



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

MODELO DE PÉRDIDAS PARA DETERMINAR PRECIPITACIÓN EFECTIVA USANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Jessica Carolina García Ruesta

Piura, 14 de Abril de 2004

FACULTAD DE INGENIERÍA

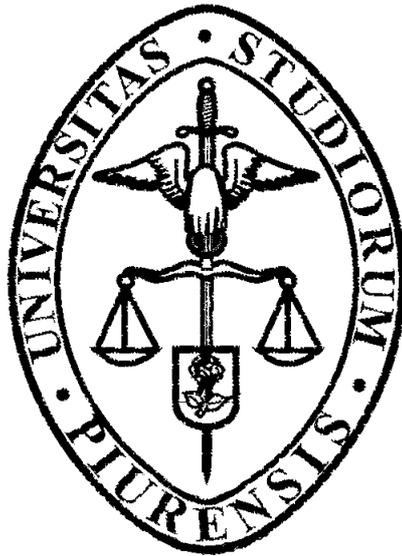
Departamento de Ingeniería Civil



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

**UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



“Modelo de pérdidas para determinar precipitación efectiva usando sistemas de información geográfica”

**Tesis para optar por el Título de
Ingeniero Civil**

Jessica Carolina García Ruesta

Asesora : Ing. Clara Marina Farías de Reyes

Piura, Abril 2004

Dedico mi tesis
a Dios,
a mis padres Carlos y Juana,
a mis hermanos Carlos, Meysi e Iván.

PRÓLOGO

Los SIG son una herramienta poderosa, ampliamente accesible para manejar información geográfica, topográfica, edafológica, hidrológica y otras, en forma eficiente, fácil y conveniente. Los sistemas ráster se usan para procesamiento de imágenes desde hace varias décadas y existe un entendimiento maduro y una tecnología desarrollada para este fin. Por otra parte, la modelación hidrológica se está orientando al desarrollo de modelos digitales distribuidos espacialmente, debido a la mayor disponibilidad de información y a las ventajas que presenta de poder discretizar el terreno en pequeñas unidades, llamadas celdas, cada una con características propias.

En el año 2001, la Universidad de Piura y el PAEN-CTAR/GTZ firmaron un convenio para implementar en la UDEP la Unidad Operativa SIG donde se manejará la información necesaria para la gestión de cuencas y riesgos en la Región Piura. A través de este convenio se elaboraron las bases de datos para las subcuencas de Bigote y La Gallega pertenecientes a la cuenca del río Piura y para la cuenca del río Chira. Paralelamente a este convenio, se trabajó organizando la base de datos de la información geográfica que había sido generada con anterioridad por el IHHS y actualmente se encuentra desarrollando proyectos de esta misma naturaleza.

Analizando la bibliografía existente sobre el tema, se observa que los estudios anteriores no abordan el cálculo de la infiltración y consideran que la precipitación neta es una variable de ingreso al modelo, ya conocida por otros modelos simplificados. Esto no se aproxima a la realidad, pues la precipitación no es uniforme en toda la cuenca, además la infiltración varía por la heterogeneidad del terreno.

Es así como dentro del marco de investigación que se viene llevando a cabo en el IHHS en torno a las aplicaciones de los SIG a la modelación hidrológica, se realizó la presente tesis que se centra en la necesidad de realizar un estudio de la cantidad de agua que se infiltra o pasa al subsuelo durante el ciclo hidrológico

Expreso mi agradecimiento a mi asesora la Ing. Marina Farías de Reyes quien me orientó y apoyó en el desarrollo de la tesis, a la Ing. María Sofía Dunin Borkowsky por los conocimientos impartidos acerca de los SIG, al Ing. Américo Gamarra y al Bach. Poly Valiente por su valiosa colaboración en los aspectos de programación, al personal del IHHS de la UDEP y a mis amigos por su apoyo brindado para que este trabajo sea una realidad.

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es crear un modelo de pérdidas para determinar la precipitación efectiva usando sistemas de información geográfica en una cuenca a elegir, partiendo de la cartografía y de la información meteorológica disponible y obteniendo los límites de la cuenca y la precipitación efectiva correspondiente, de manera que pueda ser utilizada en la modelación lluvia-escorrentía de dicha cuenca.

El presente trabajo muestra la metodología a seguir para la modelación de cualquier cuenca usando SIG, basada en el cálculo de la cantidad de agua que se infiltra durante el ciclo hidrológico. Como en todo modelo hidrológico distribuido es fundamental contar con información específica de la cuenca como topografía, precipitaciones y tipos de suelo. Además es necesario contar con un equipo de cómputo con capacidad y memoria para soportar el procesamiento de la gran base de datos generada con cada archivo.

“Modelo de pérdidas para determinar precipitación efectiva usando sistemas de información geográfica”

INDICE

PRÓLOGO

RESUMEN

INDICE

INTRODUCCIÓN 01

CAPITULO 1: CICLO HIDROLÓGICO Y CUENCA HIDROGRÁFICA 03

1.1 Introducción 03

1.2 Ciclo hidrológico 03

1.2.1 Balance hídrico global 04

1.2.2. Componentes del ciclo hidrológico 05

1.2.2.1 Evaporación 06

1.2.2.2 Precipitación 06

1.2.2.3 Infiltración 06

1.2.2.4 Evapotranspiración 06

1.2.2.5 Escorrentía 07

1.2.2.6 Agua subterránea 07

1.3 Cuenca hidrográfica. 07

CAPITULO 2: PRECIPITACIÓN 09

2.1 Definición 09

2.2 Formación de la precipitación 09

2.3 Clasificación de la precipitación 11

2.3.1 De acuerdo a sus características físicas 11

2.3.1.1 Llovizna 11

2.3.1.2 Lluvia 11

2.3.1.3 Escarcha 12

2.3.1.4 Nieve 12

2.3.1.5 Granizo 12

2.3.2 De acuerdo al mecanismo de formación 13

2.3.2.1 Precipitación Ciclónica 13

2.3.2.2 Precipitación Convectiva 13

2.3.2.3 Precipitación Orográfica. 14

2.4 Pluviometría 15

2.4.1 Instrumentos de medición 15

2.4.1.1 Medidores sin registro o pluviómetros 15

2.4.1.2 Medidores con registro o pluviógrafos 16

2.4.2 Redes de medición 17

2.4.3 Precisión en su estimación 18

2.4.3.1	Error en la medida puntual	18
2.4.3.2	Error en la evaluación espacial	19
2.5	Distribución espacial y temporal	19
2.6	Precipitación promedio sobre un área	20
2.6.1	Método de la Media Aritmética	20
2.6.2	Método de Thiessen	20
2.6.3	Método de las Isoyetas	20
2.7	Análisis de Tormentas	21
2.7.1	Elementos fundamentales	21
2.7.1.1	Intensidad	21
2.7.1.2	Duración	22
2.7.1.3	Frecuencia	22
2.7.2	Hietogramas	22
2.8	Tormentas de diseño	23
2.8.1	Modelo de Huff	23
2.8.2	Modelo de Varas	24
2.8.3	Método del SCS	25
2.9	Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia.	25
 CAPITULO 3: INFILTRACIÓN		 27
3.1	Definición	27
3.2	Capacidad de infiltración y tasa de infiltración	28
3.3	Almacenamiento de agua en el suelo	29
3.3.1	Redistribución interna	29
3.3.2	Humedad del suelo	29
3.4	Ecuación general de infiltración	30
3.5	Ecuaciones para el cálculo de infiltración puntual	31
3.5.1	Ecuación de Horton	31
3.5.2	Ecuación de Philip	32
3.5.3	Ecuación de Green-Ampt.	32
 CAPITULO 4: SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA		 35
4.1	Aspectos generales	35
4.1.1	Historia	36
4.1.2	Desarrollo de los SIG	36
4.2	Concepto de SIG	37
4.3	Componentes de un SIG	37
4.3.1	Equipos o Hardware	37
4.3.2	Programas o Software	38
4.3.3	Datos	38
4.3.4	Recurso Humano	38
4.3.5	Procedimientos	38
4.4	Aplicaciones de los SIG	38
4.5	Modelación de un SIG	39
4.5.1	Modelo conceptual	39
4.5.2	Modelo lógico	40

4.5.3	Modelo matemático	40
4.6	Modelación Hidrológica empleando SIG	41
4.6.1	Cuencas	42
4.6.2	Proceso lluvia-escorrentía	42
4.7	Software SIG	43
4.7.1	Arc View	43
4.7.2	Arc Info	43
4.7.3	Erdas Imagine	43
4.7.4	Idrisi	43
4.7.5	Map Info.	44

CAPITULO 5: DESARROLLO DEL MODELO 45

5.1.	Estructura del modelo	45
5.2.	Módulo Cuenca	46
5.2.1.	Planteamiento	46
5.2.2.	Datos de entrada	47
5.2.3.	Funcionamiento	48
5.2.3.1	TIN: Red Irregular de Triángulos	48
5.2.3.2	DEM: Modelo de Elevación Digital	49
5.2.3.3	Uso de herramientas para Arc View Herr_MPE.avx	49
5.2.4.	Resultados	53
5.3.	Módulo Precipitación	54
5.3.1.	Planteamiento	54
5.3.2.	Datos de entrada	55
5.3.3.	Hietograma	55
5.3.4.	Métodos de interpolación	56
5.3.4.1	Distancia Inversa Ponderada	56
5.3.4.2	Kriging	56
5.3.5.	Funcionamiento	61
5.3.6.	Comparación de métodos y modelos	62
5.3.7.	Resultados	62
5.4.	Módulo Infiltración	63
5.4.1.	Planteamiento	63
5.4.2.	Parámetros Green y Ampt	64
5.4.3.	Datos de entrada	65
5.4.4.	Funcionamiento	66
5.4.4.1	Analista Espacial	66
5.4.4.2	Valor de Ráster	66
5.4.4.3	Parámetros del suelo	67
5.4.4.4	Hietograma efectivo	67
5.4.5.	Resultados	68
5.4.6.	Sensibilidad	69

CAPITULO 6: CASO DE ESTUDIO: CUENCA BIGOTE – HUARMACA 71

6.1	Ubicación	71
6.2	Caracterización de la cuenca	73

6.2.1	Clima	73
6.2.2	Suelos	73
6.2.3	Geología	74
6.2.4	Hidrología	76
6.2.5	Sismicidad	76
6.3	Geomorfología de la cuenca	77
6.3.1	Área de la cuenca (A)	78
6.3.2	Perímetro de la cuenca (P)	78
6.3.3	Longitud mayor del río (L_p)	78
6.3.4	Ancho promedio (A_p)	78
6.3.5	Pendiente media del río (S_c)	78
6.3.6	Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius (K_c)	79
6.3.7	Rectángulo equivalente	79
6.3.8	Relación área-elevación	80
6.4	Red de estaciones meteorológicas	81
6.5	Aplicación del modelo	82
6.5.1	Módulo Cuenca	82
6.5.2	Módulo Precipitación	86
6.5.3	Módulo Infiltración	88
 CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		 91
7.1	Conclusiones	91
7.2	Recomendaciones	92

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

La capacidad de los sistemas de información geográfica (SIG) para manejar y analizar información espacial hace de estas herramientas informáticas un entorno adecuado para afrontar de manera eficiente la modelación hidrológica distribuida.

El estudio de eventos hidrológicos en cuencas requiere el empleo de modelos que, partiendo de información meteorológica y de propiedades físicas y geomorfológicas de la cuenca, nos permiten estimar el valor de los parámetros que intervienen en dichos eventos y procesos.

La presente tesis se centra en la necesidad de realizar un estudio de la cantidad de agua que se infiltra o pasa al subsuelo durante el ciclo hidrológico, dentro del marco de una investigación que se viene llevando a cabo en el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria en torno a las aplicaciones de los SIG a la modelación hidrológica. Como caso de estudio se ha tomado la cuenca alta del río Piura, específicamente la cuenca Bigote-Huarmaca.

Primero: **Ciclo hidrológico y cuenca hidrográfica**, se hace una introducción a la hidrología y se definen los conceptos básicos empleados en la presente investigación.

Segundo: **Precipitación**, en este capítulo se presenta una definición completa de precipitación, así como su formación, clasificación, medición, distribución espacial y temporal, así como el análisis de las tormentas y las relaciones IDF (Intensidad, duración y frecuencia).

Tercero: **Infiltración**, se expone el fenómeno de infiltración, se analiza la ecuación general de infiltración y se hace un estudio detallado de la ecuación de Green y Ampt.

Cuarto: **Los sistemas de información geográfica**, se da una definición de los SIG, así como una reseña y evolución de los mismos, se destaca la importancia de sus diversas aplicaciones en el mundo actual y se muestra la información básica necesaria para su manejo.

Quinto: **Desarrollo del modelo**, este capítulo explica el modelo estructurado en cuatro módulos, cada uno expone el planteamiento en el que se basa, los datos de entrada, su funcionamiento y sus resultados.

Sexto: **Caso de estudio: Cuenca Bigote-Huarmaca**, como caso de aplicación se ha elegido esta cuenca ubicada en la parte alta de la cuenca del río Piura, por tratarse de una cuenca local con características de altitud y pendiente bien definidas. Se hace una descripción de la zona de estudio, con las principales características de la zona.

Séptimo: **Conclusiones y recomendaciones**, se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

CAPITULO 1: CICLO HIDROLÓGICO Y CUENCA HIDROGRÁFICA

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es el principal constituyente de los seres vivos, es la sustancia más abundante en la Tierra y es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre. Es un factor clave en la climatización de nuestro planeta para la existencia humana y en la influencia en el progreso de la civilización.

El agua existe en un espacio llamado hidrósfera, que se extiende desde unos 15 km arriba en la atmósfera hasta 1 km por debajo de la litósfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrósfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico. Se encuentra presente en la atmósfera, en los océanos y mares, en hielos y glaciares, en lagos y ríos, y en el subsuelo. En total, se estima que existen alrededor de 1300 millones de km³ de agua, el 97% de ella, se concentra en los océanos y forma una reserva de agua salada, el 2% constituye los hielos y glaciares, de manera que, sólo un porcentaje inferior al 0,5%, constituye el agua fácilmente aprovechable por el hombre. Parece, a primera vista, una muy pequeña proporción del total de los recursos, pero ella es absolutamente indispensable para mantener la vida humana, la flora y la fauna del planeta. En la Tabla 1.1 se muestra una estimación de las cantidades de agua en sus distintas formas presentes en la tierra.

1.2 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es un fenómeno global de circulación del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera, impulsado fundamentalmente por la energía solar asociada a la gravedad y la rotación terrestre. Es el foco central de la hidrología, no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua.

El ciclo hidrológico global junto con la radiación solar forman el recurso básico para la producción biológica primaria. Provee el agua que es requerida para la asimilación del carbono y juega un papel importante en el suministro y transporte de nutrientes. Asimismo, el ciclo hidrológico es el responsable de regular las condiciones favorables de temperatura en la tierra.

Tabla 1.1 Distribución del Agua en la Tierra.

Ubicación	Volumen Miles de millones m ³	Porcentaje
Agua Superficial		
Lagos de agua dulce	123,000	0.009
Lagos salinos y mares int.	102,400	0.008
Canales y río	1,229	0.0001
Agua Subterránea		
No saturada (humedad suelo)	65,500	0.005
Agua subterránea (hasta 800m)	4,100,000	0.31
Agua subterránea profunda	4,100,000	0.31
Otras		
Glaciares y hielo	28,600,000	2.15
Humedad en la atmósfera	12,700	0.001
Océanos	1,298,000,000	97.3
Totales	1,335,104,829	100%

Ref.: Leopold, L.B., "Water , a primer", W.H. Freeman&Co., San Francisco, 1974

Aunque el contenido de agua en los sistemas superficiales y atmosféricos es relativamente pequeño, inmensas cantidades de agua pasan anualmente a través de ellos. El análisis del flujo y almacenamiento de agua en el balance global del agua da una visión global de la dinámica del ciclo hidrológico.

1.2.1 Balance hídrico global

El ciclo hidrológico comienza en el mar, donde las gotas de agua se encuentran sumergidas en lo más profundo del océano. Con ayuda del movimiento del agua marina las gotas se sumergen o suben y alcanzan la superficie. Durante el ascenso su temperatura aumenta hasta tener contacto con los rayos del sol, evaporándose en la atmósfera, es aquí donde las gotas de agua toman otra forma natural que es el cambio físico de líquido a vapor con ayuda de los rayos del sol, la evaporación de los océanos se estima que es 425,000 Km³.

El ascenso es constante y, con apoyo del viento, el vapor alcanza algunos kilómetros más arriba, donde sufre la pérdida de calor que lo detiene hasta formar otra vez gotas de agua o pequeños cristales de hielo, aquí el vapor ayudado con la baja temperatura se convierte nuevamente en agua. Millones de gotas o cristales darán origen, poco a poco, a las nubes suspendidas en el aire hasta que nuevos descensos de la temperatura multipliquen la unión de las gotas o cristales de hielo y provoquen así su caída en forma de lluvia. La lluvia sobre el océano se estima en 385 000 Km³. El flujo principal viaja de las regiones ecuatoriales cálidas a las de alta latitud.

La condensación de 40 000 Km³ del vapor originado en los océanos, y transportado por la circulación atmosférica, precipita sobre los continentes unido a 71 000 Km³ provenientes de la evapo-transpiración de los continentes. El exceso de 40 000 Km³ retorna a los océanos por medio de los ríos y aguas subterráneas.

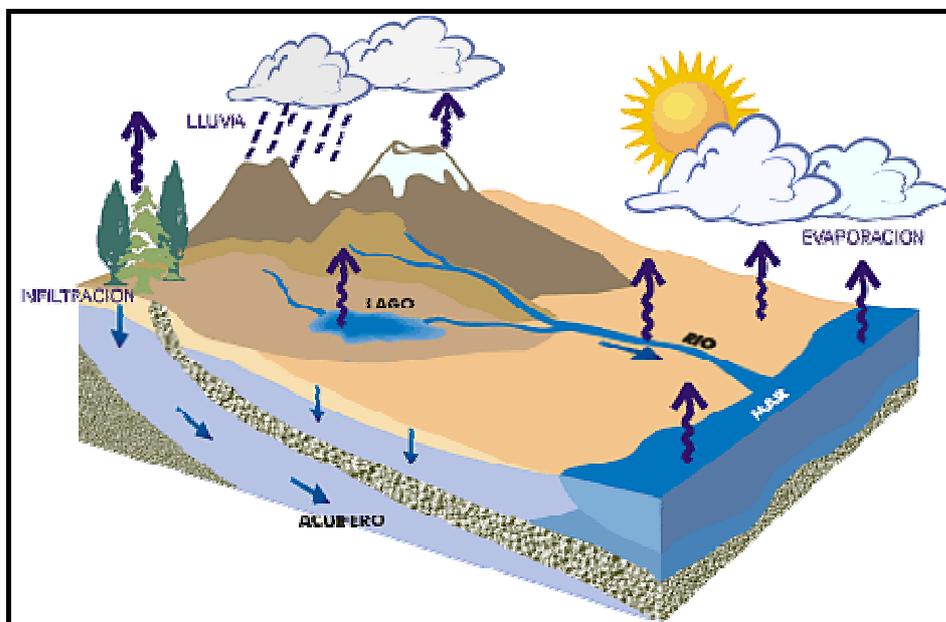


Figura 1.1 El ciclo hidrológico

1.2.2. Componentes del ciclo hidrológico

El agua que precipita en tierra puede tener varios destinos. Una parte es devuelta directamente a la atmósfera por evaporación; otra parte escurre por la superficie del terreno, la escorrentía superficial, que se concentra en surcos y va a originar las líneas de agua. El agua restante se infiltra, esto es penetra en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas.

