonas de vida tienen poca precipitación y por lo tanto no permiten llevar a cabo una agricultura de secano. Con riego, se puede cultivar una gran variedad de especies, entre las que destacan la papa, maíz, haba, arveja, hortalizas (lechuga, zanahoria, repollo) y algunos frutales de hueso. Durante la estación lluviosa, ambas Zonas de vida se ven cubiertas de una vegetación estacional que es aprovechada para el pastoreo de ganado caprino principalmente y que se alimenta durante el resto del año con otras especies arbustivas xerofíticas. El sobrepastoreo a base del ganado caprino.

Estepa - Montano Tropical (e-MT)

- **Relieve y Suelos:** El relieve topográfico es predominantemente empinado, con escasas áreas de topografía un tanto más suave. Los suelos son un tanto profundos, de textura media, generalmente de naturaleza calcárea, pertenecientes a los kastanozems (cálcicos principalmente). Asimismo, se tiene suelos superficiales y muy calcáreos (Rendzinas) y la parte meridional y hacia el flanco occidental andino, donde existe definitivamente influencia volcánica, aparecen los andosoles vitricos. Los litosoles (incluye formaciones líticas) dominan las superficies muy empinadas y de escasa cubierta edáfica.
- **Vegetación:** La vegetación natural está denominada por la familia de las gramíneas, entre las que destacan los géneros *Poa*, *Stipa*, *Festuca*, *Calamagrostis* y *Eragrostis*. Hacia los límites más cálidos de la Zona de Vida, se puede observar arbustos de constitución leñosa. Asimismo, en la franja latitudinal de subtropical, es característica la presencia de extensas áreas cubiertas por la "tola" o "taya" (*Lepidophyllum quadrangulare*). Planta no comestible por el ganado, que se considera como una invasora debido al sobrepastoreo del graminal climax y que ha causado una degradación de los suelos. La tola no es típica en la región latitudinal tropical, que es un tanto más húmeda y tiene temperaturas más elevadas. Entre las especies indicadoras, se puede mencionar el cactus denominado "anjoishja" o "caruacasha" (*Opuntia subulata*).
- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** La agricultura que se lleva es de secano y con ganadería extensiva en aquellos lugares con pasturas naturales estacionales.

El principal cultivo es la cebada, ya que requiere poca agua, cultivándose papa y algunos tubérculos nativos hacia los límites con el bosque húmedo - Montano. Debido a la escasez de lluvia, con un máximo de 500 milímetros no es posible la reforestación con "eucalipto" (*Eucalyptus globulus*) ni menos "pino" (*pinus sp.*), recomendándose otras especies menos exigentes en agua.

Bosque Húmedo - Montano Tropical (bh-MT)

- **Relieve y Suelos:** El relieve es predominantemente empinado ya que conforma el borde o parte superior de las laderas que enmarcan a los valles interandinos, haciéndose un tanto más suave en el límite con las zonas de Paramo que presentan gradientes moderadas por efecto de la acción glacial pasada. Por lo general, aquí dominan suelos relativamente profundos, arcillosos, de reacción acida, tonos rojizos a pardos y que asimilan al grupo edafogenico de phaeozems. Asimismo, donde predominan materiales litológicos calcáreos pueden aparecer los kastonozems, de tonalidades rojizas generalmente. En las áreas muy empinadas, aparecen suelos delgados dando paso a los litosoles y algunas formas de Rendzinas así como grupos transicionales pertenecientes a los cambisoles (districos y eutricos).
- **Vegetación:** La vegetación natural climax prácticamente no existe y se reduce a pequeños relictos o bosques residuales homogéneos, como el "chachacomo" (*Escallonia sp.*) "quinual" (*Polylepis sp.*), "ulcumano", "romerillo" o "intimpa" (*Podocarpus sp.*) O pequeños bosques heterogéneos constituidos por especies de los generos *Gynoxis*, *Polylepis*, *Berberis*, *Eugenia*, *Senecio*, *Podocarpus*, *Baccharis*, *Oreopanax*, *Solanum*, etc. Tanto el "quinual" (*Polylepis sp.*) como el "sauco" (*Sambucus peruviana*) se encuentra cerca de casa, aparentemente bajo un cuidado riguroso como planta cultivada. El "mutuy" (*Cassia sp.*), es también muy frecuente así como el "tarhui" o "chacho" silvestre (*Lupinus mutabilis*) cerca de los caminos, especie esta gran indicadora de la parte alta de estas formaciones ecológicas. En las partes altas o superiores de esta Zona de Vida, denominadas también subpáramos praderas, se observa la presencia de grandes extensiones de pastos naturales altoandinos, constituidos principalmente por especies de la

familia de la Gramíneas como *Stipa*, *Calamagrostis*, *Festuca* y *Poa*, entre las más importantes. Todas las plantas mencionadas pueden ser consideradas como indicadores de estas Zonas de Vida.

- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Estas Zonas de Vida, a pesar de tener una precipitación no mayor de 800mm. Anuales y la reducida evapotranspiración debido a las temperaturas bajas, permiten llevar a cabo una agricultura de secano. En este sentido, constituyen una de las Zonas de Vida donde se fija el centro de la agricultura de secano del país. Se cultiva preferentemente plantas autóctonas de gran valor alimenticio, como la "papa" (*Solanum tuberosum*), "oca" (*Oxalis tuberosa*).

Paramo Húmedo - Subalpino Tropical (ph-SaT)

- **Relieve y Suelos:** La configuración topográfica está caracterizada por laderas inclinadas así como por áreas colinadas y algunas veces de relieve suave hasta plano. El molde edáfico está conformado por suelos de mediana profundidad, con un horizonte A negro profundos, ácidos y ricos en materia orgánica pertenecientes a los Paramos andosoles si tienen influencia a los paramosoles sin impregnación de materiales piroclásticas (volcánicos). Asimismo en las áreas inclinadas, donde los suelos delgados, aparecen los litosoles y, en aquellas áreas de drenaje imperfecto y un tanto deprimidas aparece los Gleysoles y los suelos Orgánicos.
- **Vegetación:** La vegetación natural está constituida predominantemente por manojos dispersos de gramíneas que llevan el nombre de "ichu", conformado parte de los pastos naturales altoandinas llamados "pajonales de puna", sobre todo *Festuca scirpifolia*, *Calamagrostis rigida*, *Calamagrostis intermedia*, *Festuca orthophylla*, *Calamagrostis breviaristata*, *Stipa depauperata*, *Stipa ichu*, *Stipa incospicua*, *Eromus frigidus* y *Poa gimnatha*, otras especies que se incluyen corresponden a los géneros *Chuquiragua*, *Senecio*, *Tetraglochin*, *Baccharis* y *Ephedra*. Entre las plantas a especies de carácter leñoso, como arbustos, aparece el "quinual" (*Polylepis* sp.) y especies de *Gynoxys* (*G. oleifolius*) que llegan hasta 4 metros de altura. Entre las cactáceas, se observan especies de *Echinocactus* y *Opuntia*, especialmente *Opuntia floccosa* y sobre todo *Opuntia lagopus*, que se distingue por