Tanto el escurrimiento superficial como el subterráneo van a alimentar los cursos de agua que desaguan en lagos y en océanos.

La escorrentía superficial se presenta siempre que hay precipitación y termina poco después de haber finalizado esta. Por otro lado, el escurrimiento subterráneo, especialmente cuando se da a través de medios porosos, ocurre con gran lentitud y sigue alimentando los cursos de agua mucho después de haber terminado la precipitación que le dio origen.

Los procesos del ciclo hidrológico ocurren en la atmósfera y en la superficie terrestre por lo que se puede admitir dividir el ciclo del agua en dos ramas: aérea y terrestre.

El agua que precipita sobre los suelos va a repartirse, a su vez, en tres grupos: una que es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración y dos que producen escurrimiento superficial y subterráneo. Esta división está condicionada por varios factores, unos de orden climático y otros dependientes de las características físicas del lugar donde ocurre la precipitación.

Así, la precipitación, al encontrar una zona impermeable, origina escurrimiento superficial y la evaporación directa del agua que se acumula y queda en la superficie. Si ocurre en un suelo permeable, poco profundo y localizado sobre una formación geológica impermeable, se produce entonces escurrimiento superficial, evaporación del agua que permanece en la superficie y aún evapotranspiración del agua que fue retenida por la cubierta vegetal. En ambos casos, no hay escurrimiento subterráneo; éste ocurre en el caso de una formación geológica subyacente permeable y profunda.

1.2.2.1 Evaporación

La evaporación depende principalmente de dos factores: uno es la temperatura que determina la presión de vapor saturado y el otro es el intercambio turbulento de aire que está relacionado a la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie.

1.2.2.2 Precipitación

La lluvia es causada por la condensación y formación de nubes en la atmósfera cuando el aire es enfriado hasta su punto de rocío. Este enfriamiento es causado por expansión adiabática de las masas de aire ascendentes debido a la disminución de presión atmosférica con la altura. La liberación de calor por condensación puede proveer energía adicional para causar mayor elevamiento de masas de aire, lo que puede resultar en tormentas convectivas. La mayoría del vapor productor de lluvia ha sido objeto de transporte advectivo por circulación atmosférica.

1.2.2.3 Infiltración

Se entiende por infiltración el volumen de agua procedente de las precipitaciones, que en un determinado tiempo, atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo o de las formaciones geológicas subyacentes. No toda la infiltración alcanza la zona saturada, pues en mayor o menor proporción, una parte queda en la zona superior y vuelve a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración.

1.2.2.4 Evapotranspiración

Parte de la lluvia que llega a la tierra desaparece por evaporación, el agua restante puede correr a lo largo de las superficies o infiltrarse, recargando la humedad del suelo. Después que el suelo ha alcanzado condiciones específicas de humedad, el agua percola hacia la zona saturada, pero parte de esta humedad es evaporada principalmente a través de la transpiración de las plantas.

1.2.2.5 Escorrentía

El exceso de agua superficial así como parte del agua subterránea es descargado por los ríos a los océanos, y en menor proporción existe una descarga subterránea directa a los océanos.

El régimen de los ríos sigue principalmente el patrón estacional de lluvia y evapotranspiración con una atenuación y retraso por los procesos de almacenamiento. Los ríos responden rápido en áreas con suelos poco profundos, pendientes pronunciadas y baja capacidad de infiltración. Por el contrario, áreas con alta capacidad de infiltración, alto almacenamiento subsuperficial y alta permeabilidad se caracterizan por tener ríos de respuesta lenta con flujo base extendido. El total de la descarga global está conformado por flujo base y flujo directo.

1.2.2.6 Agua subterránea

En el suelo se pueden distinguir dos zonas muy diferenciadas: una zona superior no saturada con suelo húmedo y una zona inferior saturada con el agua subterránea propiamente dicha. Estas zonas están delimitadas por el nivel freático, la profundidad a la que éste se encuentra depende de la topografía, la estructura del suelo y el clima. El almacenamiento de agua subterránea en una capa está determinado por la porosidad, pero su facilidad de fluir depende de la permeabilidad, esto es, la interconexión y el tamaño de los poros.

1.3 CUENCA HIDROGRÁFICA

El ciclo hidrológico es normalmente estudiado con mayor interés en la fase terrestre, donde un elemento fundamental del análisis es la cuenca hidrográfica. Una cuenca hidrográfica es un área de captación natural del agua de la precipitación que converge hacia un único punto de salida. Se compone básicamente de un conjunto de superficies vertientes y de una red de drenaje formada por cursos de agua que fluyen hasta llegar a un lecho único.

La precipitación que cae sobre las vertientes no se infiltra totalmente. Sólo hasta que el suelo esté saturado superficialmente, comienzan a descender las tasas de infiltración y a surgir escorrentía superficial.

El escurrimiento superficial generado en las vertientes, puede ser interpretado como un producto de agua para escurrimiento rápido y por tanto las vertientes serían vistas como las productoras. Con este enfoque, el agua producida por las vertientes tiene como destino inmediato la red de drenaje, que se encarga de transportarla a la sección de salida de la cuenca.

La zona de inundación de los cursos de agua (lecho mayor) tendrá un comportamiento ambiguo:

- Al momento de la producción de escorrentía, inicialmente tienen los niveles de agua bajos y funcionan como zona vertiente,

- Al momento del transporte, cuando están en crecida, funcionan como zona de inundación para el escurrimiento.

CAPITULO 2: PRECIPITACIÓN

2.1 DEFINICIÓN

Se conoce como precipitación a la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre y proviene de la humedad atmosférica, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo). La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes para la Hidrología, y junto a la evaporación constituyen la forma mediante la cual la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico del agua.

La evaporación de la superficie del océano es la principal fuente de humedad para la precipitación, se puede decir que es el 90% de la precipitación que cae en el continente. Sin embargo, la mayor cantidad de precipitación no necesariamente cae sobre los océanos, ya que la circulación atmosférica transporta la humedad grandes distancias, como evidencia de ello se pueden observar algunas islas desérticas. La localización de una región con respecto a la circulación atmosférica, su latitud y distancia a una fuente de humedad son principalmente los responsables de su clima.

2.2 FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La humedad siempre está presente en la atmósfera y la precipitación proviene de la humedad, pero la presencia de humedad no garantiza que exista precipitación. Para que se produzca la precipitación es indispensable la acción de algunos mecanismos que enfríen el aire lo suficiente como para llevarlo o acercarlo a la saturación.

A medida que el vapor de agua va ascendiendo, se va enfriando y el agua se condensa de un estado de vapor a un estado líquido, formando la niebla, las nubes o los cristales de hielo. Para que esta formación se lleve a cabo, generalmente se requiere la presencia de núcleos de condensación, alrededor de los cuales las moléculas del agua se

pueden unir. Existen diversas partículas que pueden actuar como núcleos de condensación, con tamaños que varían desde 0.1 (aerosoles) hasta 10 μm de diámetro; entre estas partículas tenemos: algunos productos de la combustión como óxidos de nitrógeno y sulfuro, partículas de sal producto de la evaporación de la espuma marina y algunas partículas de polvo que flotan en el aire.

En las nubes pueden existir gotas de agua a temperaturas por debajo del punto de congelamiento hasta -40°C y es sólo en presencia de tales gotas sobrecongeladas que el núcleo helado natural es activado.

Las gotas o cristales de hielo crecen rápidamente debido a la nucleación, pero el crecimiento después de esto es lento. Mientras que las partículas que constituyen las nubes tienden a asentarse, los elementos promedio pesan tan poco que sólo un leve movimiento hacia arriba del aire es necesario para soportarlo.

Constantemente hay gotas de agua que caen de las nubes, pero su velocidad de caída es tan pequeña, que no llegan a la tierra porque muchas veces vuelven a evaporarse antes de alcanzarla y ascienden de nuevo en forma de vapor. Al aumentar el vapor, o si la velocidad de caída supera los 3 m/s, las gotas de agua incrementan su peso, provocando lluvia (Figura 2.1); cuando este peso se hace mayor, aumenta la velocidad de caída con lo cual la lluvia se intensifica y puede transformarse en una tormenta.



Figura 2.1 Esquema representativo del mecanismo de formación de precipitación

Los factores más importantes que conllevan a una precipitación significativa son: la colisión y la fusión de las partículas de la nube y de la precipitación. La colisión entre la nube y las partículas de la precipitación se presenta debido a diferencias en velocidades de caída como resultado de diferencias de tamaño (las partículas más pesadas caen más rápidamente que las partículas más pequeñas que son levantadas por las corrientes aéreas ascendentes y en algunos casos se evaporan). Las partículas que chocan se unen formando partículas más grandes, y el proceso se puede repetir varias veces, hasta cuando las gotas tienen el suficiente tamaño como para que puedan caer.

Las corrientes aéreas ascendentes más fuertes evitan que incluso las gotas de agua más grandes caigan y llevan todos los elementos de la precipitación a las porciones superiores de las nubes para producir una acumulación del agua líquida que excede en gran medida al de las partículas ordinarias de la nube. Eventualmente, el agua acumulada se precipita como resultado del debilitamiento de la corriente aérea ascendente o como sucede a menudo, por una corriente descendente, que se puede iniciar posiblemente por la masa del agua acumulada.

Cuando está precipitando repentinamente en una corriente descendente, las gotas de lluvia son de gran tamaño y el aguacero torrencial que resulta dura solamente algunos minutos. En una tempestad de truenos puede haber varios aguaceros, o explosiones, de un número de celdas, y la precipitación total pico puede duplicar el valor de precipitación alcanzado en una lluvia repentina.

En grandes cúmulos, donde no hay precipitación, la concentración máxima del agua líquida puede estar cerca de 4 g/m^3 , pero el valor medio para la nube pudo ser solamente la mitad de este valor. Concentraciones mayores que ésta producen precipitaciones que alcanzan la tierra.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

2.3.1 De acuerdo a sus características físicas

La precipitación puede adquirir diversas formas como producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales, siendo las más comunes las que se detallan a continuación:

2.3.1.1 Llovizna

En algunas regiones es más conocida como garúa, consiste en pequeñas gotas de agua líquida cuyo diámetro fluctúa entre 0.1 y 0.5 mm; debido a su pequeño tamaño tienen un asentamiento lento y en ocasiones parecen que flotarán en el aire. La llovizna usualmente cae de estratos bajos y rara vez excede de 1 mm/h.

2.3.1.2 Lluvia

Es la forma de precipitación más conocida. Consiste de gotas de agua líquida comúnmente mayores a los 5 mm de diámetro. En algunos países suelen clasificarla según su intensidad según su intensidad como ligera, moderada o fuerte (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Clasificación de la lluvia según su intensidad.

Intensidad	(mm/h)	Observaciones
Ligera	< 2.5	Las gotas se pueden identificar fácilmente unas de otras. Cuando existe una superficie expuesta seca, ésta tarda más de dos minutos en mojarse completamente.
Moderada	2.5-7.5	No se pueden identificar gotas individuales, se forman charcos con gran rapidez. Las salpicaduras de la precipitación se observan hasta cierta altura del suelo.
Fuerte	> 7.5	La visibilidad es escasa y las gotas que salpican sobre la superficie se levantan varios centímetros.

2.3.1.3 Escarcha

Es un depósito blanco opaco de gránulos de hielo más o menos separados por el aire atrapado y formada por una rápida congelación efectuada sobre gotas de agua sobrecongeladas en objetos expuestos (Figura 2.2), por lo que generalmente muestran la dirección predominante del viento. Su gravedad específica puede ser tan baja como 0.2 ó 0.3.

2.3.1.4 Nieve

Está compuesta de cristales de hielo, de forma hexagonal ramificada (Figura 2.3), y a menudo aglomerada en copos de nieve, los cuales pueden alcanzar varios centímetros de diámetro. Aparece cuando las masas de aire cargadas de vapor de agua se encuentran con otras cuya temperatura es inferior a 0°C. La densidad relativa de la nieve recién caída varía sustancialmente, pero en promedio se asume como 0.1.



Figura 2.2 Escarcha sobre un poste de madera



Figura 2.3 Cristales de nieve

2.3.1.5 Granizo

Es la precipitación en forma de bolas de hielo, producida por nubes convectivas. El granizo se forma a partir de partículas de hielo que, en sus desplazamientos por la nube, van "atrapando" gotas de agua. Las gotas se depositan alrededor de la partícula de hielo y

se congelan formando capas, como una cebolla. Los granizos pueden ser esferoidales, cónicos o irregulares en forma, y su tamaño varía desde 5 hasta 125 mm de diámetro, pudiendo llegar a destrozar cosechas.

2.3.2 De acuerdo al mecanismo de formación

La precipitación puede clasificarse teniendo en cuenta el factor principalmente responsable, ya que lo más frecuente es que sea generada por varios factores, del elevamiento de la masa de aire que la genera. Con base en ello se pueden distinguir tres tipos de precipitación, a saber:

2.3.2.1 Precipitación Ciclónica

Resulta del levantamiento del aire que converge en un área de baja presión o ciclón. Cuando se encuentran dos masas de aire, una caliente y una fría, en lugar de mezclarse, aparece una superficie de discontinuidad definida entre ellas, llamada frente (ver Figura 2.4). El aire frío al ser más pesado, se extiende debajo del aire caliente por lo que el aire caliente se eleva y su vapor de agua se puede condensar y producir precipitación. Si el aire caliente avanza hacia el aire frío, el borde es un frente caliente, el cual tiene una pendiente baja entre 1/100 y 1/300, y el aire caliente fluye hacia arriba lentamente y por encima del aire frío. Las áreas de lluvia asociadas con estos frentes pueden ser muy grandes y la precipitación es generalmente ligera a moderada y casi continua hasta el paso del frente. Si el aire frío avanza hacia el aire caliente, el borde de la masa de aire frío es un frente frío el cual tiene una pendiente casi vertical, con lo cual el aire caliente es forzado hacia arriba más rápidamente que en el frente caliente.

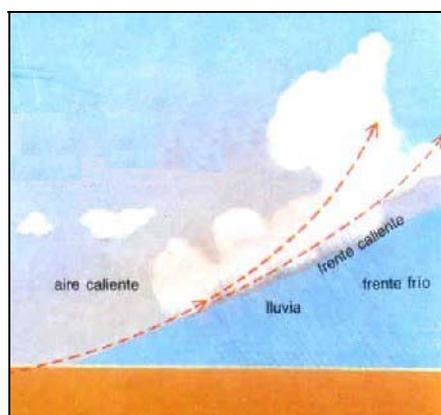


Figura 2.4. Precipitación Ciclónica

2.3.2.2 Precipitación Convectiva

Es el tipo de precipitación que predomina en la zona de costa del departamento de Piura por acción de los anticiclones norte y sur del atlántico. Se presenta cuando una masa de aire cálido tiende a elevarse, por ser menos pesado que el aire de la atmósfera circundante. La diferencia en temperatura puede ser resultado de un calentamiento diferencial en la superficie (Figura 2.5), enfriamiento diferencial en la parte superior de una capa de aire, o por la elevación mecánica cuando el aire se fuerza a pasar sobre una masa de un aire más denso (ciclones), o sobre una barrera montañosa. A medida que la masa se eleva, el aire se enfría pues cae su punto de precipitación. Esto genera la condensación de parte del vapor de agua dentro de la masa de aire, formando nubes. Estas

nubes descargan lluvia con incremento en el calor latente a través del proceso de precipitación. Un claro ejemplo de este tipo de precipitación son las tormentas eléctricas al atardecer que se desarrollan en días calurosos de aire húmedo, precipitación desde el interior de encumbradas nubes en forma de yunque. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquellas que corresponden a lloviznas y aguaceros.

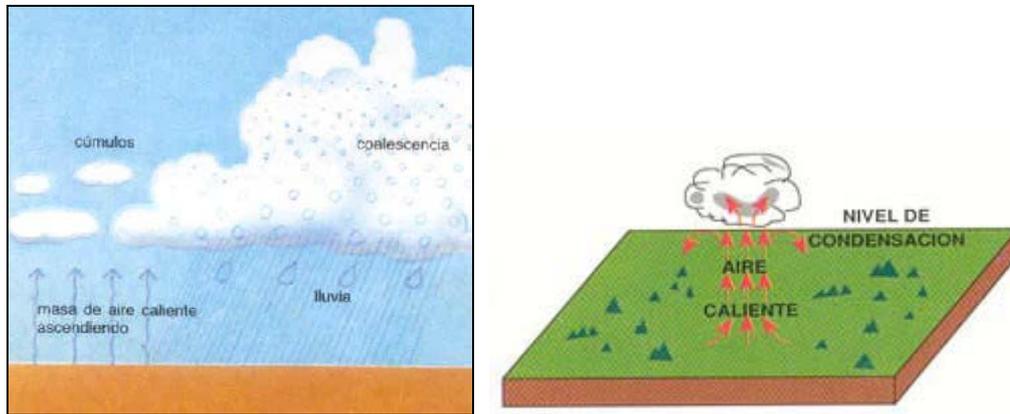


Figura 2.5. Precipitación Convectiva

2.3.2.3 Precipitación Orográfica

Resulta del choque entre las corrientes oceánicas de aire que cruzan sobre la tierra y las barreras montañosas (Figura 2.6), generando la elevación mecánica del aire, el cual posteriormente se enfría bajo la temperatura de saturación y vierte humedad, este tipo de precipitación suele ser la que se presentan en la zona montañosa del departamento de Piura, por ejemplo. En terrenos rugosos la influencia orográfica es marcada, tanto que los patrones de precipitación de tormentas tienden a asemejarse al de la precipitación media anual. La mayoría de las lluvias orográficas son depositadas sobre las pendientes a barlovento.

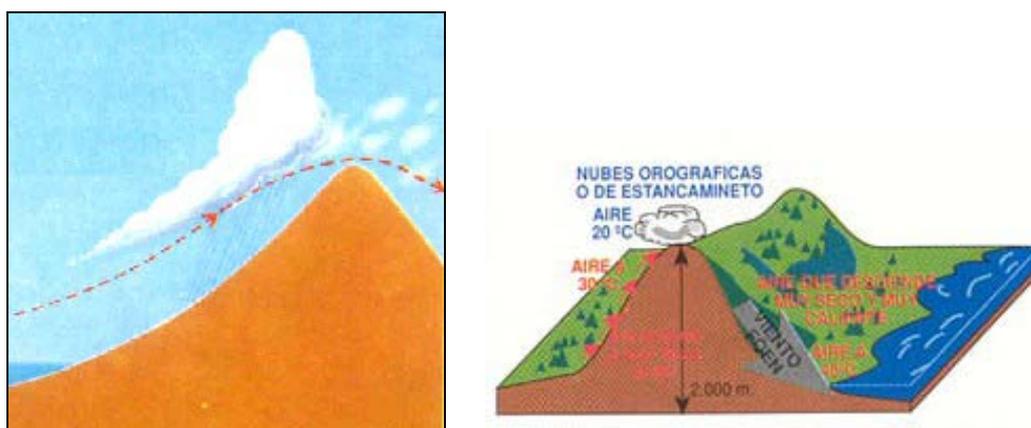


Figura 2.6. Precipitación orográfica.