una tupida cubierta de pelos. En la parte meridional de la zona de vida aparece la "tola" (*Lepidophyllum quadrangulare*) así como la "yareta" (*Azorella yarita*), de coloración verde claro, almohadillas, convexa, dura y resinosa, que alcanza a veces hasta más de un metro de alto y se utiliza como combustible.

- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Debido a su condición climática dominante, son zonas con capacidad para la producción de pastos para ganado y, por tanto, convienen en ser zonas de vidas típicas y tradicionales de la actividad ganadera altoandina del país. El recurso pastos naturales ha sido fuertemente deteriorados a causa principalmente del sobrepastoreo, siendo recomendable una máxima de una unidad animal por cada 6 hectáreas.

Tundra Pluvial - Alpino Tropical (tp-AT)

- **Relieve y Suelos:** El relieve topográfico es generalmente accidentado, variando a colinado y ondulado, este último propio del modelaje glacial principalmente. El escenario edáfico está constituido por los paramosoles (suelos de naturaleza ácida y con un horizonte A oscuro, rico en materia orgánica), Páramo Andosoles, cuando dominan los materiales volcánicos o piroclásticos y litosoles en aquellas áreas de fuerte gradiente y naturaleza peñascosa o rocosa. En donde existen depresiones y problemas de drenaje, aparecen los Gleysoles altoandinos e llistosoles (suelos orgánicos).
- **Vegetación:** En relación a las tundras, húmeda y muy húmeda, la vegetación en esta zona de vida es muy abundante y florística más diversificada, conteniendo arbustos, semiarbustos y hierbas de tipo graminar así como plantas de porte almohadillado. Además de las especies que han sido mencionadas para las dos zonas de vida antes mencionadas, existen otras, tales como *Calamagrostis vicunarum*, *Aciachne pulvinata*, *Poa chamaeclinos*, *Anthochloa lepidula*, *Descurainia athrocarpa*, *Lupinus pinguis*, *Apium scabrum*, *Leuceria laciniata*, especies de los géneros *Culcitium* y *Senecio*. Las especies de *Pycnophyllum* así como algunas *Plettkea* y *Arenaria* se asemejan a musgos por sus tallos filiformes cubiertos de hojas diminutas y acumuladas en masas compactas. Una planta característica es la *Distichia muscoides*, que pertenecen a la familia Juncaceae, de forma almohadilla

y convexa y que le confiere al paisaje de la tundra-alpina una superficie ondulada. Estas almohadillas crecen continuamente por sus partes superiores mientras las inferiores se van convirtiendo en turba, conocida también con el nombre vernacular de "champa".

Nival Tropical (NT)

- **Relieve y Suelos:** La configuración topofisiográfica es abrupta y constituida por suelos netamente líticos, peñascosos o rocosos; prácticamente, no existen cubiertas edáficas, salvo en áreas muy reducidas y de escaso interés.
- **Vegetación:** Las únicas formas de vida observables son algunas algas sobre la nieve misma, así como minúsculos líquenes, crustáceos, que crecen sobre las rocas de color oscuro, en los límites inferiores del nival y muy cerca de la tundra.
- **Uso Actual y Potencia de la Tierra:** Las formaciones nivales tienen importancia desde el punto de vista del régimen hidrológico de los ríos y de las lagunas altoandinas, además, representan zonas escénicamente atractivas para el desarrollo del turismo, en el que se incluyen el andinismo (alpinismo).

Apéndice B

Datos históricos de precipitación

OFICINA GENERAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA

ESTACION: CANTA / 000547 /DRE-04
PARAMETRO: P. MAX. EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 11° 28' S
LONG. : 76° 37' W
ALT. : 2832 msnm.

DPTO : LIMA
PROV. : CANTA
DIST. : CANTA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1989	5	8.3	5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3
1990	2	1.2	1.7	0	0	0	0.5	0				0	2
1991													
1992	0.3	0.3	0.9	0.4	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0.9
1993	1.1	0.6	1.4	4.5	0.5	0	0	0	0.2	4	9.4	8.7	9.4
1994	14.8	15.5	9.6	12.3	1.9	0	0	0	0	0	6.5	4.8	15.5
1995	9.3	6.5	7.3	0	0	0	0	0	0	8.9	4.9	12.4	12.4
1996	15.9	16.7	13.4	12.5	0	0	0	0	0	2.9	1	7.6	16.7
1997	13.4	15.5	6.2	10.3	1.8	0	0	0	5.6	5.2	8.5	30	30
1998	27.5	18.6	30.5	11.5	0	0	0	0.3	0.7	2.3	2.6	4.1	30.5
1999	8.2	24.1	14.5	8.5	5	0	0.2	0	1.6	5.2	5.5	7.3	24.1
2000	11.5	19.2	15.6	5.3	1.9	0	0	4.3	5.2	6.7	3.6	11.1	19.2
2001	33.5	13.5	17.9	10.2	0	0	0	0	6.1	7	15.2	4.2	33.5
2002	9.4	16.5	18	7.2	1.8	0	0	0	8.7	5	11	9	18

Tabla B.1: Datos históricos de precipitación (1989-2002), Estación Canta (SENAMHI)

OFICINA GENERAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA

ESTACION: LACHAQUI / 155217 /DRE-04
PARAMETRO: P. MAX. EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 11° 33' S
 LONG. : 76° 37' W
 ALT. : 3668 msnm.

DPTO : LIMA
 PROV. : CANTA
 DIST. : LACHAQUI

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1991												6	6
1992		17.9	20	3.5	0	0	0	0	0	11.2	2.8	7	20
1993	20.8	21.7	12.9	14	6.2	0	0	0	2.4	4.8	15.1	6.3	21.7
1994	15.1	17.9	30.9	6	8.6	0	0	0	5.8	3.1	9	10.3	30.9
1995	8.9	9.1	16.3	5.6	4	0	0	0	2.6	9.4	12	17.1	17.1
1996	17.7	16.4	16.7	9.9	4.3	0	0	0	2	3.2	2.7	11.9	17.7
1997	16.1	19.7	9.1	4.8	1.5	0		0	5.1	6	16.1	24.8	24.8
1998	20.7	25.3	26.8	9.5	0	0	0	0	1.4	3.6	5.1	12.1	26.8
1999	12.8	0	14.7	14.3	5.6	0	0	0	11	7.3	11.6	9	14.7
2000	15.9	19.5	17.5	17.8	15.8	0	0	4.3	3.4	6.4	4.1	19.5	19.5
2001	26.2	17.1	19.3	12.9	4.6	0	0	0	11.2	3.8	16.6	2.9	26.2
2002	10.8	23.3	19	19.6	9.7	0.6	0	0	12.3	7	10	6.5	23.3

Tabla B.2: Datos históricos de precipitación (1991-2002), Estación Lachaqui (SENAMHI)

OFICINA GENERAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA

ESTACION: PARIACANCHA / 155112 /DRE-04
PARAMETRO: P. MAX. EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 11° 23' S
 LONG. : 76° 30' W
 ALT. : 3800 msnm.

DPTO : LIMA
 PROV. : CANTA
 DIST. : HUAROS

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1991	8.1	9.2	16.3	9.6	10	0	4	0	19.5	16.2	7.5	7.9	19.5
1992	6	17.8	26.8	16.4	3.2	0	6.5	0	2.7	9.6	5.9	14.5	26.8
1993	15.8	15.7	24.8	14.4	5.1	0	1.4						24.8
1994	19.5	16.1	27.7	13.9	14.9	2.5	2	0	8.5	12.4	8.5	14.3	27.7
1995	14.4	13.4	18.5	13.6	7.4	4.2	1	7.1	9.3	8.9	7.5	29.2	29.2
1996	15.6	16.3	16.8	17.7	6.7	0	0	1.7	6.1	10	8.2	17.5	17.7
1997	20.8	24.2	5.4	4.5	3.2	2.2	2.1	3.9	13	8.6	15.4	11	24.2
1998	26.5	17.7	38	12.9	0.5	4	0	3	16.1	18.7	8.9	11	38
1999	11.7	20.9	14.1	9	8.5	6.1	1.4	4.3	10	10.2	14.2	13.5	20.9
2000	25	16.1	19	10.3	9.2	0	2.3	4.2	9.8	15.7	17.3	23.2	25
2001	22.6	14.1	21.8	12	3.5	0	3.1	0	9.7	12	9.5	7.5	22.6
2002	13.4	16.3	18.4	8.3	3.8	4.2	2.4	0.6	10	16.2	17.5	16.3	18.4

Tabla B.3: Datos históricos de precipitación (1991-2002), Estación Pariacancha (SENAMHI)

OFICINA GENERAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA

ESTACION: HUAROS / 155218 /DRE-04
PARAMETRO: P. MAX. EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 11° 24' S
 LONG. : 76° 34' W
 ALT. : 3585 msnm.

DPTO : LIMA
 PROV. : CANTA
 DIST. : HUAROS

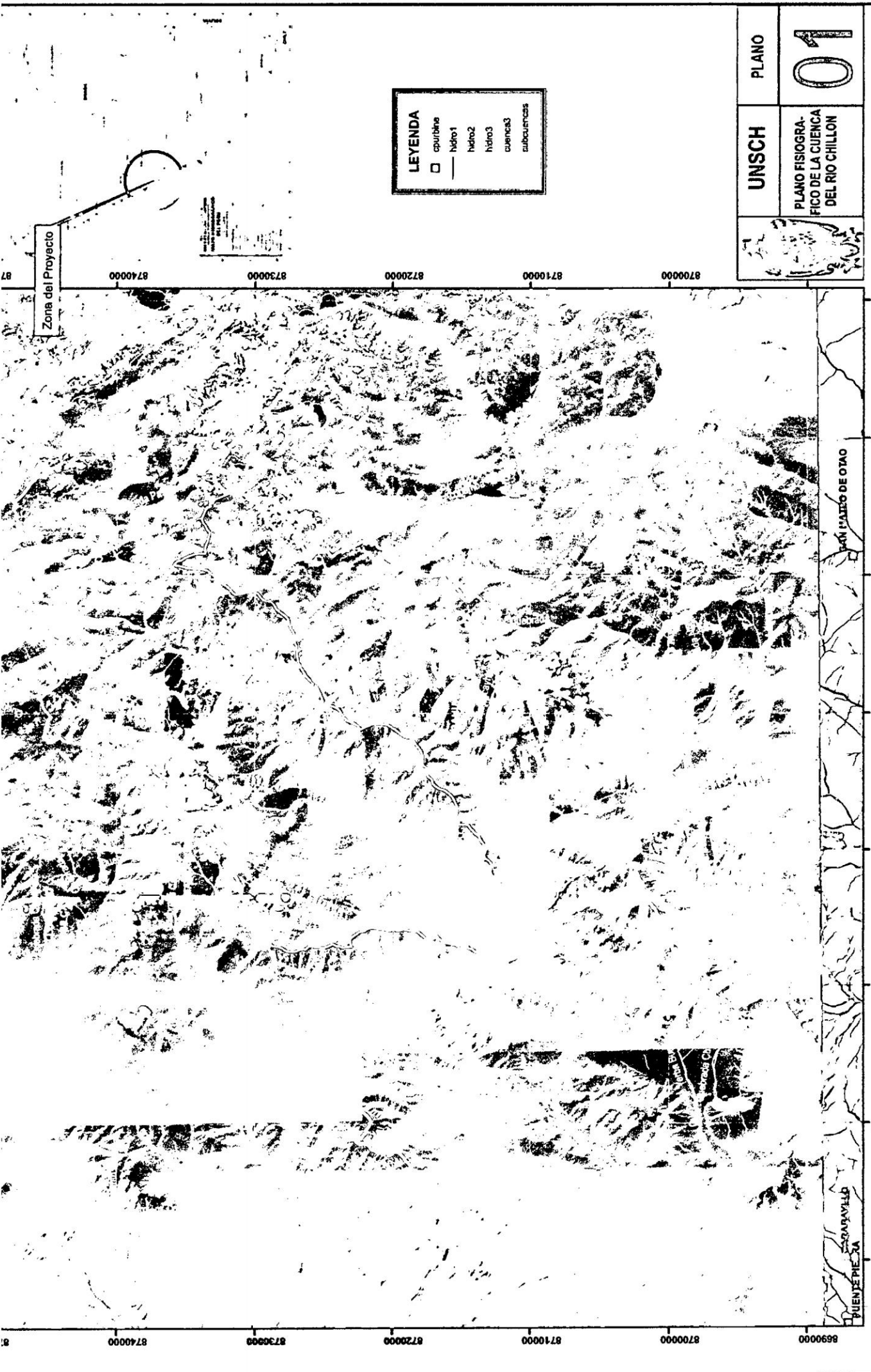
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1992	5.5	3.1	11.7	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	9.1	11.7
1993	10.2	21.0	21.0	12.3	4.2	0.0	0.0	2.5	6.3	9.4	18.1	12.9	21
1994	16.0	26.4	24.1	13.0	4.6	0.0	2.6	3.2	3.7	4.0	11.6	10.5	26.4
1995	13.8	11.5	14.0	25.0	2.9	2.4	0.0	5.4	4.5	7.4	9.3	22.6	25
1996	14.4	23.6	18.0	11.3	3.7	0.0	0.0	0.9	2.6	3.6	5.6	9.7	23.6
1997	11.0	14.3	11.5	3.6	2.6	0.0			4.3	13.4	8.0	20.9	20.9
1998	16.8	20.5	19.6	6.0	0.0	0.0	0.0		1.2	14.0	5.3	9.5	20.5
1999	12.2	23.0	17.0	8.2	5.6	0.6	0.0	0.0	4.6	5.1	9.5	15.5	23
2000	22.3	18.0	15.0	7.9	6.3	0.0	0.0	5.0	5.4	11.3	7.6	19.9	22.3
2001	15.7	10.8	24.4	12.3	2.1	0.0	2.2	0.0	13.2	6.6	12.0	16.2	24.4