En la naturaleza los efectos de estos diversos tipos de enfriamiento del aire se correlacionan con bastante frecuencia entre sí, y la precipitación resultante no puede ser identificada estrictamente como perteneciente a alguno de estos tipos de precipitación, sino más bien como una interacción entre ellos.

2.4 PLUVIOMETRÍA

Para fines prácticos, lo que interesa es determinar la cantidad de precipitación que llega a la superficie terrestre, para lo cual se mide con una regla graduada en milímetros, la altura que alcanzaría en el suelo la lámina de agua si no se filtrara o escurriera. En América Latina la precipitación es medida en milímetros y décimas, mientras que en los Estados Unidos la precipitación es medida en pulgadas y centésimas.

En el Perú, la precipitación es registrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), mediante su red de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio peruano. Adicionalmente, para la zona norte del país se han instalado algunas estaciones meteorológicas en las cuencas de los ríos Piura y Chira controladas por el Sistema de Alerta Temprana (SIAT).

Piura tiene un clima seco en la zona costera y templado en la zona montañosa, por lo que la lluvia es la principal forma de precipitación que se presenta en el departamento, pero en otras partes del mundo la precipitación puede ser casi completamente nieve o en zonas más áridas, rocío.

2.4.1 Instrumentos de medición

Se han desarrollado gran variedad de instrumentos para obtener información de la precipitación. La información obtenida puede ser de diversa índole; se puede mencionar: la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, el tiempo de inicio y de término de la precipitación, y la cantidad e intensidad de la precipitación, siendo esta última la que más interesa para la determinación de las tormentas de diseño. Existen básicamente dos tipos de medidores que registran la cantidad e intensidad de la lluvia, siendo ellos:

2.4.1.1 Medidores sin registro o pluviómetros

Cualquier recipiente abierto de lados verticales, como los de la Figura 2.7, es apropiado para medir la lluvia, pero debido a la variación del viento y el efecto de salpicadura las medidas no son comparables a menos que los recipientes sean del mismo tamaño, forma y exposición similar. Por lo que hay patrones preestablecidos para los medidores estándar y para su instalación y operación.

El medidor estándar de la U.S. National Weather Service tiene un colector de 20.3 cm de diámetro. La lluvia pasa del colector hacia el interior de un tubo de medición cilíndrico dentro de un envase de demasías. El tubo de medición tiene un área de sección transversal igual a un décimo de la del colector, es decir que 0.1 mm de precipitación llenarán el tubo una altura de 1 mm. Con una vara de medición graduada, la lluvia puede ser medida con precisión de hasta 0,1 mm. Este tipo de medidores se emplea generalmente para la medición de la precipitación diaria, para ello un observador toma la lectura en la vara de medición a determinada hora todos los días.

Otro tipo de medidores sin registro son los medidores de almacenamiento, los cuales se emplean para medir la precipitación en todo un período de tiempo, por ejemplo un mes o una estación, por lo que deben estar dotados de un mayor volumen de

almacenamiento. Estos son ubicados en lugares remotos y de difícil acceso, en donde la toma de lecturas diarias es una labor muy complicada.

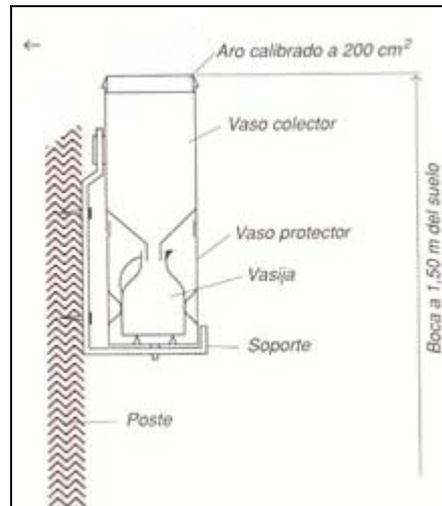


Figura 2.7 Pluviómetro.

2.4.1.2 Medidores con registro o pluviógrafos

Son instrumentos que registran la precipitación automáticamente y de manera continua en intervalos de tiempo de hasta una semana. Estos medidores son más costosos y más propensos a error, pero pueden ser la única forma posible para ciertos sitios remotos y de difícil acceso. Estos medidores tienen la gran ventaja que indican la intensidad de la precipitación, la cual es un factor de importancia en muchos problemas.

Tres tipos de medidores con registro son comúnmente empleados, el medidor de cubeta basculante, el de balanza y el medidor de flotador.

En el primero de ellos el agua es capturada por un colector que es seguido por un embudo, el cual conduce el agua hacia el interior de una cubeta de dos compartimientos. 0,1 mm de lluvia harán que la cubeta pierda el balance, por lo cual ésta se inclinará vaciando el contenido hacia el interior de un recipiente y moviendo el segundo compartimiento hacia el lugar debajo del embudo. Cuando el balde está inclinado acciona un circuito eléctrico y el aparato de registro mide la intensidad de la lluvia.

Los medidores de balanza, pesan la lluvia que cae dentro de un balde, sobre la plataforma de un resorte o control balanceado. El incremento del peso del balde y su contenido es registrado en una gráfica.

El medidor de flotador, posee un compartimiento donde se aloja un flotador que sube verticalmente a medida que va acumulando lluvia. Este medidor está dotado de un sifón que cada cierto tiempo desaloja el agua almacenada. Estos pluviógrafos trabajan porque tienen un papel de tambor (Figura 2.8), que rota por el accionar de una máquina de reloj, sobre el cual un lapicero registra en uno y otro sentido el movimiento basculante, la variación del pesaje, o los cambios en el flotador.



Figura 2.8. Pluviógrafo

En los años ochenta se estuvo investigando lo referente al efecto de la exposición de los medidores de lluvia y se llegó a la conclusión que resultados más precisos serán obtenidos a partir de medidores de lluvia con su borde al nivel del suelo, que con uno colocado a una determinada altura sobre el terreno. Para ello es necesario una instalación especial al nivel del suelo, haciendo una fosa para alojar el medidor y cubriéndolo con una malla anti-salpicaduras. Por lo tanto los medidores a nivel del suelo tienen una más costosa instalación y mantenimiento, razón por la cual se ha dejado de lado su empleo.

2.4.2 Redes de medición

Cuando se desea instalar un red de estaciones para medir la precipitación, la pregunta que frecuentemente surge es la concerniente al número y tipo de medidores de lluvia que son necesarios para asegurar una evaluación más precisa de la precipitación caída. En respuesta a ello cabría señalar que para determinar la densidad de la red de trabajo, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- El uso que se pretenda dar a los datos, ya que una red relativamente espaciada de estaciones podría ser suficiente para estudios de tormentas genéricas grandes o para la determinación de promedios anuales sobre grandes áreas planas, mientras que una red muy densa es requerida para determinar patrones de precipitación en las tormentas.
- El tipo de precipitaciones de la zona, afecta la densidad de la red ya que si las precipitaciones que se producen son de origen frontal, la red puede ser menos densa con respecto a las del tipo convectivo, que por lo general son más puntuales.
- Los efectos orográficos, que generan mayores distorsiones en la precipitación que las que se pueden presentar en zonas planas, y por tanto necesitan de una red mucho más densa para su correcta evaluación.

La probabilidad de que el centro de una tormenta sea registrado por un medidor varía con la densidad de la red de estaciones. Una red de trabajo deberá ser planeada para producir una imagen representativa de la distribución de la precipitación sobre el área. Por otro lado, existen consideraciones importantes relacionadas con el costo de la instalación y el mantenimiento de la red y la accesibilidad para el observador del sitio donde se encuentre ubicado el medidor.

Las siguientes densidades mínimas de las redes para medir precipitaciones han sido recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial para propósitos hidrometeorológicos generales:

- Para regiones planas en zonas templadas, mediterráneas y tropicales, 600 a 900 Km² por estación.
- Para regiones montañosas en zonas templadas, mediterráneas y tropicales, 100 a 250 Km² por estación.
- Para pequeñas islas montañosas con precipitación irregular, 25 Km² por estación.
- Para zonas áridas y polares, 1 500 a 10 000 Km² por estación.

2.4.3 Precisión en su estimación

La información sobre la diferencia entre la precipitación captada y la realmente caída es de interés climatológico, y la exactitud en su medición y evaluación es determinante para el análisis de las tormentas que se presentan en una zona específica.

La medición de la precipitación se ve afectada por dos tipos de errores, cuya evaluación es de mucha importancia para la obtención de valores representativos de la zona de estudio. Dichos errores se pueden subdividir en dos grupos, a saber:

2.4.3.1 Error en la medida puntual

El efecto de los vientos modifica la trayectoria de caída de las gotas de lluvia, haciendo que los valores registrados en los instrumentos de medición sean relativamente menores, por esto la precipitación medida puntualmente con pluviómetros es menor que la que realmente cae.

Para la estimación del error en la medición de la precipitación puntual se debe tener en cuenta que:

- No en todos los sitios se toman valores cien por ciento representativos.
- No se deben tomar mediciones si tenemos dudas con respecto a la precisión.
- El conjunto de la precipitación es extremadamente grande en comparación con la muestra obtenida en el instrumento.

El error en la medida puntual vendría a ser la suma de:

- Errores debido a la combinación de factores meteorológicos e instrumentales como: evaporación o condensación en el pluviómetro durante el periodo comprendido entre el fin de la lluvia y su medida.
- Error netamente instrumental.

- Errores cometidos en la lectura del instrumento o corrección por accidentes imprevistos.

2.4.3.2 Error en la evaluación espacial

Los errores de muestreo, en términos de la altura, se incrementan con el aumento del área media de precipitación y decrecen con el aumento en la densidad de la red, la duración de la precipitación y el tamaño del área. Por tanto, una red cualquiera tendería a producir menores errores promedio para precipitaciones mensuales que para tormentas.

Por otro lado como las lluvias de verano tienen una gran variación espacial, los errores promedio tienden a ser mayores que para las de invierno.

La base para la evaluación de la precipitación caída en una zona son las medidas puntuales registradas en los distintos instrumentos que conforman la red de trabajo.

2.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

La precipitación no es uniforme pues varía en el espacio y el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales propios de cada región. En términos generales, se puede decir que las mayores precipitaciones ocurren cerca del Ecuador y tienden a disminuir cuando aumenta la latitud.

Uno de estos factores locales pueden ser las barreras orográficas que a menudo ejercen más influencia en el clima de una región que lo que la cercanía a una fuente de humedad hace. Estos factores climáticos y geográficos determinan la cantidad de humedad atmosférica sobre una región, la frecuencia y clase de tormentas producidas sobre ella y así su precipitación.

Un caso especial para analizar es el fenómeno de El Niño, que afecta vastas áreas continentales de Asia, Oceanía, Europa y América, y particularmente la costa Norte del Perú, incluyendo los departamentos de Piura y Tumbes, y la costa ecuatoriana. Dicha anomalía es producto de causas esencialmente meteorológicas como lo es el debilitamiento del Anticiclón del Pacífico Sur, lo que conlleva a que las aguas cálidas del norte fluyan hacia el sur en el área normalmente ocupada por el agua fría, y el desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical, formada por los vientos alisios del sudeste y los que soplan del noreste; si a todo ello le sumamos la actividad convectiva tendremos las condiciones apropiadas para que se presenten lluvias torrenciales en todas las zonas directamente involucradas.

En el Perú las intensidades de la precipitación tienden a ser mayores en la sierra norte (partes altas de Piura), selva norte y Amazonía, y van decreciendo al llegar a la costa en condiciones normales, sin El Niño.

En cuanto a la variación con respecto al tiempo podemos mencionar que, aunque en ocasiones algunos de los registros pluviométricos lleven a pensar que existe un aumento o disminución en la tendencia de los patrones de la precipitación, lo cierto es que ella tiende a volver a la media, ya que periodos extraordinariamente húmedos tienden a balancearse con periodos de sequía. Por otro lado, a lo largo del año suelen existir periodos

estacionales en los cuales la precipitación es mayor; para el caso de Piura se puede observar que la precipitación tiende a presentarse en los meses de verano.

La variación de la precipitación dentro de una tormenta, es grande y depende de varios factores como son: la magnitud, la duración y el tipo de tormenta, por lo que no se puede aplicar un solo patrón para todos los casos.

2.6 PRECIPITACIÓN PROMEDIO SOBRE UN ÁREA

Para evaluar la cantidad promedio de precipitación sobre un área en un intervalo de tiempo determinado es necesario basarse en los valores puntuales registrados en cada medidor que conforma la red. Pero como la contribución de cada instrumento al total de la tormenta es desconocida, han surgido varios métodos que intentan darnos una aproximación de la distribución de la precipitación dentro del área en consideración, entre estos métodos tenemos:

2.6.1 Método de la media aritmética

Es una forma sencilla para determinar la lluvia promedio sobre un área. Consiste en hallar la media aritmética de las cantidades conocidas para todos los puntos en el área (Figura 2.9). Este método proporciona buenos resultados, si la distribución de tales puntos sobre el área es uniforme y la variación en las cantidades individuales de los medidores no es muy grande.

2.6.2 Método de Thiessen

Se emplea cuando la distribución de los pluviómetros no es uniforme dentro del área en consideración. Para su cálculo se define la zona de influencia de cada estación mediante el trazo de líneas entre estaciones cercanas, éstas líneas se bisecan con perpendiculares y se asume que toda el área encerrada dentro de los límites formados por la intersección de estas perpendiculares en torno a la estación ha tenido una precipitación de la misma cantidad que la de la estación (Figura 2.9). A veces es necesario hacer una pequeña variación a esta técnica para corregir posibles efectos orográficos, y en lugar de trazar perpendiculares al punto medio de la distancia entre las estaciones se dibujan líneas que unen las estaciones desde los puntos de altitud media.

Calculando el área encerrada por cada estación y relacionándola con el área total, se sacan pesos relativos para cada pluviómetro y posteriormente el valor de la precipitación promedio se obtiene a partir de un promedio ponderado.

2.6.3 Método de las isoyetas

Las isoyetas son contornos de igual altura de precipitación (ver Figura 2.9), que se calculan a partir de interpolación entre pluviómetros adyacentes. Las áreas entre isoyetas sucesivas son medidas y se multiplica por el promedio de precipitación entre la isoyetas adyacentes, el promedio total para el área es entonces la sumatoria de éste producto entre el área total considerada. Este método tiene la ventaja que las isoyetas pueden ser trazadas para tener en cuenta efectos locales, y por ello es posiblemente el que mejor nos aproxima a la verdadera precipitación promedio del área.

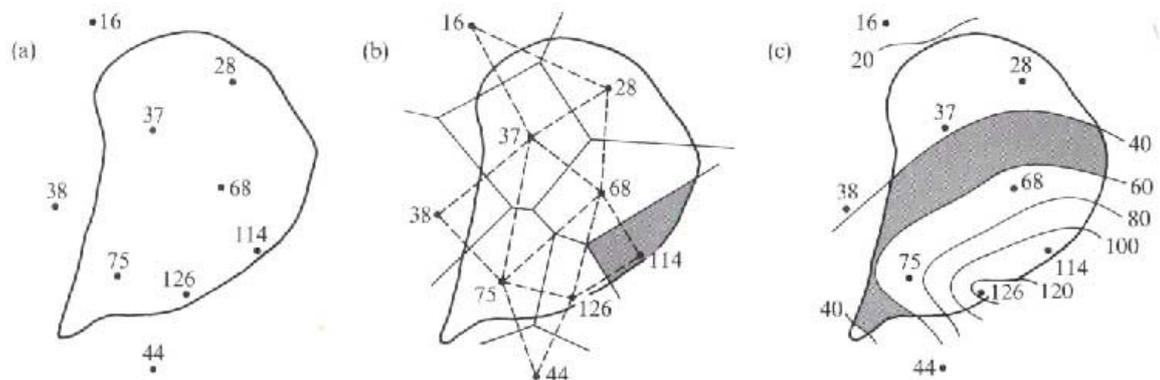


Figura 2.9. Diferentes métodos de estimar la precipitación promedio sobre un área:

- (a) Método de la media aritmética.
- (b) Método de los polígonos de Thiessen.
- (c) Método de las isoyetas.

2.7 ANÁLISIS DE TORMENTAS

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. De acuerdo a esta definición una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días; pueden abarcar extensiones de terrenos muy variables, desde pequeñas zonas hasta vastas regiones.

El análisis de las tormentas está íntimamente relacionado con los cálculos o estudios previos al diseño de obras de ingeniería. En efecto, las dimensiones de estas obras dependen principalmente que las tormentas tengan y de la frecuencia con que ellas se presenten en el lugar para el que se está diseñando la obra. Quiere decir entonces, que debemos conocer su intensidad por unidad de tiempo y el tiempo de duración que determina las dimensiones de la obra, y la frecuencia con que se presenta determinada tormenta, bien definida en sus características de intensidad y duración, que a su vez determina el coeficiente de seguridad que se da a la obra o la vida útil.

2.7.1 Elementos fundamentales

2.7.1.1 Intensidad

Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta es la intensidad máxima que se haya presentado. Es decir, la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo. De acuerdo a esto la intensidad se expresa de la siguiente manera:

$$i_m = P/t$$

donde :

- i_m = Intensidad máxima en mm/h;
- t = Tiempo en horas;
- P = Precipitación en altura de agua en mm.

2.7.1.2 Duración

Es el tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta, tomado en minutos u horas, dentro del total que dura la tormenta. Tiene mucha importancia en la determinación de las intensidades máximas.

Estos parámetros: intensidad y la duración se obtienen de un pluviograma o banda pluviográfica.

2.7.1.3 Frecuencia

Es el número de veces que se repite una tormenta de características de intensidad y duración definidas en un período de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años.

2.7.2 Hietogramas

La intensidad de la precipitación varía en cada instante durante el curso de una misma tormenta de acuerdo a las características de ésta. Cuando se hace el análisis de tormentas es indispensable determinar estas variaciones porque de ellas dependen muchas condiciones que hay que fijar para las obras de ingeniería. Esto se consigue mediante el hietograma o histograma de precipitación, que es un gráfico de forma escalonada que representa la variación de la intensidad (en mm/h) de la tormenta en el transcurso de la misma (en minutos u horas). Mediante este hietograma es muy sencillo determinar a qué hora la precipitación adquirió su máxima intensidad y cuál fue el valor de ésta.

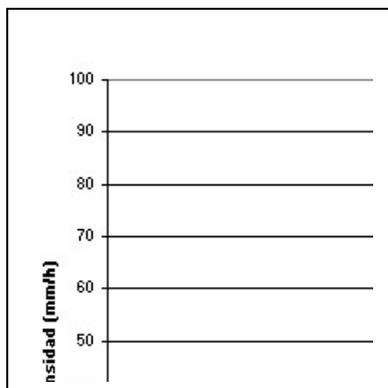


Figura 2.10. Hietograma de precipitación

2.8 TORMENTAS DE DISEÑO

Se define una tormenta de diseño como un patrón de precipitación para ser usado en el diseño de un sistema hidrológico. Generalmente se emplean como dato de entrada en el análisis de modelos de lluvia – escorrentía para estimar hidrogramas de avenidas en cuencas.