Tabla B.6: Datos históricos de precipitación (1992-2001), Estación Huaros (SENAMHI)

Apéndice C

Planos del Proyecto de Aplicacion

1. Plano Fisiográfico de la cuenca del rio Chillón.
2. Plano Topológico de la cuenca del rio Chillón.
3. Plano de Subcuencas y Polígono de Thiessen.
4. Plano de Modelo Hidrológico de la cuenta en HEC-HMS.
5. Plano de zonas Ecológicas e isoyetas de cuenca del Río Chillón.
6. Plano de zonas Ecológicas y Subcuencas.
7. Plano Topográfico del tramo de análisis.
8. Mapa de Inundación para un $Tr=50$ años
9. Mapa de Inundación para un $Tr=500$ años



LEYENDA

- contorno
- Hidro 1
- Hidro 2
- Hidro 3
- cuencas 3
- subcuencas

PLANO	01
UNSCH	PLANO FISIOGRAFICO DE LA CUENCA DEL RIO CHILLON

Zona del Proyecto

SAN MATEO DE OTAZ

PUENTE PUEBLO

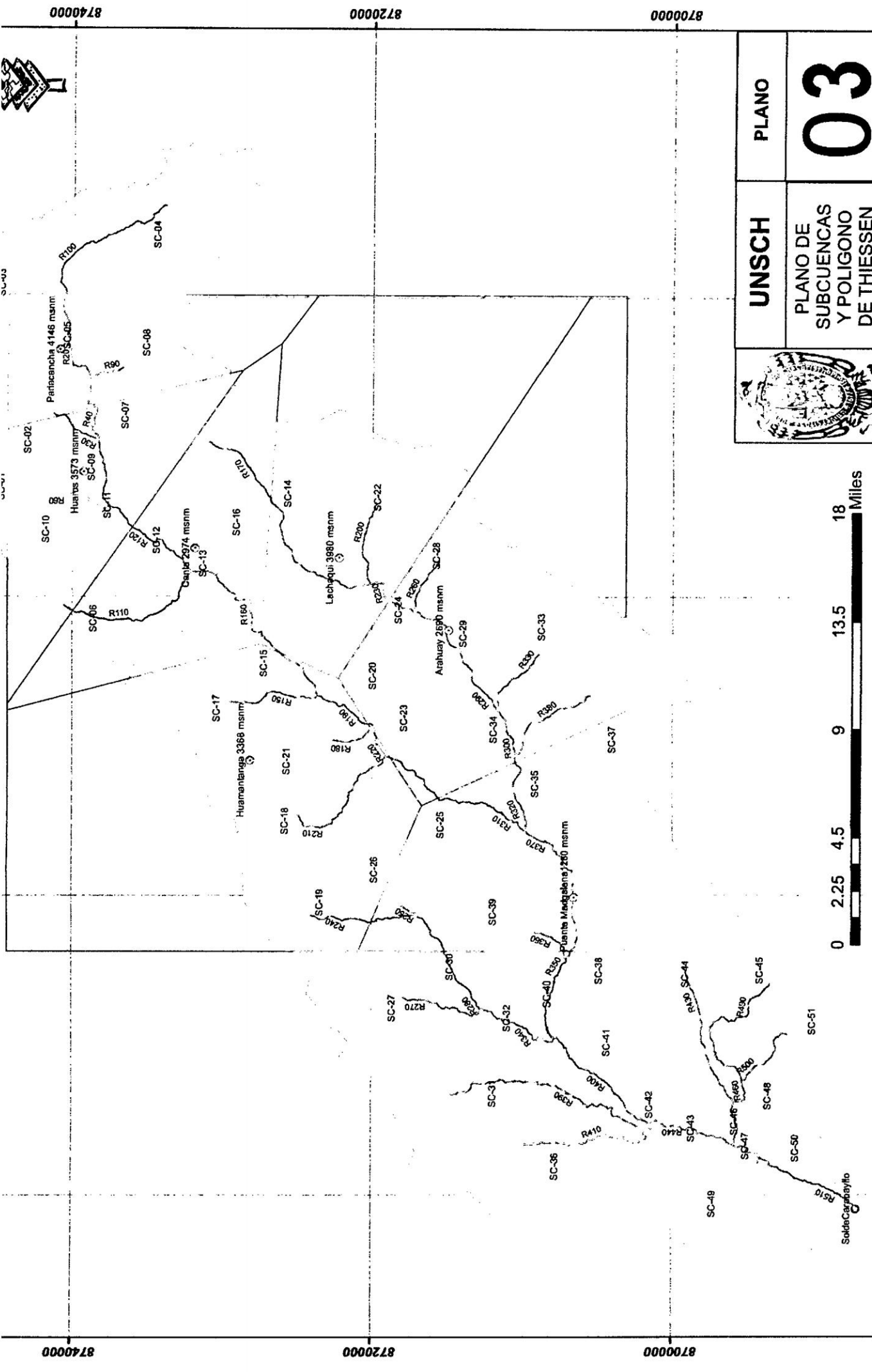
CARRERA

R. Chillon

R. San Mateo de Otaz

8740000 8730000 8720000 8710000 8700000

8690000 8700000 8710000 8720000 8730000 8740000

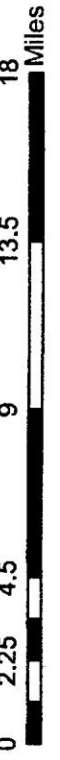


UNSCH

PLANO

**PLANO DE
SUBCUENCAS
Y POLIGONO
DE THIESSEN**







03

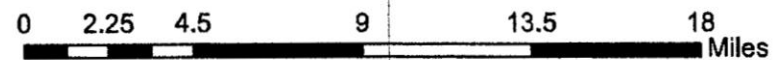
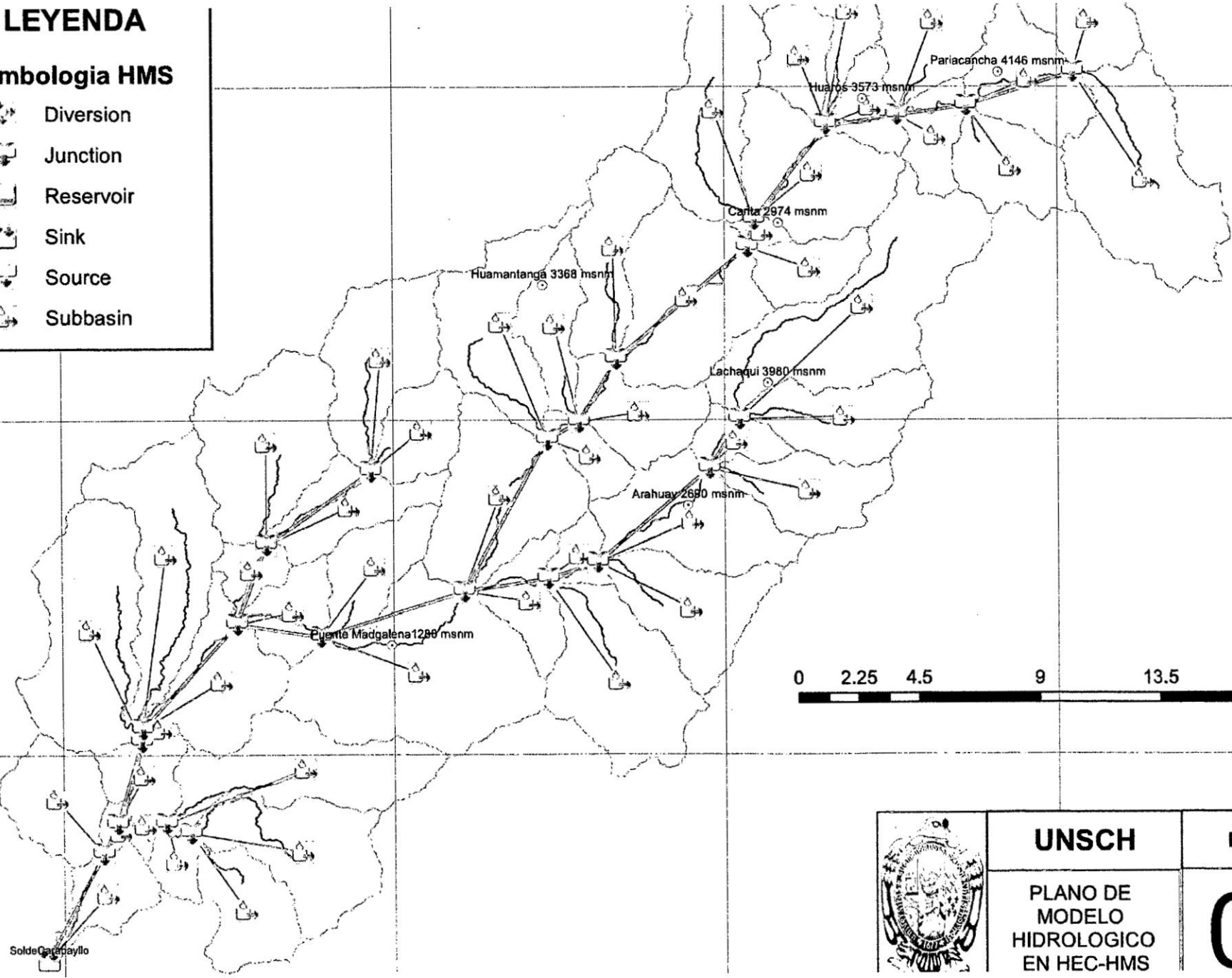




LEYENDA

Simbología HMS

-  Diversion
-  Junction
-  Reservoir
-  Sink
-  Source
-  Subbasin



UNSCH	PLANO
PLANO DE MODELO HIDROLOGICO EN HEC-HMS	04

ZONAS DE ESCURRIMIENTO		A(Km2)
	Bosque Humedo Montano Tropical	bh-MT 262.62
	Desierto Desecado Subtropical	dd-S 270.92
	Desierto Peradico Montano Bajo Tropical	dp-MBT 28.96
	Desierto Peradico Premontano Tropical	dp-PT 302.26
	Desierto Perarido Montano Bajo Subtropica	dp-MBS 121.44
	Desierto Supearido Subtropical	ds-S 300.45
	Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical	ee-MBT 192.42
	Estepa Montano Tropical	e-MT 263.81
	Matorral Desertico Montano Bajo Tropical	md-MBT 146.44
	Matorral Desertico Premontano Tropical	md-PT 77.64
	Nival Tropical	NT 9.43
	Paramo Humedo Subalpino Tropical	ph-Sat 190.88
	Tundra Pluvial Alpino Tropical	tp-AT 53.47