Para una zona en particular, la selección de la tormenta de diseño, no es un trabajo sencillo, pues la intensidad de la lluvia no es constante, ni el tiempo, ni en el espacio. Es dentro de este contexto, donde el hidrólogo debe seleccionar una tormenta de diseño. Si a ello le sumamos la escasa disponibilidad de registros pluviográficos, como es habitual en el Perú, entenderemos la complejidad de esta etapa.

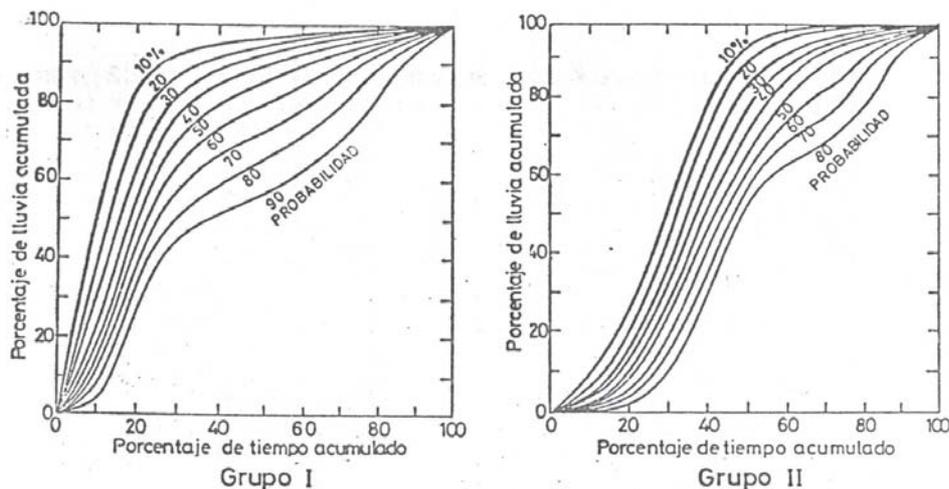
La variación en el tiempo de la lluvia caída durante una tormenta, tiene una gran influencia en la forma de la onda de crecida. Debido a ello, el hietograma de la tormenta debe ser considerado en la definición de una tormenta de diseño. Varios autores han estudiado las tormentas de diseño, entre ellos tenemos Huff, Varas y el SCS.

2.8.1 Modelo de Huff

Huff en 1967 estudió la distribución en el tiempo de 261 tormentas fuertes, ubicadas en un área de 400 millas cuadradas en el estado de Illinois, Estados Unidos. Clasificó las tormentas en cuatro grupos, dependiendo del intervalo de tiempo en que se presentó la mayor precipitación, ya sea en el primer, segundo, tercer o último cuarto de la duración total de la tormenta. Para cada grupo realizó un análisis de frecuencia de todas las tormentas registradas, con el fin de asociar a cada una de las curvas de distribución una probabilidad de ocurrencia.

Detectó la necesidad de clasificar las tormentas según el momento en que cae la mayor precipitación, ya que ésta normalmente se concentra en un lapso relativamente corto comparado con la duración total de la tormenta.

En la figura 2.11 se pueden observar los resultados del estudio de Huff y permiten distribuir una tormenta cuya duración y magnitud total se conoce, en intervalos de tiempo más cortos, teniendo al mismo tiempo, una idea de la probabilidad de ocurrencia de dicho hietograma.



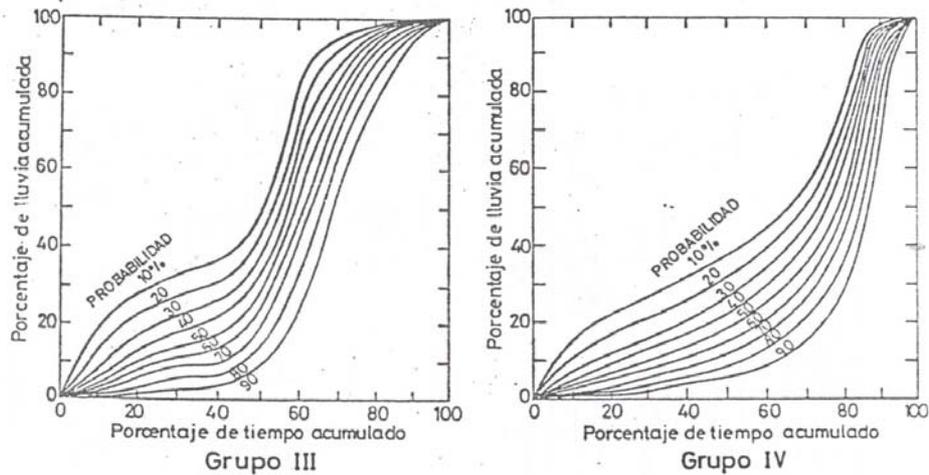


Figura 2.11. Distribuciones propuestas por Huff.

2.8.2 Modelo de Varas

Varas en 1985 estudió la distribución de 296 tormentas registradas en distintas estaciones pluviográficas en Chile. A diferencia de Huff, Varas trabajó con una muestra formada seleccionando dentro de cada tormenta los intervalos más lluviosos, para posteriormente clasificarlos en uno de cuatro grupos, similares a los definidos por Huff. Razón por la cual los perfiles obtenidos (Figura 2.12) presentan una menor variación a lo largo del tiempo.

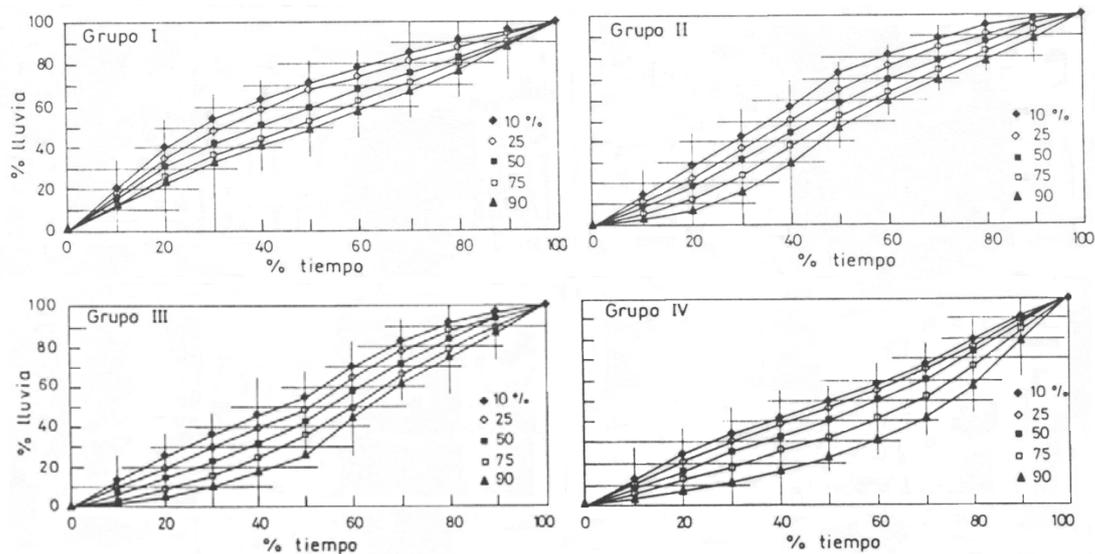


Figura 2.12. Distribuciones propuestas por Varas para Chile.

Varas no encontró dependencia geográfica significativa para las curvas de distribución, de modo que las curvas promedio encontradas son aplicables a otros lugares en Chile.

2.8.3 Método del SCS

El U.S. Soil Conservation Service (USSCS) desarrolló hietogramas sintéticos empleando la información presentada por Hershfield en 1961 y Miller et al en 1973. Estos hietogramas son para precipitación de 24 horas y propone 4 distribuciones: Tipo I, IA, II, y III. Las distribuciones son propuestas en base al patrón de precipitación para 4 zonas de EE.UU., motivo por el cual es el método más usado en EEUU.

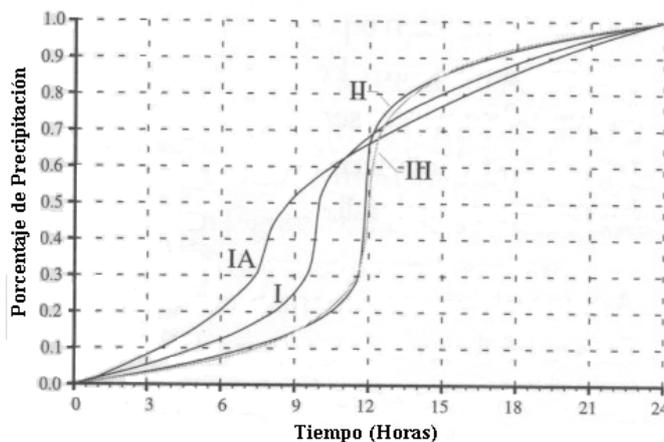


Figura 2.13. Hietogramas de lluvia de 24 horas del SCS.

2.9 RELACIONES INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA

Los valores de frecuencia, nos dan los elementos de juicio básicos para la realización de cálculos previos al diseño de obras de ingeniería. Por eso conviene representar estos valores en otras formas más manejables y de más fácil lectura, con el fin de poder interpolar valores que no se encuentren en la tabla.

Las familias de curvas de duración-intensidad-frecuencia nos permiten saber cual será el valor de la intensidad máxima para una zona determinada y para un tiempo de referencia que se presente con una frecuencia de cierto período de tiempo.

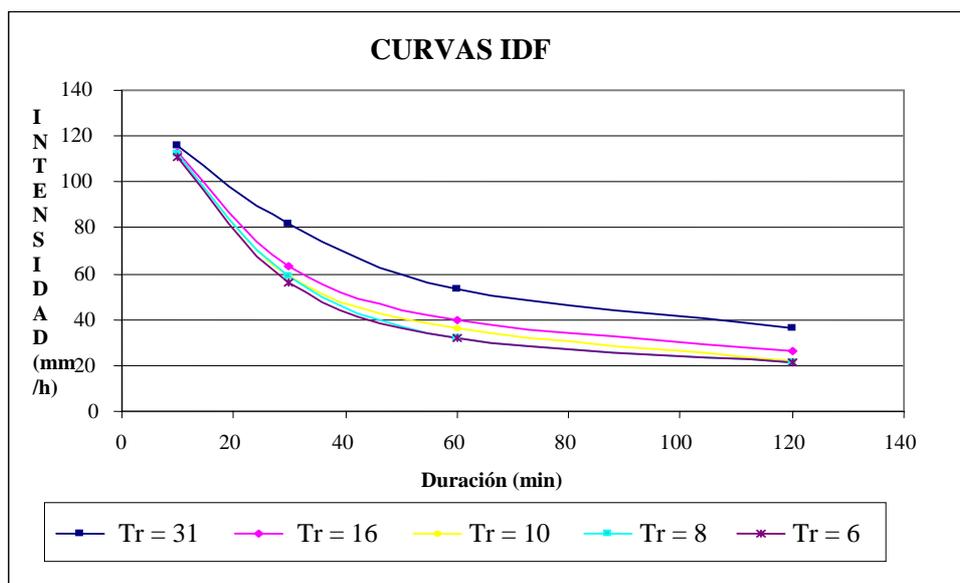


Figura 2.14. Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia.

Una consideración importante a tener en cuenta, es que las curvas IDF se calculan con base en valores de lluvias ocurridos normalmente en distintas tormentas a lo largo del tiempo y no en un fenómeno meteorológico único, de tal manera que ellas representan una situación algo distinta a la que se quiere representar.

CAPÍTULO 3: INFILTRACIÓN

3.1 DEFINICIÓN

El agua precipitada sobre la superficie de la tierra, queda detenida, se evapora, discurre por ella o penetra hacia el interior. Se define como infiltración al paso del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Es un proceso que depende fundamentalmente del agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo, el estado de la superficie y las cantidades de agua y aire inicialmente presentes en su interior.

A medida que el agua infiltra desde la superficie, las capas superiores del suelo se van humedeciendo de arriba hacia abajo, alterando gradualmente su humedad. En cuanto al aporte de agua, el perfil de humedad tiende a la saturación en toda la profundidad, siendo la superficie el primer nivel a saturar. Normalmente la infiltración proveniente de precipitaciones naturales no es capaz de saturar todo el suelo, sólo satura las capas más cercanas a la superficie, conformando un perfil típico donde el valor de humedad decrece con la profundidad.

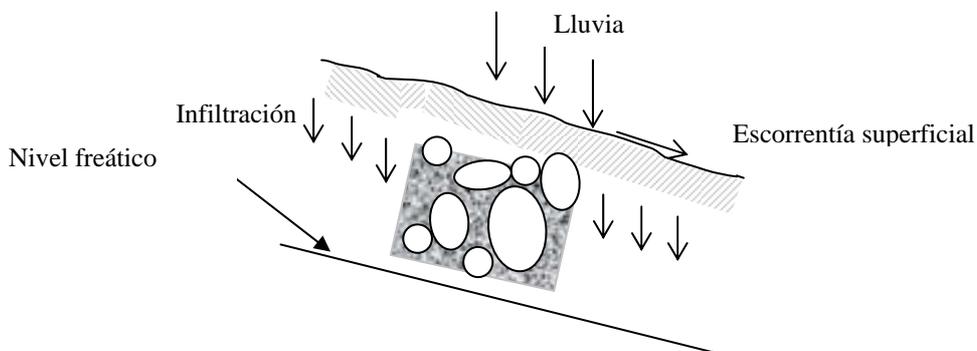


Figura 3.1. Infiltración en el suelo

Cuando cesa el aporte de agua en la superficie, deja de haber infiltración, la humedad en el interior del suelo se redistribuye, generando un perfil de humedad inverso, con valores de humedad menores en las capas cercanas a la superficie y mayores en las capas más profundas.

3.2 CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN Y TASA DE INFILTRACIÓN

El concepto de capacidad de infiltración es aplicado al estudio de la infiltración para diferenciar el potencial que el suelo tiene de absorber agua a través de su superficie, en términos de lámina de tiempo, de la tasa real de infiltración que se produce cuando hay disponibilidad de agua para penetrar en el suelo.

Una curva de tasas reales de infiltración solamente coincide con la curva de las capacidades de infiltración de un suelo cuando el aporte superficial de agua, proveniente de la precipitación y de escurrimientos superficiales de otras áreas, tiene una intensidad superior o igual a la capacidad de infiltración.

Cuando cesa la infiltración, parte del agua en el interior del suelo se propaga a las capas más profundas y una parte es transferida a la atmósfera por evaporación directa o por evapotranspiración. Ese proceso hace que el suelo vaya recuperando su capacidad de infiltración, tendiendo a un límite superior a medida que las capas superiores del suelo van perdiendo humedad.

Si la precipitación presenta una intensidad menor a la capacidad de infiltración, toda el agua penetra el suelo, provocando una progresiva disminución de su capacidad de infiltración, ya que el suelo se está humedeciendo. Si la precipitación continúa, puede ocurrir, dependiendo de su intensidad, un momento en que la capacidad de infiltración disminuye tanto que su intensidad se iguala a la de la precipitación. A partir de ese momento, manteniéndose la precipitación, la infiltración real iguala a la capacidad de infiltración, que pasa a decrecer exponencialmente en el tiempo tendiendo a un valor mínimo. La parte no infiltrada de la precipitación escurre superficialmente hacia áreas más bajas, pudiendo infiltrar nuevamente, si hubiera condiciones.

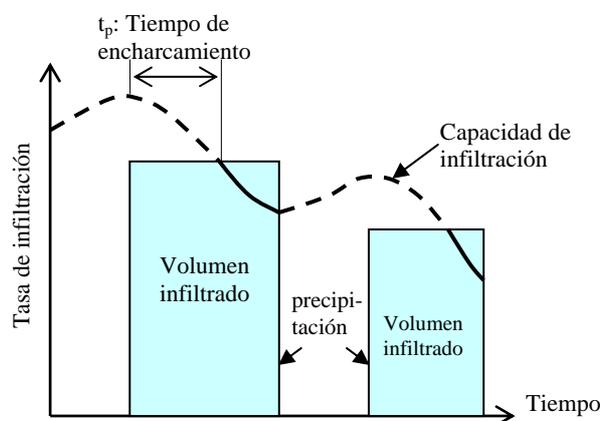


Figura 3.2. Curvas de capacidad y tasas de infiltración

Cuando termina la precipitación y no hay más aporte superficial la tasa de infiltración real se hace cero rápidamente y la capacidad de infiltración vuelve a crecer, porque el suelo continúa perdiendo humedad hacia las capas más profundas, además de las pérdidas por evapotranspiración. Los valores de infiltración dependerán del espacio y del tiempo. La figura 3.2 muestra el desarrollo típico de las curvas representativas de la evolución temporal de la infiltración real y de la capacidad de infiltración ante la ocurrencia de una precipitación.

A continuación se dan algunos valores promedios de capacidad de infiltración para distintos tipos de suelos:

Tabla 3.1. Valores promedio de infiltración

Tipo de suelo	Capacidad de Infiltración (mm/h)
Arena	50
Limo arenoso	25
Limo arcilloso	12

3.3 ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

3.3.1 Redistribución interna

Después que termina la precipitación y no hay agua en la superficie del suelo, llegamos al final del proceso de infiltración, esto no implica que el movimiento de agua en el interior del suelo también deje de existir. La capa superior del suelo que fue casi o totalmente saturada durante la infiltración no retiene toda esa agua, surgiendo un movimiento descendente en respuesta a los gradientes gravitacional y de presión. Ese movimiento de agua en el interior del suelo después de terminada la infiltración es denominado drenaje o redistribución interna. Dependiendo de las condiciones existentes la velocidad con que la redistribución ocurre puede ser apreciada en minutos, días o tornarse simplemente despreciable.

3.3.2 Humedad del suelo

La humedad del suelo puede ser expresada en base a la masa o volumen de agua. La humedad que tiene como referencia la masa (humedad gravimétrica) es definida como la relación entre la masa de agua y la masa de suelo.

$$w = \frac{m_a}{m_t} \quad (3.1)$$

La humedad volumétrica es definida como la relación entre el volumen de agua y el volumen total.

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \quad (3.2)$$

Las humedades gravimétrica y volumétrica pueden relacionarse con la ecuación:

$$\theta = w \frac{d_s}{d_a} \quad (3.3)$$

donde:

d_s = densidad del suelo
 d_a = densidad del agua.

Siendo:

$$d_s = \frac{m_t}{V_t} \quad (3.4)$$

$$d_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (3.5)$$

Otra relación importante desde el punto de vista práctico es la que ocurre entre la humedad volumétrica, la saturación y la porosidad. La saturación es definida por la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos, mientras que la porosidad es definida por la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. A partir de estos conceptos, se puede establecer la siguiente relación:

$$\theta = \phi * S \quad (3.6)$$

donde:

$$\phi = \text{porosidad} = \frac{V_v}{V_T}$$

$$S = \text{saturación} = \frac{V_a}{V_v}$$

3.4 ECUACIÓN GENERAL DE INFILTRACIÓN

La ecuación general considera flujo de agua en medio no saturado. Este tipo de flujo puede describirse con la ecuación de Darcy, originalmente desarrollada para suelos saturados:

$$q = K \text{ grad } h \quad [L^2 T^{-1}] \quad (3.7)$$

donde:

q = velocidad de Darcy [$L^2 T^{-1}$]
 K = conductividad hidráulica del suelo [LT^{-1}]
 h = carga piezométrica [L]

En suelos no saturados K varía con la humedad del suelo, teniendo como límite la conductividad hidráulica saturada K_{sat} . h , por su parte, tiene dos componentes principales en un suelo no saturado, en función de las energías involucradas:

$$h = \phi + z \quad [L] \quad (3.8)$$

donde:

ϕ = potencial capilar, altura de agua equivalente que ejerce la misma tensión de succión capilar [L].
 Z = potencial gravitacional (profundidad) [L].