8740000

8720000

8700000

8680000

8740000

8720000

8700000

8680000

Cuenca Chancay - Huaral

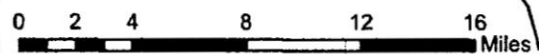
Cuenca Mantaro

Cuenca Chillón

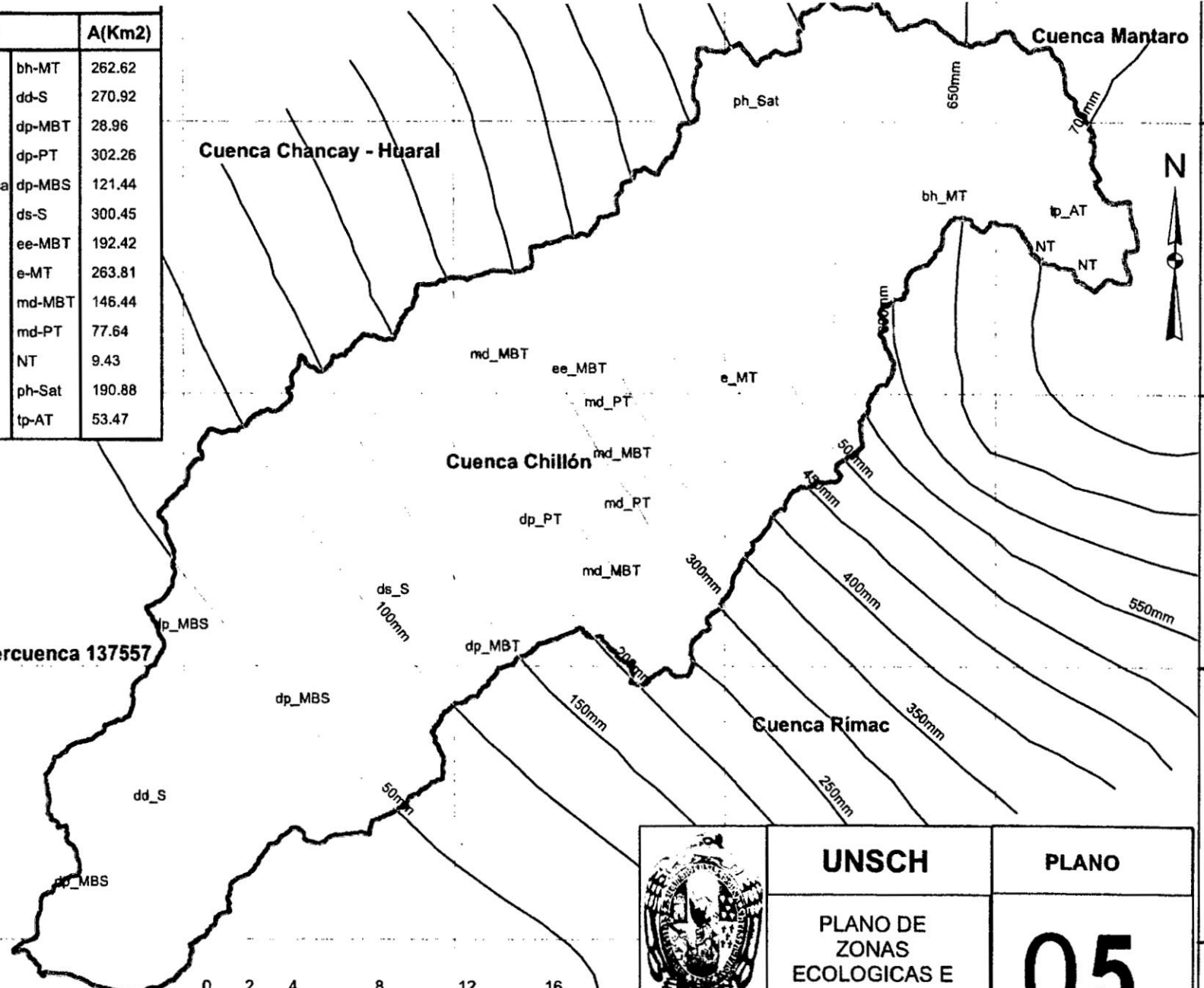
Intercuenca 137557

Intercuenca 137555

LEYENDA
— Isoyetas



UNSCH	PLANO
PLANO DE ZONAS ECOLÓGICAS E ISOYETAS	05

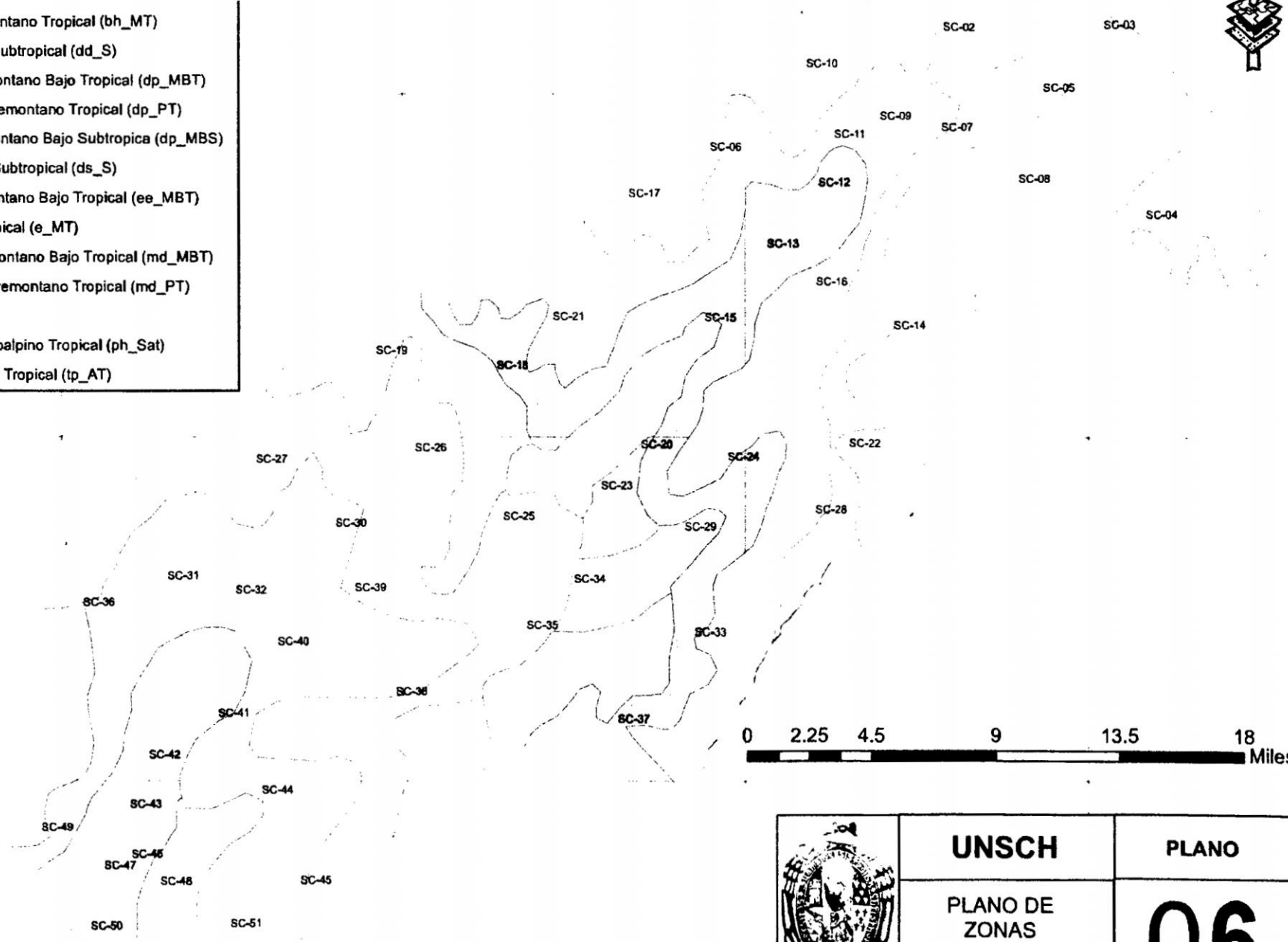




8740000
8720000
8700000

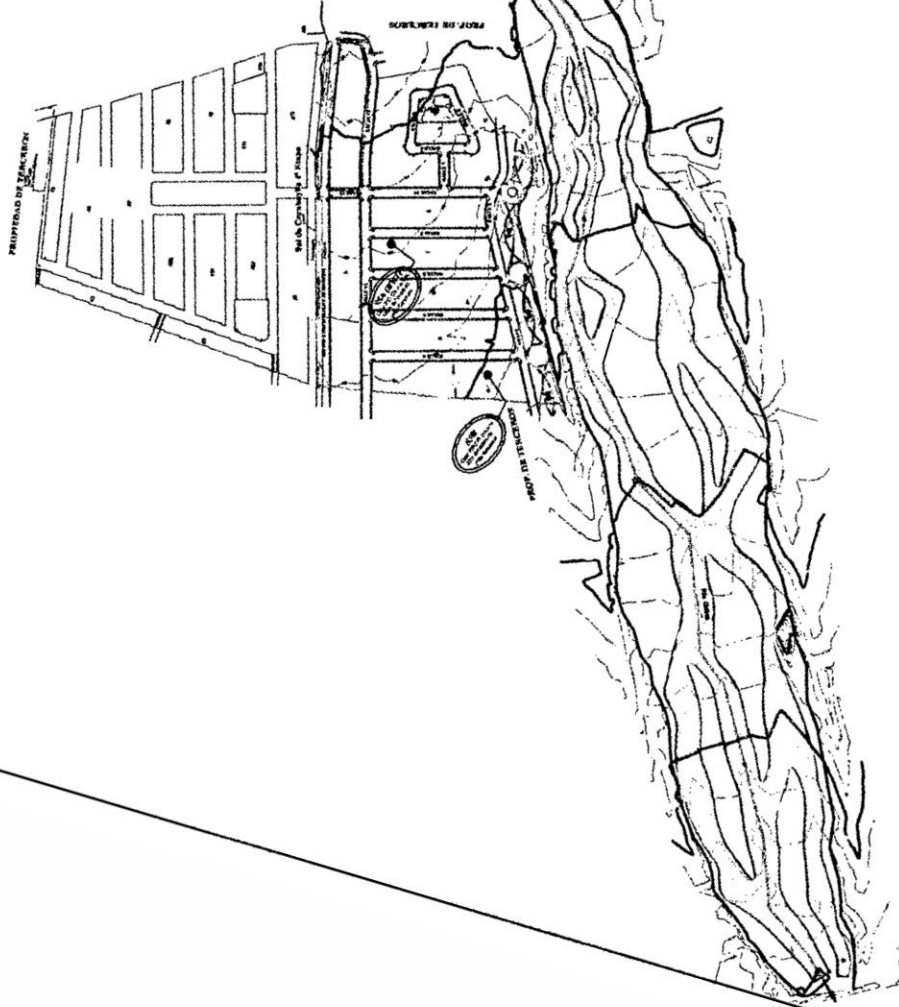
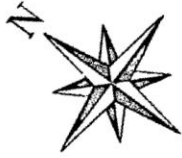
8740000
8720000
8700000

- Bosque Humedo Montano Tropical (bh_MT)
- Desierto Desecado Subtropical (dd_S)
- Desierto Peradico Montano Bajo Tropical (dp_MBT)
- Desierto Peradico Premontano Tropical (dp_PT)
- Desierto Perárido Montano Bajo Subtropica (dp_MBS)
- Desierto Supéarido Subtropical (ds_S)
- Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical (ee_MBT)
- Estepa Montano Tropical (e_MT)
- Matorral Desertico Montano Bajo Tropical (md_MBT)
- Matorral Desertico Premontano Tropical (md_PT)
- Nival Tropical (NT)
- Paramo Humedo Subalpino Tropical (ph_Sat)
- Tundra Pluvial Alpino Tropical (tp_AT)