La carga piezométrica de agua “ h ” se mide en dimensiones de altura pero también puede entenderse como la energía por unidad del peso del fluido.

3.5 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN PUNTUAL

Existen diversas ecuaciones para estimar la infiltración. Entre ellas tenemos las de Green – Ampt, Horton y Philip. A continuación se presentan algunas de ellas. Todas las ecuaciones presentadas desprecian la carga de una eventual lámina de agua sobre el suelo.

3.5.1. Ecuación de Horton

Una de las primeras ecuaciones de infiltración fue desarrollada por Horton en 1939, quien a partir de experimentos de campo, estableció, para el caso de un suelo sometido a una precipitación con intensidad siempre superior a la capacidad de infiltración, una relación empírica para representar el declive de la infiltración con el tiempo puede ser presentada de la siguiente forma:

$$I_t = I_b + (I_i - I_b) e^{-k t} \quad (3.9)$$

donde:

t = tiempo pasado desde la saturación superficial del suelo

k = constante de decaimiento [T^{-1}]

I_t = tasa de infiltración en el tiempo t

I_i = tasa de infiltración inicial (t = 0)

I_b = tasa mínima de infiltración (asintótica).

La tasa mínima de infiltración I_b teóricamente sería igual a la conductividad hidráulica saturada K_{sat} , si no hubiese el efecto del aire comprimido en el interior del suelo, dificultando la infiltración. Por eso I_b es normalmente menor que K_{sat} .

El ajuste de la ecuación de Horton a datos medidos en campo permite la determinación de los parámetros I_i , I_b y k. El parámetro I_b es fácilmente identificable en los experimentos, porque representa la conductividad hidráulica saturada aparente del suelo (aparente porque incluye la resistencia proporcionada por el aire comprimido en los poros del suelo natural). El parámetro I_i también es obtenido inmediatamente de los experimentos porque es una tasa de infiltración inicial, esto es una tasa de infiltración en el momento en que es alcanzada la saturación superficial y comienza a haber escurrimiento (exceso) superficial, lo que equivale a decir que I_i es igual a la intensidad de la precipitación que saturó la superficie del suelo. Establecidos I_b e I_i resta apenas determinar el parámetro k, lo que es hecho a través del ajuste de la ecuación anterior a los puntos I y t medidos en campo.

Integrando la ecuación anterior con respecto al tiempo, se obtiene la ecuación de los volúmenes infiltrados acumulados en el tiempo:

$$V_f = \frac{I_i - I_b}{k} (1 - e^{-k t}) + I_b t \quad (3.10)$$

donde V_f = volumen infiltrado acumulado hasta el tiempo t, contado a partir del momento en la superficie del suelo se saturó.

3.5.2. Ecuación de Philip

Philip en 1957 planteó la tasa de infiltración mediante la siguiente expresión:

$$I = C t^{-1/2} + A + D t^{1/2} + E t + \dots \quad (3.11)$$

donde t es el tiempo pasado desde el inicio de la infiltración y C , A , D y E son coeficientes que dependen del medio poroso.

La serie da altas tasas de infiltración iniciales, pero ofrece resultados totalmente incoherentes para tiempos mayores, porque predice altas tasas de infiltración para un largo tiempo, cuando la experiencia indica un decaimiento. Esa incoherencia ocurre del propio método de solución utilizado, el método de las perturbaciones, donde la gravedad fue considerada como una pequeña perturbación en relación a la capilaridad, lo que no es verdad cuando el suelo se encamina para la saturación.

El procedimiento utilizado para perfilar este problema es la interrupción de la serie manteniéndola hasta el término A , inclusive. Este término, entonces, pasa a ser interpretado como la tasa residual de infiltración equivalente al I_b de Horton.

El volumen infiltrado acumulado deducido de la serie interrumpida es el siguiente:

$$V_f = S t^{1/2} + A t \quad (3.12)$$

donde $S = 2C$ es definida como la absorción del suelo.

Introduciendo la absorción en la ecuación de la tasa de infiltración, se obtiene:

$$I = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + A \quad (3.13)$$

El ajuste de esa ecuación a datos medidos en el campo es análogo a los anteriores, siendo A equivalente a la I_b (Horton). Los parámetros A y S son los parámetros de ajuste en este caso.

Por otro lado, existen en la literatura varias ecuaciones empíricas que derivan o se asemejan a la solución de Philip. Un ejemplo es la fórmula de Kostyakov, de 1932, que tiene la siguiente expresión:

$$V_f = a t^b \quad (3.14)$$

donde a y b son parámetros empíricos.

3.5.3. Ecuación de Green-Ampt

Green y Ampt en 1911 propusieron un modelo simplificado para infiltración. Este modelo es derivado de la ecuación de Darcy a través de simplificaciones en el fenómeno de propagación del frente húmedo en el interior del suelo.

Básicamente estas simplificaciones consisten en que el suelo es considerado totalmente saturado desde la superficie hasta la profundidad del frente húmedo; abajo, el suelo continúa con la humedad previa a la precipitación. A medida que el frente húmedo avanza se mantienen estas condiciones; en la superficie del frente húmedo, que separa el

suelo saturado del no saturado, la tensión capilar es siempre la misma, en cualquier tiempo y posición que tenga el frente.

En resumen, es un pistón de agua relleno de los poros del suelo succionado para abajo con una tensión constante. Desde la superficie hasta la profundidad L que alcanza el frente húmedo, el potencial capilar ϕ pasa de cero a un valor ϕ_f y el potencial gravitacional z varía de cero a L . Consecuentemente la carga piezométrica h varía de cero a $\phi_f + L$, entre la superficie del terreno y la profundidad del frente húmedo. Sustituyendo esa relación en la ecuación de Darcy, se obtiene entonces la ecuación de Green y Ampt:

$$f = K' \frac{\phi_f + L}{L} \quad (3.15)$$

donde:

f = tasa o velocidad de infiltración [LT^{-1}],
 K' = conductividad hidráulica saturada aparente del suelo [LT^{-1}].

Considerando que: $f = dF/dt$, el volumen infiltrado acumulado, F , está dado por:

$$F = L(\theta' - \theta_i) \quad (3.16)$$

donde:

f = tasa o velocidad de infiltración [LT^{-1}],
 K' = conductividad hidráulica efectiva del suelo [LT^{-1}].
 θ' = $\theta_{sat} - \theta_{air}$ = contenido de humedad máximo;
 θ_{sat} = contenido de humedad detrás del frente húmedo, equivale al volumen de vacíos por unidad de volumen de suelo;
 θ_{air} = aire atrapado por unidad de volumen de suelo;
 θ_i = contenido de humedad inicial del suelo.

Integrando la ecuación 3.9 de Green y Ampt, el volumen infiltrado acumulado, F , está dado por:

$$f = K' \frac{S_f + F}{F} \quad (3.17)$$

donde S_f es un factor de succión-almacenamiento:

$$S_f = \phi_f (\theta' - \theta_i) \quad (3.18)$$

Despejando F en la ecuación 3.17 y analizando el momento de la saturación superficial se obtiene el volumen infiltrado desde el inicio de la precipitación hasta el encharcamiento:

$$F_p = \frac{S_f}{r/K' - 1} \quad (3.19)$$

siendo r la intensidad constante de precipitación que infiltra completamente en este período. Esto lleva a la deducción de la siguiente expresión del tiempo de encharcamiento:

$$t_p = \frac{1}{r} \frac{S_f}{(r/K' - 1)} \quad (3.20)$$

Como, $f = dF/dt$ se puede obtener una ecuación implícita de $F(t)$ integrando la ecuación 3.17, siendo los límites inferiores de integración $t = t_p$ y $F = F_p$. De este cálculo se obtiene:

$$F(t) = K'(t - t_p) + F_p + S_f \ln \left[\frac{F(t) + S_f}{F_p + S_f} \right] \quad (3.21)$$

La ecuación 3.21 permite evaluar el volumen infiltrado F para diferentes tiempos t , y por consiguiente las tasas f , con lo que se puede determinar el hietograma de precipitación efectiva a partir de un hietograma de precipitación total.

Rawls y Brakensiek presentaron ábacos de estimación de la succión ϕ_f y de la conductividad hidráulica K' , con base en el porcentaje de arcilla y de arena del suelo. Con estos ábacos más uno de la porosidad ϕ , que corresponde a la θ_{sat} , se puede calcular la infiltración originada por una precipitación, conociendo la textura del suelo. Los ábacos referidos se presentan en la figura 3.3. El uso de los valores contenidos en esos ábacos debe ser con mucho cuidado pues no hacen referencia a la estructura del suelo, lo que puede modificar sensiblemente los parámetros de infiltración.

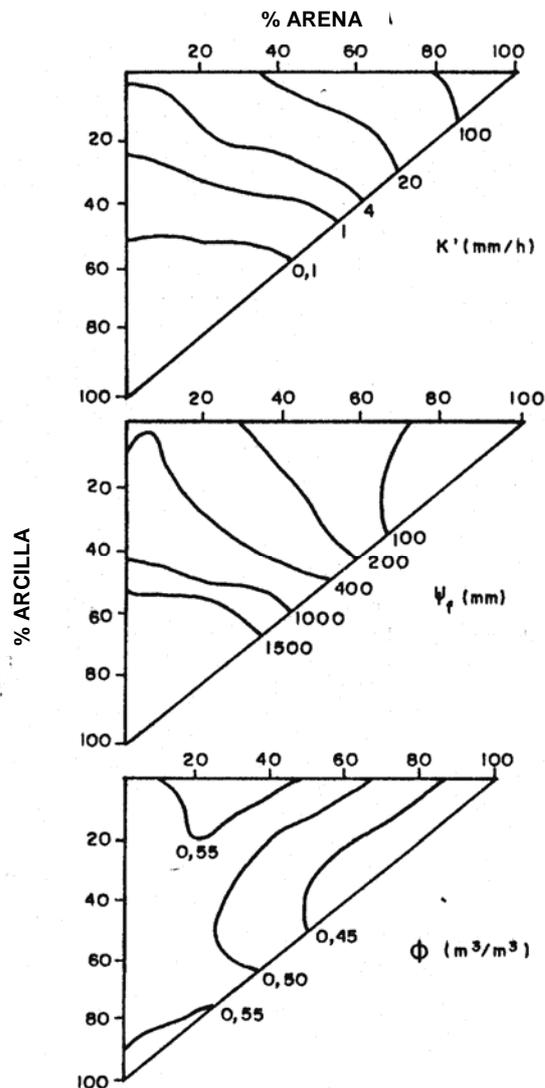


Figura 3.3. Ábacos de Rawls y Brakensiek (1989).

CAPITULO 4: SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

4.1 ASPECTOS GENERALES

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un tipo especial de base de datos capaz de manejar datos espacialmente referenciados, los cuales pueden representarse gráficamente. Entre las posibilidades de un SIG destaca su capacidad de trabajar con una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real, los cuales tienen información georeferenciada o de tipo espacial. Mediante la utilización de esta información, un SIG es capaz de procesar y analizar integralmente toda la información almacenada, de modo que puede analizarse la presencia simultánea de características que pertenecen a representaciones cartográficas distintas.

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico está íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis.

Los SIG son una herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional. Para las dependencias estatales son un instrumento que permite la planificación de la expansión de las ciudades y el uso eficiente de la infraestructura de utilidades de servicios públicos. Para instituciones de investigación y desarrollo ayudan en el estudio de la distribución y monitoreo de recursos, tanto naturales como humanos, así como en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente natural. De esta forma ayudan en la planificación de actividades tendientes a la preservación de los recursos naturales.

Toda la información que puede proveer un SIG depende enormemente de la información que se tiene, es decir, de la base de datos disponible. La calidad de esta base de datos y su contenido determinan la cantidad y calidad del resultado obtenido del SIG.

El esfuerzo o inversión necesaria para crear las bases de datos necesarias y tener un SIG funcional y eficiente no es necesariamente pequeño, es un esfuerzo continuo por aumentar y mejorar los datos almacenados. Es una búsqueda constante de la forma más eficiente de hacer un trabajo de conversión de datos y en hacerlo con un criterio de control de calidad.

4.1.1 Historia

La distribución espacial es inherente tanto a los fenómenos propios de la corteza terrestre como a los fenómenos artificiales y naturales que sobre ella ocurren. Todas las sociedades que han gozado de un grado de civilización han organizado de alguna manera la información espacial.

En el siglo XIX, con su avance tecnológico basado en el conocimiento científico de la tierra, se produjeron grandes volúmenes de información geomorfológica que se debía cartografiar. La orientación espacial de la información se conservó con la superposición de mapas temáticos especializados sobre un mapa topográfico base.

Recientemente la fotografía aérea y particularmente las imágenes de satélite han permitido la observación periódica de los fenómenos sobre la superficie de la corteza terrestre. La información producida por este tipo de sensores ha exigido el desarrollo de herramientas para lograr una representación cartográfica de este tipo de información.

El medio en el cual se desarrollaron estas herramientas tecnológicas correspondió a las ciencias de teledetección, análisis de imágenes, reconocimiento de patrones y procesamiento digital de información, en general estudiadas por físicos, matemáticos y científicos expertos en procesamiento espacial. Obviamente, éstos tenían un concepto diferente al de los cartógrafos, con respecto a la representación visual de la información.

Con el transcurso del tiempo se ha logrado desarrollar un trabajo multidisciplinario y es por ésta razón que ha sido posible pensar en utilizar la herramienta conocida como "Sistemas de Información Geográfica, SIG (GIS)".

4.1.2 Desarrollo de los SIG

Los primeros estudios cartográficos fueron desarrollados por los portugueses en el siglo XV, quienes bordearon las costas del continente africano. Recién en el año 1962, en Canadá se diseñó el primer sistema "formal" de información geográfica para el mundo de recursos naturales a escala mundial. La comercialización de los SIG surgió en la época de los ochenta. Durante las décadas del sesenta y setenta se empezó a aplicar la tecnología del computador digital al desarrollo de tecnología automatizada. Excluyendo cambios estructurales en el manejo de la información, la mayoría de programas estuvieron dirigidos hacia la automatización del trabajo cartográfico; algunos pocos exploraron nuevos métodos para el manejo de información espacial.

El desarrollo paralelo de las disciplinas que incluyen la captura, el análisis y la presentación de datos en un contexto de áreas ha implicado duplicidad de esfuerzos. Hoy en día se ha logrado reunir el trabajo en el área de sistemas de información geográfica

multipropósito, en la medida en que se superan los problemas técnicos y conceptuales inherentes al proceso.

A partir de 1998 se empezaron a colocar en distintas órbitas una serie de familias de satélites que traen a las computadoras personales fotografías digitales de la superficie de la tierra con resoluciones que oscilan entre 10 metros y 50 centímetros. Diversas empresas han iniciado la creación de uno de los mecanismos que será responsable de la habilitación espacial de la tecnología informática.

Las imágenes pancromáticas, multiespectrales, hiperespectrales, radar, infrarrojas y térmicas, crearán un mundo virtual digital a nuestro alcance. Este nuevo mundo cambiará radicalmente la percepción que tenemos sobre nuestro planeta.

4.2 CONCEPTO DE SIG

Los SIG son sistemas diseñados para almacenar, actualizar, analizar, desplegar y manipular datos espaciales de lugares u objetos referenciados espacialmente, para resolver problemas complejos de planeación y administración.

La información debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación.

Los SIG desarrollan ese proceso de análisis y síntesis, pero no son el proceso en sí. Tampoco las computadoras y los programas para operarlas constituyen el sistema de información geográfica; aunque muy importantes, son únicamente el componente operativo de dichos sistemas.

4.3 COMPONENTES DE UN SIG



Figura 4.1. Componentes de un SIG

4.3.1 Equipos o hardware

Es la computadora en donde el SIG opera. Hoy en día el software de los SIG corre en un amplio rango de Hardwards desde servidores centralizados hasta computadoras de escritorio y configuraciones en red.

4.3.2 Programas o software

Los programas de SIG proveen las funciones y las herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica. Los componentes clave son:

- Herramientas para el ingreso y la manipulación de información geográfica.
- Sistema que maneje bases de datos (DBMS).
- Herramientas que soportan planteamientos geográficos, análisis y visualización.
- Interfase gráfica del usuario (GUI) para un acceso fácil a las herramientas.

4.3.3 Datos

Probablemente la parte más importante de un sistema de información geográfica son sus datos. Los datos geográficos y tabulares pueden ser adquiridos por quien implementa el sistema de información, así como por terceros que ya los tienen disponibles. El sistema de información geográfica integra los datos espaciales con otros recursos de datos y puede incluso utilizar los manejadores de base de datos más comunes para manejar la información geográfica.

4.3.4 Recurso humano

La tecnología de los SIG está limitada si no se cuenta con el personal que opera, desarrolla y administra el sistema; y que establece planes para aplicarlo en problemas del mundo real. Frecuentemente subestimado, sin gente, los datos se desactualizan y se manejan equivocadamente, el hardware no se utiliza en todo su potencial y el software se mantiene "misterioso". Los usuarios de SIG varían desde especialistas técnicos, que diseñan y mantienen el sistema, hasta aquellos que lo utilizan para ayudar a realizar sus tareas diarias.

4.3.5 Procedimientos

Un SIG operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del negocio, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización.

4.4 APLICACIONES DE LOS SIG

La utilidad principal de los SIG radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, así como para utilizar esos modelos en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica produce sobre un determinado escenario en una época específica.

La construcción de modelos constituye un instrumento muy eficaz para analizar las tendencias y determinar los factores que las influyen, así como para evaluar las posibles consecuencias de las decisiones de planificación sobre los recursos existentes en el área de interés.

Los SIG se utilizan en cualquier disciplina que necesite la combinación de planos cartográficos y bases de datos como:

- Diseño de carreteras,
- Presas y embalses,
- Estudios medioambientales,
- Estudios socioeconómicos y demográficos,
- Drenaje urbano,
- Ordenamiento territorial,
- Planificación de líneas de comunicación,
- Estudios agrícolas,
- Estudios geológicos y geofísicos,
- Estudios de minería y sus efectos,
- Manejo de cuencas.

4.5 MODELACIÓN DE UN SIG

La tecnología de los SIG en la mayoría de los casos se ha desarrollado sin una profundización teórica que sirva de base para su diseño e implementación. Para sacar el mayor provecho de esta técnica, es necesario ahondar en ciertos aspectos teóricos y prácticos que los especialistas no deben perder de vista, partiendo de que no se puede confundir el SIG con digitalizar y teclear datos en el computador.

Al iniciar el estudio para diseñar un SIG, debe pensarse que se van a manejar objetos que existen en la realidad, tienen características que los diferencien y guardan ciertas relaciones espaciales que se deben conservar; por lo tanto, no se puede olvidar en ningún caso que se va a desarrollar en el computador un modelo de objetos y relaciones que se encuentran en el mundo real.

Normalmente se llevan a cabo tres etapas para pasar de la realidad del terreno al nivel de abstracción (Figura 4.2) que se representa en el computador y se maneja en los SIG y que definen la estructura de los datos, de la cual dependerán los procesos y consultas que se efectuarán en la etapa de producción.

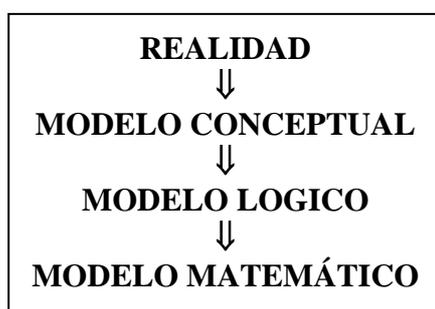


Figura 4.2. Modelación de un SIG

4.5.1 Modelo conceptual

Es la conceptualización de la realidad por medio de la definición de objetos de la superficie de la tierra (entidades) con sus relaciones espaciales y características (atributos) que se representan en un esquema describiendo esos fenómenos del mundo real. Para

obtener el modelo conceptual, el primer paso es el análisis de la información y los datos que se usan.

4.5.2 Modelo lógico

Es en esta etapa donde se elaboran las estructuras en que se almacenarán todos los datos, tomando como base el modelo conceptual desarrollado anteriormente. Se trata de hacer una descripción detallada de las entidades, los procesos y análisis que se llevarán a cabo, los productos que se espera obtener y la preparación de los menús de consulta para los usuarios.

En esta parte de diseño del SIG se definen los diferentes tipos de análisis que se estarán llevando a cabo más adelante y las consultas que se vayan a realizar comúnmente, esto por cuanto de la estructura de las bases de datos (gráficas y alfa – numéricas) dependen los resultados obtenidos al final; es por lo anterior, que en esta etapa, se hace un diseño detallado de lo que contendrá el SIG.

Una vez definido el modelo conceptual y el lógico, se conoce cuáles mapas se han de digitalizar y qué información alfa – numérica debe involucrarse.

Tanto el modelo conceptual como el lógico, son independientes de los programas y equipos que se vayan a utilizar y de su correcta concepción depende el éxito del SIG.

4.5.3 Modelo matemático

Es la implementación de los anteriores modelos en el software seleccionado y los equipos específicos en que se vaya a trabajar, y por esto se realiza de acuerdo con sus propias especificaciones. Determina en qué forma se debe almacenar los datos, cumpliendo con las restricciones y aprovechando las ventajas del sistema específico a utilizar.

A cada objeto contenido en una categoría se le asigna un único identificador. Cada objeto está caracterizado por una localización única (atributos gráficos con relación a unas coordenadas geográficas) y por un conjunto de descripciones (atributos no gráficos).

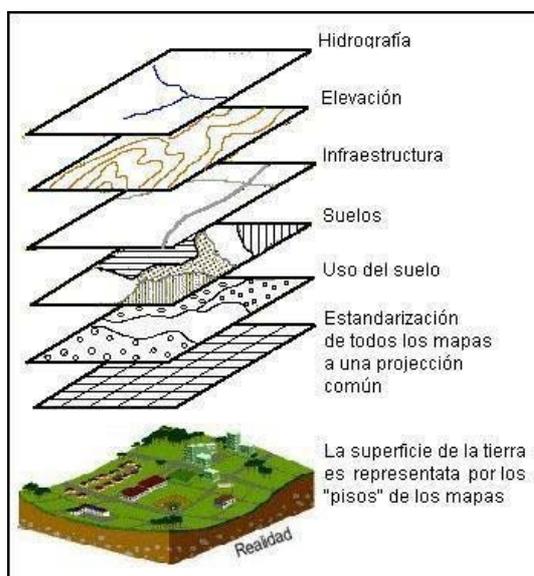


Figura 4.3. Información por coberturas

El modelo permite relacionar y ligar atributos gráficos y no gráficos. Las relaciones se establecen tanto desde el punto de vista posicional como topológico.

Los datos de posición indican dónde está el elemento, y los datos topológicos informan sobre la ubicación del elemento con relación a los otros elementos. Los atributos no gráficos expresan qué es, y cómo es el objeto. El número identificador, que es único para cada objeto de la categoría, es almacenado tanto en el archivo o mapa de objetos como en la tabla de atributos, lo cual garantiza una correspondencia estricta entre los atributos gráficos y no gráficos.

4.6 MODELACIÓN HIDROLÓGICA EMPLEANDO SIG

Uno de los aspectos de mayor interés de los modelos digitales es la posibilidad de realizar simulación de procesos. La simulación permite obviar los riesgos inherentes a la experimentación, alcanzar una completa independencia temporal y repetir el experimento un número de veces indeterminado.

Un modelo hidrológico requiere de una vasta información para representar las características físicas e hidrológicas de una cuenca; si el modelo es además de tipo distribuido, la cantidad de información que se requiere es mayor. 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 hoy se puedan realizar cálculos cada vez más cuantitativos. El empleo de un SIG conjuntamente con un modelo hidrológico no es sin embargo trivial, se requiere de al menos tres grandes pasos:

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

El primer paso es obviamente el más largo y tedioso, ya que por lo general es necesario digitalizar la información impresa en papel (topografía, geología, tipo de suelo, etc.) para convertirla al formato digital.



Figura 4.4. Digitalización de información

El modelo a utilizar depende de la problemática hidrológica a estudiar. El SIG, por su parte, debe poder ofrecer funcionalidades para la captura, edición y análisis de la información que requiere el modelo. El aspecto económico es otro factor a considerar, el software ARC/INFO tiene un enorme potencial de aplicación, pero su costo es de los más elevados; en el extremo opuesto, el software Idrisi es quizás de los más económicos, pero tiene la desventaja de no disponer de algunos módulos hidrológicos necesarios. La respuesta a la pregunta planteada es entonces un compromiso entre los alcances que se persiguen, las funcionalidades del SIG y de la relación beneficio/costo de su adquisición.

En cualquier caso, la utilización de un SIG en un proceso de modelación hidrológica tiene como propósito facilitar la adquisición y preparación de datos espaciales y posteriormente la presentación y despliegue de resultados.

En cuanto al potencial de aplicación en el ámbito de la hidrología de cuencas, hay numerosos ejemplos. La utilización puede ir desde simples aplicaciones para cálculos hidrológicos específicos como son el cálculo de hidrogramas unitarios, cálculo de redes de drenaje y acumulación de flujo, hasta el desarrollo de sistemas expertos que permiten la planeación y operación óptima de los recursos hidráulicos a nivel regional, o bien para la operación óptima de un sistema de control de avenidas. Todo ello pasando por la modelación hidrológica de cuencas acoplando un SIG con un modelo hidrológico. Sin embargo, en Perú es todavía incipiente la utilización de los SIG's con propósitos hidrológicos.

4.6.1 Cuencas

Las características topográficas de una región determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El modelo de elevación digital (DEM) contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial y la extensión de la cuenca.

El caudal que puede circular en un momento dado depende, entre otros factores, de la magnitud del área subsidiaria, de las precipitaciones sobre ella y de la pendiente de la zona que permite la circulación con mayor o menor rapidez.

4.6.2 Proceso lluvia-escorrentía

El proceso lluvia-escorrentía es un proceso muy complejo y casi imposible de experimentar directamente. Desarrollar un modelo matemático utilizando SIG, obedece a las características fundamentalmente espaciales de la información empleada y a la gran capacidad de estos sistemas para almacenar y manejar los datos, así como para visualizar resultados.

La simulación del proceso para la obtención de caudales, necesita de un modelo en el que cada celda tenga asignado un valor que representa el agua disponible para circular hacia la celda siguiente. Estos datos se determinan a partir de interpolación entre estaciones meteorológicas y factores de infiltración, dependiendo del tipo de suelo y cobertura vegetal.

4.7 SOFTWARE SIG

En la actualidad existe una gran cantidad de programas que se emplean como software SIG. A continuación se presentan algunos de estos software que se encuentran en el mercado.

4.7.1 Arc View

El software Arc View es el de mayor difusión y aplicabilidad en el mundo entero y siendo ESRI su fabricante. Arc View posee la versatilidad de permitir la inclusión de extensiones o subrutinas al programa, las mismas que le añaden importantes características y funcionalidad.

Toda la actividad en Arcview tiene lugar dentro del proyecto, una colección de documentos asociados con los que se trabaja durante la sesión de Arcview. Los proyectos pueden contener cinco tipos de documentos: vistas, tablas, gráficos, layouts o salidas impresas y scripts. Un proyecto organiza y almacena el estado de todos estos documentos, gestiona cómo y dónde se despliegan los documentos, mantiene activas las selecciones de documentos y define la apariencia de la ventana de aplicación. La información del proyecto se almacena en un archivo en formato ASCII.

4.7.2 ArcInfo

El programa ArcInfo de Esri es un SIG con capacidades para la automatización, modificación, administración, análisis y despliegue de información geográfica. Conocido a nivel mundial como un estándar de los SIG, ArcInfo soporta un amplio espectro de aplicaciones y contiene unos cientos de funciones avanzadas para el geoprocésamiento. Realiza proyecciones de mapas y transformaciones, administración y manipulación de datos, superposición de polígonos y corredores, análisis espacial de datos incluyendo avanzadas capacidades para el modelamiento lineal.

4.7.3 Erdas Imagine

Brinda programas de percepción remota o teledetección e interpretación de imágenes fotográficas, así como toda una línea de productos raster para SIG. Principalmente se aplica para actividades relacionadas con la industria forestal, la agricultura, el manejo de los recursos naturales, las telecomunicaciones, la ingeniería ambiental, industrias de extracción u otro campo relativo a la geografía, ramas donde se utiliza una amplia gama de información geográfica y que se apoyan en la toma de decisiones.

4.7.4 Idrisi

Es un software SIG para tratamiento digital de imágenes desarrollado por la Graduate School of Geography, Clark University. Este software presenta funciones analíticas ráster. Abarca el rango completo de necesidades de los SIG y la Teledetección, desde la consulta de bases de datos, a la modelación espacial, el realce de imágenes y la clasificación.

4.7.5 MapInfo

Este programa permite integrar datos alfanuméricos de múltiples fuentes con información geográfica, así que uno de sus principales aplicaciones se da en GeoMarketing. Este cruce de información de datos referentes al marketing con datos cartográficos, permite analizar la relación espacial de los datos, identificar patrones de comportamiento, seleccionar puntos de venta, identificar y localizar clientes, medir los resultados de publicidad y promoción y evaluar la trayectoria del ciclo de vida de un producto.

CAPITULO 5: DESARROLLO DEL MODELO

5.1. ESTRUCTURA DEL MODELO

Uno de los aspectos de mayor interés de los modelos digitales es la posibilidad de realizar la simulación de procesos, ésto permite obviar los riesgos inherentes a la experimentación, alcanzar una completa independencia temporal y repetir el experimento un número de veces indeterminado.

El estudio de eventos hidrológicos en cuencas requiere el empleo de modelos que, partiendo de información meteorológica y de propiedades físicas y geomorfológicas de la cuenca, nos permiten estimar el valor de los parámetros que intervienen en dichos eventos y procesos.

Este modelo se centra en calcular la cantidad de agua que se infiltra o pasa al subsuelo durante el ciclo hidrológico y considera la precipitación no uniforme en toda la cuenca ni constante en el tiempo, teniendo en cuenta que la infiltración varía por la heterogeneidad del terreno.

El modelo presentado ha sido desarrollado en Arc View 8.3 porque permite un manejo sencillo de grandes bases de datos, además cuenta con herramientas aplicables a la hidrología, es uno de los softwares más económicos y permite crear extensiones con el lenguaje de programación Visual Basic.

Para correr el modelo se requiere de una PC Pentium III de 1000 Mhz con el software Arc View 8.3 y las extensiones Spatial Analyst y 3D Analyst. Este software está valorizado en \$1500.00 la versión educacional y \$6500.00 la versión comercial.

El modelo tiene tres fases de operación principales o módulos:

- Módulo Cuenca, que consiste en la preparación y delimitación de la cuenca de estudio a partir de la topografía.
- Módulo Precipitación, que obtiene la precipitación total en formato ráster, a partir de interpolar los datos de cada estación meteorológica dentro y cerca de la cuenca.
- Módulo Infiltración, que obtiene las coberturas de precipitación efectiva en la cuenca, a partir de la precipitación total en formato ráster y las características del terreno.

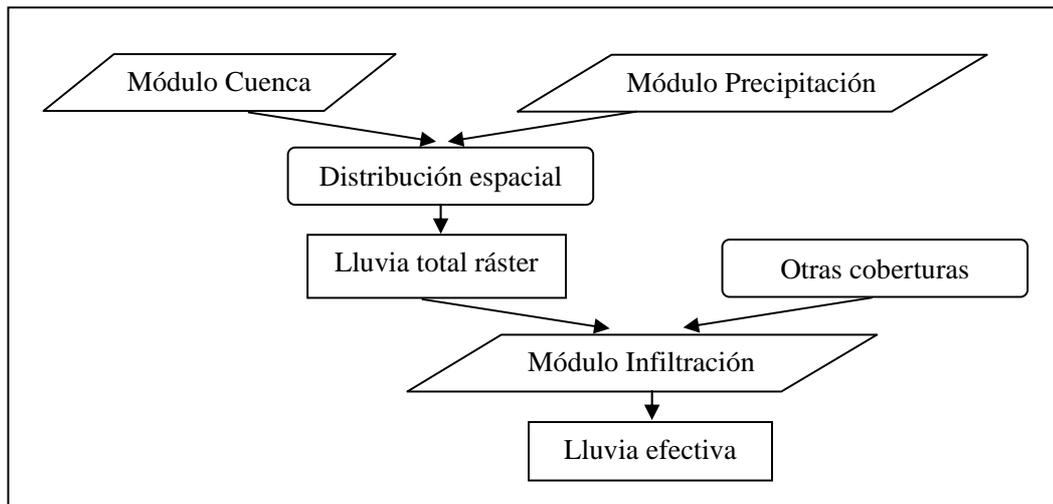


Fig. 5.1. Esquema del modelo de pérdidas propuesto.

5.2. MÓDULO CUENCA

El primer módulo tiene por objetivo la delimitación de la cuenca a estudiar, a partir de la topografía de la zona y del conocimiento de la red de drenaje que tiene la cuenca. Calle (2002) desarrolló un conjunto de herramientas para la determinación de cuencas en ArcView, las cuales resultan muy útiles toda vez que permiten contar con la cuenca a estudiar definida, lista para la modelación y con los centroides de las celdas identificadas.

5.2.1. Planteamiento

Las características topográficas de una región determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El Modelo de Elevación Digital (DEM) contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial y la extensión superficial de la cuenca.

El caudal que puede circular en un momento dado depende, entre otros factores, de la magnitud del área aportante, de las precipitaciones sobre ella, del tipo de suelo y de la pendiente de la zona que permite la circulación con mayor o menor rapidez.

5.2.2. Datos de entrada

El módulo cuenca requiere como primer paso determinar la zona o cuenca a modelar, así como digitalizar la topografía de la misma. El archivo obtenido de la digitalización de las curvas topográficas debe someterse a una serie de operaciones de estructuración y asignación de atributos como:

- Estructuración topológica: curvas de nivel.
- Asignación de altitudes a las curvas y puntos geodésicos.

La calidad del DEM, mejora significativamente si se cuenta con datos auxiliares como:

- Puntos geodésicos, los cuales son puntos con información de altitud relevante.
- Líneas estructurales que son elementos lineales con valores de altitud asociados a cada vértice y utilizados para asegurar el ajuste de la superficie topográfica. La red hídrica está conformada por varias líneas estructurales.
- Líneas de inflexión o rotura utilizadas para definir la posición de elementos lineales sin valores de altitud explícitos que rompen la continuidad de la superficie, como los acantilados.
- Zonas de altitud constantes definidas por polígonos que encierran una superficie plana de altitud única, por ejemplo la zona de un lago.

El conjunto de datos mencionado anteriormente es una estructura vectorial conformada por puntos, líneas y polígonos, la cual sirve para generar un DEM que aproveche adecuada y eficazmente la información topográfica disponible. La escala es un factor importante para la precisión; a menor escala, mayor precisión.

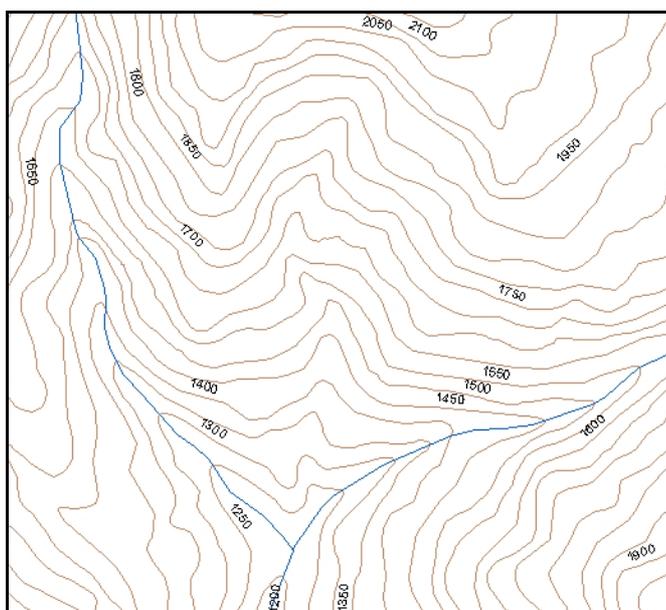


Figura 5.2. Topografía y red hídrica.

5.2.3. Funcionamiento

La construcción del DEM como matriz regular es un problema de interpolación. En el caso de la topografía, cuando se trabaja con una zona de relieve fuerte, la solución más adecuada para el tratamiento del relieve es una estructura vectorial especial: TIN (Triangulated Irregular Network) para luego generar un gris regular.

5.2.3.1 TIN: Red Irregular de Triángulos

Con el software Arc View 8.3 y la extensión 3D Analyst, en base a las curvas de nivel y puntos geodésicos, se genera el TIN que es una red irregular de triángulos. El modelo TIN tiene varias cualidades de interés para la generación del DEM:

- No presupone ni exige la continuidad estadística de la superficie a representar.
- Puede generarse incorporando una gran variedad de estructuras auxiliares, especialmente las líneas estructurales y de inflexión que son incorporadas al modelo como lados de triángulos.
- Se adapta a la complejidad del terreno, creando redes localmente más densas en función del terreno.
- Respeta los valores de los datos que son usados como vértices, manteniendo su altitud exacta.

El TIN consiste en la partición de la superficie en triángulos irregulares continuos y no superpuestos. La altitud de cada nodo se estima en función de los datos del entorno existentes en el modelo vectorial, los cuales son interpolados siguiendo el concepto de superficie continua, lo que permite representar superficies complejas e irregulares.

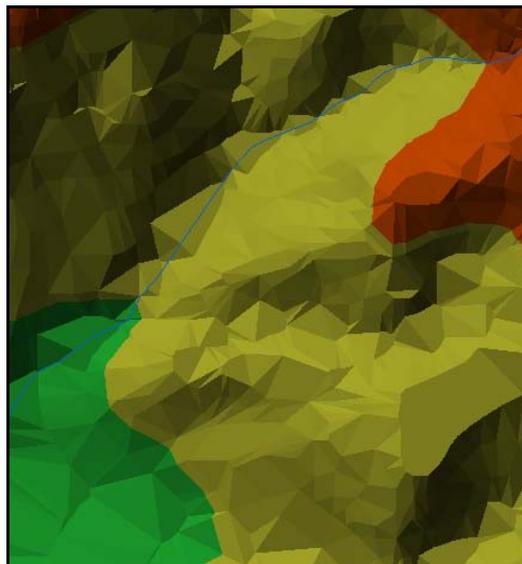


Figura 5.3. TIN.