UNSCH	PLANO
PLANO DE ZONAS ECOLÓGICAS Y SUBCUENCAS	06

CARABAYILLO



URBANIZACION SOL DE CARABAYILLO

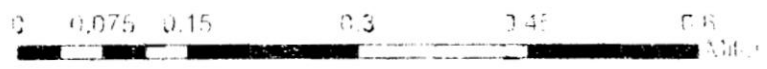
SANITAS

	UNSCH	PLANO
PLANO TOPOGRAFICO DEL TRAMO DE ANALISIS		07

8687000
8687500
8688000
8688500



INUNDACION



8687000
8687500
8688000
8688500

	UNSCH	PLANO
	MAPA DE INUNDACION PARA UN Tr=50 años	08

868851

8688000

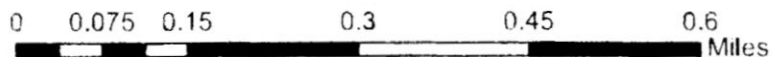
8687500

8687000



INUNDACION

Esc. de Ingenieros Civiles
UNAM - Mexico



8688501

8688000

8687500

8687000



UNSCH

PLANO

MAPA DE
INUNDACION
PARA UN
Tr=500 años

09

Bibliografía

- [1] *Apuntes de Clase de Ingeniería de Ríos*, por MSc. Ing. Roberto Campaña Toro, Maestría en Ingeniería Hidráulica, semestre 2014-I, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.
- [2] BALDEMAR, MÉNDEZ ANTONIO, (2005), *Tesis Doctoral: Aplicación Hidrológica de los Radares Meteorológicos*, Universidad Autónoma de México.
- [3] BUSTAMANTE, ORTEGA RAMÓN SEBASTIÁN, (2008), *Tesis de Grado: Calibración y Validación del Modelo HEC- HMS, en la cuenca del Huechún, Región Metropolitana*, Universidad de Talca - Chile.
- [4] CAICEDO, CARRASCAL FABIÁN MAURICIO, (2008), *Tesis para optar el grado de Magister en Hidrosistemas: Asimilación de Precipitación Estimada por Imágenes de Satélite en Modelos Hidrológicos Aglutinados y Distribuidos, Caso de Estudio Afluencias al Embalse de Betania (Huila, Colombia)*, Pontificia Universidad Javeriana - Colombia.
- [5] CELMI, CORAL JESSICA, (2008), *Tesis de Grado: Aplicación de Análisis Multi-criteria (MCA) en la Planificación para la mitigación de inundaciones en la parte baja del Río Chillón*, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.
- [6] *Curso: Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS y Aplicaciones SIG*, por Ing. Aquiles Berrocal Rodríguez, del 26 de abril al 31 de mayo 2014, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.
- [7] *Curso: Modelamiento Hidráulico con HEC-RAS y Aplicaciones SIG*, por Ing. Aquiles Berrocal Rodríguez, del 07 al 28 de Junio 2014, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.

- [8] CHÁVEZ, DÍAS ROSENDO, (1994), *Hidrología para Ingenieros*, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [9] CHOW, VEN TE; MAINDMENT, DAVID R.; MAYS, LARRY W.; (1994), *Hidrología Aplicada*, Traducido de la primera edición en inglés de *Applied Hydrology*. por McGRAW-HILL.
- [10] FATTORELLI, SERGIO; FERNÁNDEZ, PEDRO C., (2011), *Diseño Hidrológico*, 2da Edición, Edición Digital publicada en la biblioteca virtual de la WASA-GN (Water Assessment & Advisory Global Network).
- [11] HAMMERLY, ROSANA DEL CARMEN *Modelación Hidrológica con SIG, Contribuciones en su difusión y aplicación*, Universidad Nacional del Litoral - Argentina.
- [12] *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension*, Manual de uso, Versión 10.1 - February 2013, por US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- [13] *HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS, Using ArcGIS 10*, Manual de uso, Versión 10 - Mayo 2012, por US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- [14] *HEC-RAS River Analysis System*, Manual de Referencias Hidráulicas, Versión 4.1 - Enero 2010, por US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- [15] *HEC-RAS River Analysis System*, Manual de uso, Versión 4.1 - Enero 2010, por US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- [16] *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, Manual de Referencias Técnicas, Marzo 2000, por US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- [17] *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, Manual de Uso, Versión 3.5, Agosto 2010, por US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.
- [18] LINSLEY, KOHLER PAULUS, (1977), *Hidrología para Ingenieros*, segunda edición, por Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá - Colombia.

- [19] *Mapa Ecológico del Perú, Guía Explicativa*, Instituto Nacional de Recursos Naturales INRENA - República del Perú, Ministerio de Agricultura.
- [20] MONSALVE, SÁENZ GERMÁN, (1999), *Hidrológica en la Ingeniería*, 2da Edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [21] OROSCO, BENITES JUAN CARLOS, (2004), *Tesis de Grado: Protección contra inundaciones en zonas urbanas - Caso de la urbanización San Diego, Distrito de San Martín de Porres - Lima*, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.
- [22] PALOMINO, CUYA DELLY GRACE, (2004), *Tesis de Grado: Zonificación de áreas inundables Utilizando Sistemas de Información Geográfica, Aplicación al tramo final del Río Chillón*, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.
- [23] *Ponencia: Modelación en Ingeniería Hidráulica - Aplicación a control de Inundaciones*, por MSc. Ing. Roberto Campaña Toro, del 07 al 28 de Junio 2014, Universidad Nacional de Ingeniería - Perú.
- [24] PUERTA, TUESTA RONALD; RENGIFO, TRIGOZO JUAN; BRAVO, MORALES NIÑO, (2011) *ArcGIS Básico 10*, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad Recursos Naturales Renovables, Tingo María - Perú.
- [25] *Recursos Hídricos en el Perú*, Autoridad Nacional del Agua ANA - Ministerio de Agricultura - Perú.
- [26] *Memoria Final: Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Chillón, componente Hidrología Superficial*, Instituto Nacional de Recursos Naturales INRENA - Ministerio de Agricultura, Octubre 2003, Lima - Perú.
- [27] RODRÍGUEZ, PENIN AQUILINO, (2007), *Sistemas SCADA, Guía Práctica*, Editorial Marcombo S.A. Barcelona - España.
- [28] VILLÓN BÉJAR, MÁXIMO (2002), *Hidrología*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola.
- [29] VILLÓN BÉJAR, MÁXIMO, JUNIO (2010), *HEC - HMS Ejemplos*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola.

- [30] VILLÓN BÉJAR, MÁXIMO, MARZO (2009), *HEC - RAS Ejemplos*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola.
- [31] ZUBIETA, BARRAGÁN RICARDO, (2013), *Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Recursos Hídricos: Modelado Hidrológico Distribuido de la Cuenca Amazónica Peruana Utilizando Precipitación Obtenida por Satélite*, Universidad Nacional Agraria la Molina - Perú.