5.2.3.2 DEM: Modelo de Elevación Digital

El problema más importante de los modelos basados en triángulos es que generan una estructura más difícil de manejar que la matriz regular, especialmente en procesos de análisis, superposición y combinación temática. Es decir, aunque el TIN es la estructura más adecuada para construir el DEM por la capacidad de representar un relieve complejo con precisión, está sometida a los problemas típicos de las estructuras vectoriales.

Por este motivo, lo más usual luego de generar el TIN es generar un grid, que es un DEM matricial convencional, el cual almacena los datos espacialmente en una malla de celdas cuadradas, con un valor numérico de elevación para cada una. Las celdas tienen un tamaño adecuado según el área de la cuenca.

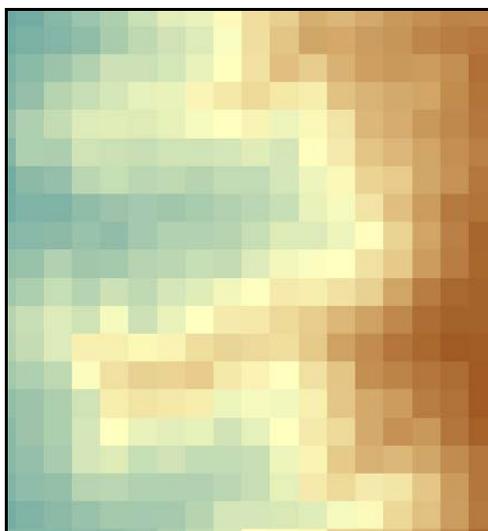


Figura 5.4. DEM conformado por malla de celdas cuadradas.

5.2.3.3 Uso de herramientas para ArcView Herr_MPE.avx

Calle en 2002, desarrolló un conjunto de herramientas para la determinación de cuencas en ArcView, denominado Herr_MPE.avx. Estas herramientas están almacenadas en un archivo del mismo nombre que debe cargarse en el programa. A continuación se explican las principales:

- a) **Remarcar cauces:** Posibilita generar los caminos de flujo de tal forma que el agua fluya siguiendo la red de drenaje previamente digitalizada en formato vectorial. Al utilizar esta herramienta se obtienen tres archivos ráster. El primero contiene el DEM con los cauces remarcados y depresiones ficticias rellenas, el segundo contiene la dirección de flujo de cada celda y el tercero contiene la acumulación de flujo, es decir el número de celdas que drenan en cada una.

Después de la generación del Grid, se genera en ArcView capas de datos raster para delimitar la cuenca y prepararla para la modelación, estas capas son:

- **Dirección de flujo**

Una de las claves de la modelación hidrológica la constituye la determinación de la dirección de flujo de cualquier celda de una cuenca. Existen ocho direcciones de flujo posibles de una celda, considerando ocho celdas adyacentes en un arreglo de 3x3 donde la celda de interés se ubica en el centro. Los valores que se asignan a cada celda varían entre 1 y 128, y utilizan formato byte. La mayoría de los SIG utilizan la convención de valores que se presentan como potencias de dos y se muestran en la figura 5.5.

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 5.5. Esquema de identificación de celdas.

El proceso de cálculo de la dirección de flujo consiste en determinar la dirección de máxima pendiente hacia aguas abajo de cada celda. Las celdas con dirección indefinida del flujo representan salidas del conjunto y tienen sentidos de flujo que son combinaciones simples de valores de dirección de flujo de celdas vecinas.

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

2	2	2	4	4
2	2	2	4	4
1	1	2	4	8
128	128	1	2	4
128	128	1	1	4

Figura 5.6. a) Cotas del DEM empleadas para calcular las pendientes.
b) Esquema de dirección de flujo trazado en un grupo de 25 celdas.

- **Acumulación de flujo**

Constituye número de celdas que fluyen pendiente abajo hacia una celda determinada y se obtiene sobre la base del shapefile de dirección de flujo (Figura 5.7). Permite conocer rápidamente la cantidad de agua que puede recibir una celda.



Figura 5.7. Shapefile de dirección de flujo.

Asimismo, el cálculo de flujos acumulados posibilita también determinar la cantidad de agua de lluvia que puede fluir por una celda dada, asumiendo que toda la lluvia se convierte en escurrimiento superficial y que no existe infiltración, evapotranspiración u otras pérdidas de agua.

Puesto que el tamaño de celda del DEM es conocido, el valor de la acumulación de flujo se traduce directamente a áreas de drenaje en kilómetros cuadrados. Los valores se extienden a partir de cero en las cimas topográficas al orden de millones de celdas en las bocas de los grandes ríos (Figura 5.8.b).

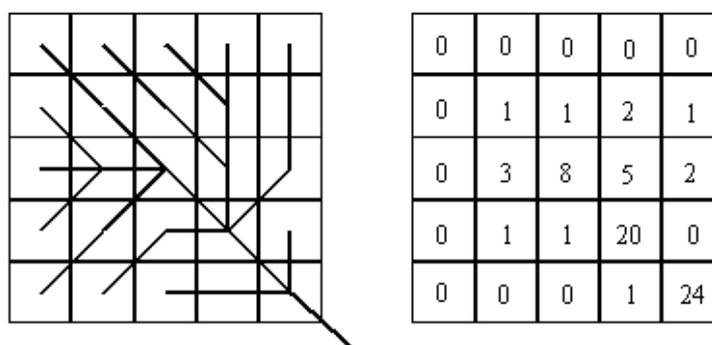


Figura 5.8. a) Red de flujo obtenida a partir de la dirección de flujo.

b) Acumulación de flujo que indica el número de celdas que drenan.

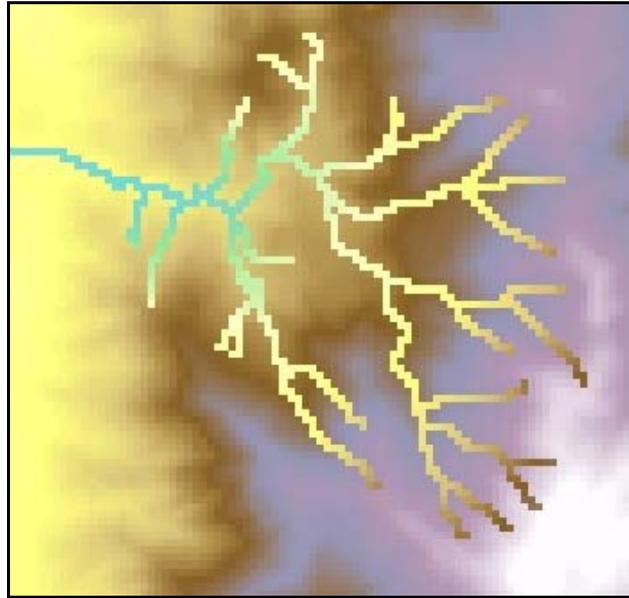


Figura 5.9. Shapefile de acumulación de flujo.

b) Separar cuencas: Esta herramienta permite delimitar las cuencas contenidas en la zona en estudio, empleando la cobertura de dirección de flujo del DEM. Para esto es necesario conocer el punto de salida de la cuenca de interés y, al activar esta herramienta y hacer clic sobre dicho punto, automáticamente se genera la cuenca que desemboca en éste. Esta herramienta entrega como resultado dos archivos: uno en formato ráster, que contiene el valor de 1 en las celdas que pertenecen a la cuenca y NODATA en las restantes, el otro archivo contiene el contorno de la cuenca en formato vectorial.

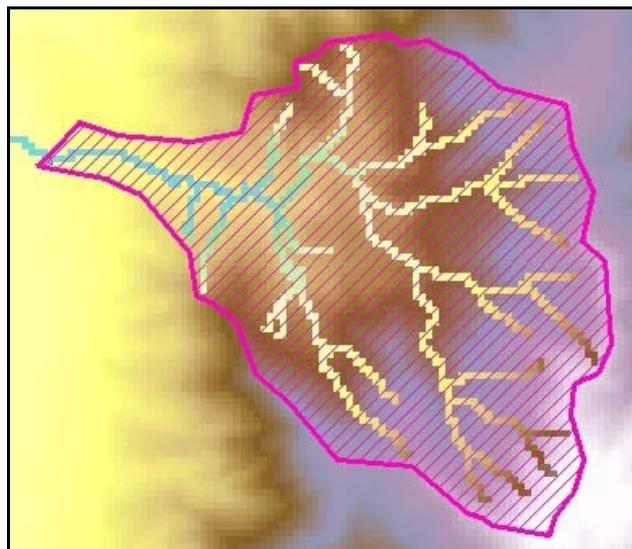


Figura 5.10. Delimitación de la cuenca.

c) **Crear fuentes:** Esta herramienta interseca una malla formada por celdas cuadradas con la cobertura que contiene el contorno de la cuenca en formato vectorial. La cobertura resultante contiene la cuenca dividida en celdas denominadas fuentes de escorrentía, cada una identificada por un ID y las coordenadas de su centroide.

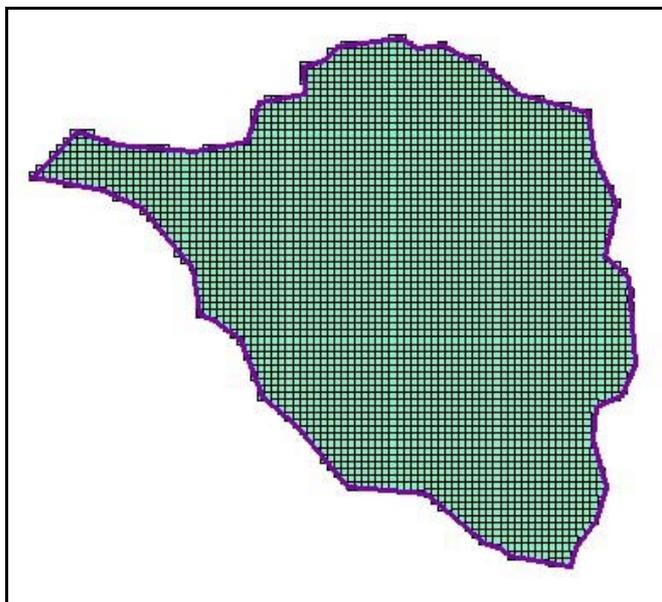


Figura 5.11. Cuenca dividida en fuentes de escorrentía.

5.2.4. Resultados

Se obtiene un shapefile con la cuenca delimitada y separada en fuentes de igual tamaño y área, las cuales están asociadas a una tabla. Esta tabla contiene información de cada celda como identificador ID y ubicación espacial con coordenadas X e Y, así como el área que tiene cada una.

FID	Shape*	ID	AREA	CENTRO_X	CENTRO_Y
0	Polygon	1	250000	653811.347	9436993.3471
1	Polygon	2	250000	654311.347	9436993.3471
2	Polygon	3	250000	653311.347	9436493.3471
3	Polygon	4	250000	653811.347	9436493.3471
4	Polygon	5	250000	654311.347	9436493.3471
5	Polygon	6	250000	654811.347	9436493.3471
6	Polygon	7	250000	656811.347	9436493.3471
7	Polygon	8	250000	657311.347	9436493.3471
8	Polygon	9	250000	657811.347	9436493.3471
9	Polygon	10	250000	645311.347	9435993.3471
10	Polygon	11	250000	645811.347	9435993.3471
11	Polygon	12	250000	649311.347	9435993.3471

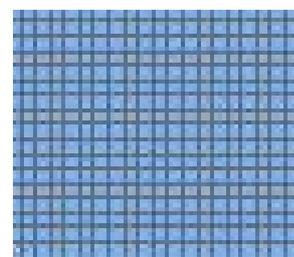


Figura 5.12. Shapefile obtenido del módulo cuenca.

5.3. MÓDULO PRECIPITACIÓN

En Hidrología se dispone información de precipitación sólo en algunos puntos aislados a pesar de que la variable que los representa es continua en el espacio. La información además de ser puntual, está sujeta a errores de medida. El valor de una función en un punto sin registro es necesario entonces estimarlo en base a los valores observados en otros lugares (Fernández, 1985).

Los métodos clásicos de evaluación regional de la precipitación suponen asumir una precipitación uniforme en toda el área; emplear polígonos de Thiessen, discretizando el área total en áreas parciales de precipitación uniforme, método que data del año 1911; o dibujar las curvas isoyetas, las cuales se aproximan más a un concepto de precipitación no uniforme. Sin embargo, para una modelación espacialmente distribuida esta información debe tenerse a nivel de cada celda, para ello es necesario realizar una interpolación de los valores conocidos.

5.3.1. Planteamiento

Al no contar con información meteorológica a nivel de cada celda, deben realizarse interpolaciones de los datos correspondientes a cada intervalo de tiempo de los hietogramas de lluvia total de las estaciones ubicadas dentro y cerca de la cuenca.

En una región donde se dispone de N puntos de coordenadas (x_i, y_i) en los cuales se registra en valor h_i de un cierto fenómeno, Tabios y Salas (1984) proponen que en general el valor h_o de la función en un punto sin información de coordenadas (x_o, y_o) , puede obtenerse como:

$$h_o = \sum_{j=1}^N w_j h_j \quad (5.1)$$

siendo w_j un coeficiente de ponderación que se calcula dependiendo del procedimiento de interpolación elegido.

Los primeros intentos de modelar la precipitación espacialmente han usado algunas técnicas analíticas, como los interpoladores mediante ajuste de polinomios, el método de Legendre y funciones inversas con la distancia, para establecer mapas de isolíneas de fenómenos geofísicos considerados determinísticos.

También existen técnicas estadísticas de interpolación que permiten considerar variables aleatorias, para lo cual definen la región como una zona en la cual se presenta un fenómeno cuyos resultados no pueden ser previstos con exactitud. De esta forma se pueden describir variaciones espaciales del fenómeno en base a la información disponible que corresponde a variaciones de un proceso estocástico. El representante más destacado de este tipo de procedimientos es el Kriging. Muchas de las técnicas de interpolación existente, si bien difieren en los supuestos y metodología, son bastante similares en cuanto al tratamiento de la información disponible (Fernández, 1985).

Para la interpolación en el modelo presentado se utiliza la extensión de Análisis Geostadístico del ArcView 8.3, con la cual se pueden aplicar diversos métodos de interpolación, como Kriging, Distancia inversa ponderada, interpolaciones polinómicas, etc.

5.3.2. Datos de entrada

Este módulo requiere el conocimiento de los hietogramas de precipitación total en las diversas estaciones elegidas para el análisis, dentro y fuera de la cuenca. La información debe estar dispuesta en una tabla, donde cada registro o fila corresponde a una estación y en las columnas aparecen los siguientes datos: Identificación de la estación, coordenadas “X”, coordenadas “Y” y el valor de la precipitación total en cada intervalo de tiempo en sendas columnas, tantas como dure la lluvia.

5.3.3. Hietograma

Los hietogramas a emplear en un modelo hidrológico distribuido pueden ser hietogramas reales o hietogramas hipotéticos. Los hietogramas reales se obtienen a partir de información registrada directamente en campo por las estaciones meteorológicas, mientras que los hietogramas hipotéticos o sintéticos son elaborados en base a tormentas de diseño.

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación para ser usado en el diseño de un sistema hidrológico. Generalmente se emplean como dato de entrada en el análisis de modelos hidrológicos distribuidos.

La selección de la tormenta de diseño, no es un trabajo sencillo, pues la intensidad de la lluvia no es constante, ni el tiempo, ni en el espacio. Es dentro de este contexto, donde el hidrólogo debe seleccionar una tormenta de diseño que se adecúe al perfil de precipitaciones de la zona en estudio. En el Perú es habitual la escasa disponibilidad de registros pluviográficos, por lo que es muy difícil contar con hietogramas reales.

La variación en el tiempo de la lluvia caída durante una tormenta, tiene una gran influencia en la forma de la onda de crecida. Debido a ello, el hietograma de la tormenta debe ser considerado en la definición de una tormenta de diseño.

Las tormentas de diseño son el punto de partida de la modelación hidrológica, al caracterizarla la primera decisión que debe tomar el proyectista es escoger la duración de la tormenta a utilizar, entendiendo por duración al total de intervalos de lluvia. De forma arbitraria, se debe decidir la posibilidad de que se presenten o no intervalos sin lluvia dentro del mismo fenómeno y cuan largo puede ser este período sin precipitación.

Algunos investigadores se han preocupado por este problema y han concluido, que la duración de la tormenta se ve influenciada por factores del clima de la región en cuestión y por aspectos propios de la cuenca, entre ellos tenemos Huff, Varas y el SCS (ver acápite 2.8).

5.3.4. Métodos de interpolación

El funcionamiento del módulo de precipitación requiere del conocimiento de los métodos de interpolación. Las características generales de los principales métodos usados por la extensión Análisis Geoestadístico de Arc View, son:

5.3.4.1 Distancia inversa ponderada

La interpolación por distancia inversa ponderada, IDW, se basa en la ley básica de geografía que dice que las cosas cercanas a otras son más parecidas que aquellas lejanas. Para predecir el valor de cualquier punto sin registro, IDW usa los valores medidos alrededor del punto. Dichos valores si son cercanos al punto de predicción, tienen más influencia sobre el valor predicho que los alejados. Se asume que cada punto con registro tiene alguna influencia local que disminuye con la distancia.

IDW es un interpolador determinístico que es rápido porque tiene pocas decisiones que tomar, además de los parámetros. Además el IDW es un interpolador exacto, lo que significa que las predicciones que hace son idénticas a los datos registrados cuando predice en los puntos con registros.

Es una buena forma de primera aproximación en una superficie a interpolar. Sin embargo, puede producir “ojos de buey” alrededor de los puntos con registros. Este método requiere que se le ingrese para el cálculo:

- El valor de potencia, que se aplica a la inversa de la distancia entre dos puntos y que debe ser igual o mayor que 1, observándose mejores resultados para potencias bajas, ya que para valores altos, la variación de precipitación en zonas entre dos estaciones es muy brusca (ver figura 5.14).
- El número de puntos cercanos o vecinos para considerar en el cálculo, y el número mínimo de vecinos a considerar.

5.3.4.2 Kriging

Presenta una manera diferente de pensar acerca de la predicción respecto de los interpoladores determinísticos, es un interpolador moderadamente rápido que puede ser exacto o aproximado dependiendo del modelo de error de medida. En Kriging, un valor predicho depende de dos factores: una tendencia y un elemento adicional de variabilidad. Por ejemplo, si se va desde el océano a la cima de una montaña, se tiene una tendencia ascendente en la elevación. Sin embargo, probablemente habrá variaciones en el camino, se sube y se baja al cruzar los valles, las corrientes, etc.

La parte de la fluctuación se llama error aleatorio espacialmente autocorrelacionado; donde el "error" no significa una equivocación sino una fluctuación de la tendencia; "aleatorio" significa que la fluctuación no se conoce a priori, y podría ser hacia arriba o hacia debajo de la media.

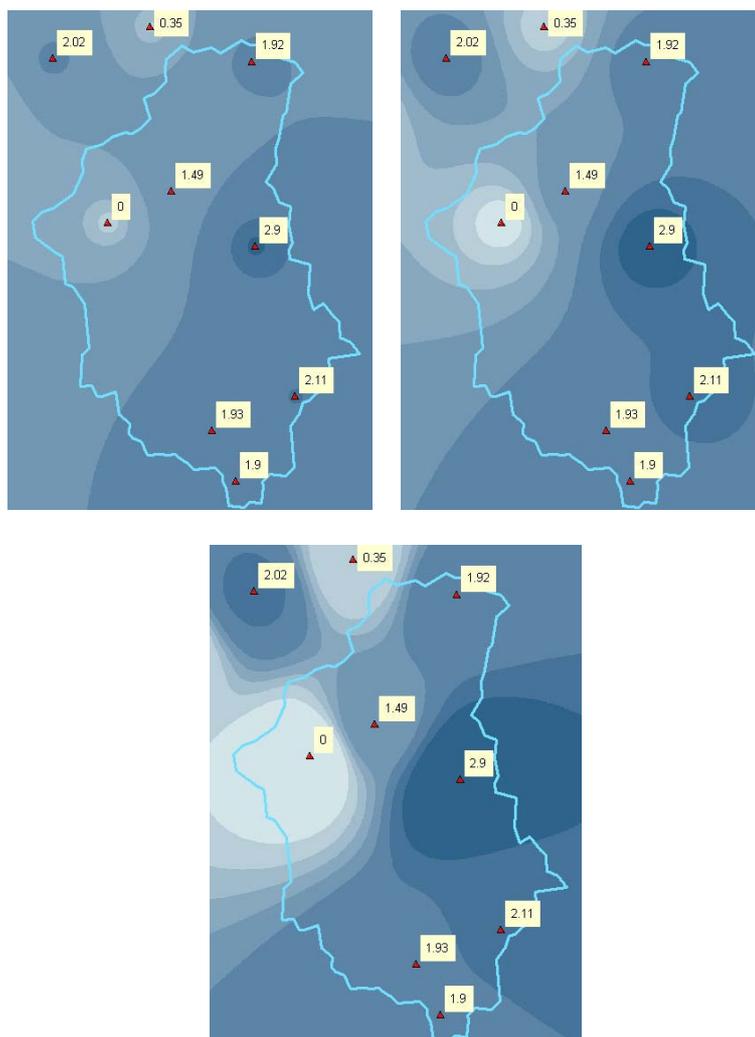


Figura 5.14. Valores interpolados con distancia inversa ponderada (IDW) empleando diversos valores de potencias: a) 1, b) 2 y c) 5. Se observa la variación brusca de precipitación entre dos estaciones para un valor de potencia alto.

"Espacialmente autocorrelacionado" significa que, mientras que las fluctuaciones no se conocen exactamente por adelantado, tienen tendencias a estar sobre el promedio o debajo del promedio juntas, siempre y cuando estén en la proximidad cercana. Esta es autocorrelación espacial positiva. También es posible tener correlación espacial negativa, donde si un sitio está sobre el promedio, un sitio próximo tiende a estar debajo del promedio. Se pueden poner los conceptos de tendencia y error aleatorio en una ecuación de la forma:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (5.2)$$

Donde:

s indica la ubicación de la predicción (un par de coordenadas x, y)

$Z(s)$ es la variable que se está prediciendo.

$\mu(s)$ es la tendencia determinística, es un patrón constante en los datos que es explicado por una cierta característica física de la superficie.

$\varepsilon(s)$ es el error aleatorio autocorrelacionado espacialmente, con dos supuestos: el primero es que es 0 en promedio, es decir que algunas fluctuaciones están en un lado de la tendencia y algunas estarán en el otro lado, pero las diferencias, en promedio, se compensan. El segundo supuesto es que el error de autocorrelación es netamente espacial; depende solamente de la distancia y no de cualquier otra característica, tal como posición.

Kriging usa modelos estadísticos que permiten una variedad de salidas de mapas que incluyen:

- Mapa de predicciones, producido a partir de los valores interpolados, que es el que muestra la superficie interpolada.
- Mapa de cuantiles, presenta los valores que exceden o no exceden una probabilidad especificada.
- Mapa de probabilidades, de exceder o no exceder un umbral especificado.
- Mapa de error estándar de predicción, producido a partir de los valores interpolados.

Este conjunto de técnicas está formado por los siguientes métodos:

a. Kriging ordinario

En muchos casos no hay una tendencia en los datos, o si la hay, es tan débil que las predicciones son tan buenas como cuando se la ignora. Asumir que no existe tendencia en los datos, es matemáticamente equivalente a asumir que la media es una constante simple y desconocida, $\mu(s) = \mu$. Este método produce valores de interpolación asumiendo un valor medio constante pero desconocido, permitiendo influencias locales de los valores cercanos. Debido a que la media es desconocida, se asumen pocas cosas. Esto hace de Kriging ordinario particularmente flexible, pero quizás menos poderoso que los otros modelos.

b. Kriging simple

Produce valores de interpolación suponiendo un valor medio constante conocido, permitiendo influencias locales de los valores cercanos. Debido a que la media es conocida, es ligeramente más poderoso que el Kriging ordinario, pero en muchas situaciones la elección del valor medio no es muy obvia (ver fig. 5.15).

c. Kriging universal

Produce valores de interpolación asumiendo heterogeneidad espacial. Algunas veces, aún cuando los valores de los datos cambian con las coordenadas espaciales, existe una tendencia variable, es decir no se tiene una media constante. Matemáticamente, esto se representa como una ecuación de regresión lineal con las coordenadas espaciales x-y, para la cual los coeficientes de regresión son desconocidos. Cuando se usa apropiadamente este método es más poderoso que Kriging ordinario porque explica gran parte de la variación en los datos a través de la superficie de tendencia no aleatoria.

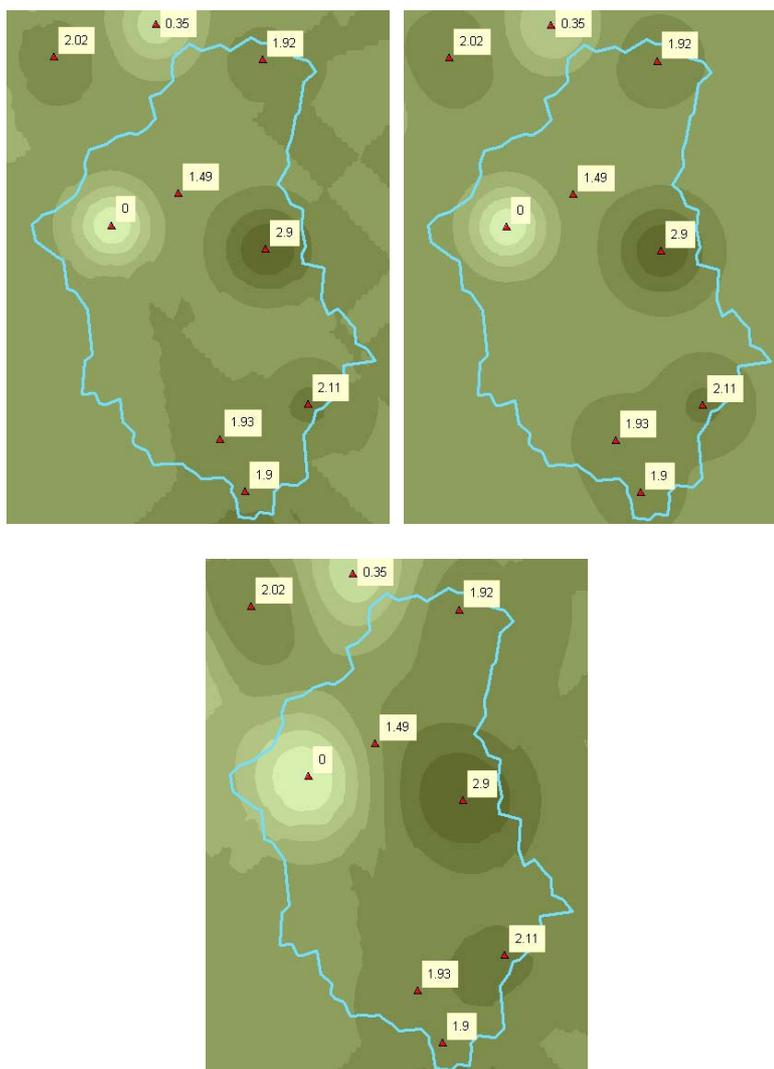


Figura 5.15. Interpolación con diferentes tipos de Kriging: a) ordinario, b) simple y c) universal.

d. Kriging indicador

Usa umbrales para crear datos binarios (valores 0 ó 1, también llamados valores indicadores, según se esté debajo o sobre el umbral), y luego usa Kriging ordinario para trabajar estos datos indicadores. Las predicciones que hace este método son interpretadas como la probabilidad de excedencia de un umbral (o, dependiendo de cómo las variables binarias se definen, de no excedencia). Este método no se recomienda para datos que tienen una tendencia.

e. Kriging probabilístico

Es un Kriging indicador mejorado, que usa más información, por lo que es más poderoso, pero requiere ajuste de covarianza cruzada, que involucra más decisiones de modelación y estimación de parámetros. No se recomienda para datos que tienen una tendencia.

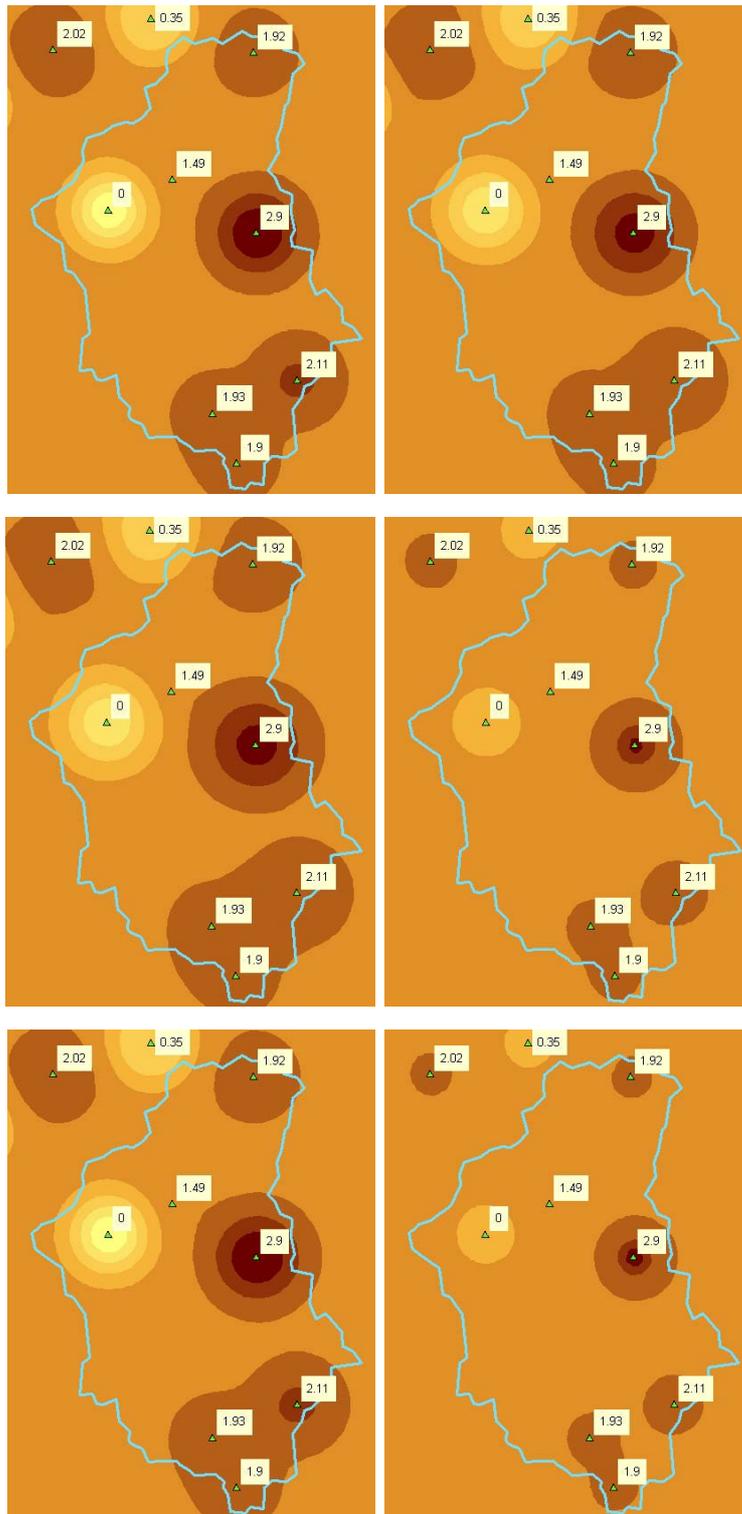


Figura 5.16. Resultados de interpolación con Kriging simple, con media 1.48 mm/h (propuesto por Arc View) para diversos modelos de variograma: a) Gaussiano, b) Circular, c) Esférico, d) Exponencial, e) Estable y f) Racional cuadrático.

f. Kriging disyuntivo

Es un método no lineal que es más general que Kriging ordinario y Kriging indicador, y trata de hacer más al considerar funciones de los datos en vez de usar sólo los datos. Como es usual para lograrlo requiere hacer fuertes premisas. Este método asume que todos los pares de datos vienen de una distribución normal bivariada.

La flexibilidad de Kriging necesita una gran cantidad de parámetros. Kriging supone que los datos vienen de un proceso estocástico estacionario y algunos métodos asumen datos normalmente distribuidos. Estos métodos, como otros estadísticos, permiten la interpolación de variables aleatorias e incorporan al proceso una estimación del error cometido al efectuar la interpolación. Fernández (1985) recomienda utilizar el método de Kriging simple para la precipitación ya que se ajusta mejor que los otros métodos.

5.3.5. Funcionamiento

Para realizar la interpolación en el modelo presentado se utiliza la extensión de Análisis Geostadístico del ArcView 8.x, con la cual se pueden aplicar diversos métodos de interpolación, como Kriging, Distancia inversa ponderada, interpolaciones polinómicas, etc. que ya se explicaron en el acápite anterior.

Las diversas interpolaciones para cada intervalo de tiempo dan lugar a un conjunto de mapas con la intensidad de lluvia interpolada en todas las celdas del área de trabajo. Los valores correspondientes a estos mapas en formato ráster se extraen a un shapefile de puntos ubicados en el centroide de cada celda, al que se le ha denominado P_celda, creado a partir del shapefile Centros del módulo Cuenca.

Este proceso se realiza mediante la herramienta “Valorderaster” (Figura 5.17), que será usada en los diferentes módulos del modelo y permite extraer la información de archivos ráster (las coberturas de precipitación: P1, P2, P3, etc.) hacia un shapefile de puntos o polígonos (P_celda), almacenando dicha información en columnas (Figura 5.18).



Figura 5.17. Herramienta “valordeRaster” extrayendo los valores de intensidad del ráster P1 al campo P1 del shapefile P_celda.

5.3.6. Comparación de métodos y modelos

La extensión Geoestadística permite hacer una comparación entre dichas predicciones para elegir aquella que mejor se ajuste a los registros disponibles. Para ello un parámetro que se utiliza como referencia es la raíz media cuadrática (RMS), tomando como mejor modelo aquél que arroja la menor RMS. Analizando la serie de intensidades P1, de los diferentes métodos empleados para la técnica Kriging, el que tiene menor valor de RMS fue el Kriging simple (ver figura 5.15); y el modelo esférico para los modelos probabilísticos de semivariograma (ver figura 5.16).

5.3.7. Resultados

Las diversas interpolaciones para cada intervalo de tiempo dan lugar a un conjunto de mapas con la intensidad de lluvia interpolada en cada una de las celdas del área de trabajo. Los valores correspondientes a estos mapas en formato ráster se extraen al shapefile de puntos ubicados en el centroide de cada celda denominado P_celda (ver figura 5.18). Esta tabla es además uno de los datos de entrada al tercer módulo, el de infiltración o pérdidas, pues contiene los hietogramas asignados a cada celda de la cuenca.

OID	Shape*	ESTACION	X	Y	P1	P2
0	Point	Pasapampa	655811	9433993	9.4	5.5
1	Point	Barrios	643811	9414993	33	6
2	Point	Huarmaca	662311	9384993	6	58.7
3	Point	Chignia	649811	9379993	55.6	4.4
4	Point	Canchaque	656311	9406993	32	0
5	Point	Pirga				
6	Point	Bigote				
7	Point	Altamiza				
8	Point	Paltashaco				
9	Point	Morropon				

FID	Shape	ID	X	Y	P1	P2
0	Point	1	653811.347	9436993.3471	10.11	5.75
1	Point	2	654311.347	9436993.3471	10.04	5.71
2	Point	3	653311.347	9436493.3471	10.12	5.75
3	Point	4	653811.347	9436493.3471	10.02	5.71
4	Point	5	654311.347	9436493.3471	9.93	5.67
5	Point	6	654811.347	9436493.3471	9.86	5.64
6	Point	7	656811.347	9436493.3471	9.83	5.61
7	Point	8	657311.347	9436493.3471	9.89	5.63
8	Point	9	657811.347	9436493.3471	9.98	5.65
9	Point	10	645311.347	9435993.3471	8.42	7.05
10	Point	11	645811.347	9435993.3471	8.76	6.97
11	Point	12	649311.347	9435993.3471	10.43	6.33
12	Point	13	649811.347	9435993.3471	10.51	6.24
13	Point	14	652311.347	9435993.3471	10.29	5.83
14	Point	15	652811.347	9435993.3471	10.17	5.77
15	Point	16	653311.347	9435993.3471	10.05	5.71
16	Point	17	653811.347	9435993.3471	9.94	5.67
17	Point	18	654311.347	9435993.3471	9.84	5.63
18	Point	19	654811.347	9435993.3471	9.75	5.60
19	Point	20	655311.347	9435993.3471	9.70	5.58
20	Point	21	655811.347	9435993.3471	9.67	5.57

Figura 5.18. Tablas de entrada y resultados del módulo Precipitación conteniendo los hietogramas de precipitación total correspondientes a las estaciones dentro y en los alrededores de la cuenca (datos) y a cada celda de la cuenca (resultados).

5.4. MÓDULO INFILTRACIÓN

La fase de infiltración tiene como entrada el conjunto de coberturas de la precipitación total espacialmente distribuida, resumidas en la tabla de precipitación total del módulo anterior, así como otras tablas y coberturas que caracterizan el terreno de la cuenca, y entrega como resultado la tabla de precipitación efectiva espacialmente distribuida que puede generar en pantalla las coberturas de precipitación efectiva para cada intervalo.

5.4.1. Planteamiento

La infiltración se trabajó con el Modelo de Green y Ampt, por estar basado en aproximaciones teóricas. Este modelo se deriva de la ecuación de Darcy a través de simplificaciones en el fenómeno de propagación del frente húmedo en el interior del suelo. Básicamente estas simplificaciones son las siguientes:

- El suelo se considera totalmente saturado desde la superficie hasta la profundidad del frente húmedo. En las capas más profundas tiene la humedad previa a la precipitación.
- En la superficie del frente húmedo, la tensión capilar es siempre la misma, en cualquier tiempo y posición que tenga el frente.

En resumen, es un pistón de agua que llena los poros del suelo, siendo succionado para abajo con una tensión constante.

Desde la superficie hasta la profundidad L que alcanza el frente húmedo, el potencial capilar ϕ pasa de cero a un valor ϕ_f y el potencial gravitacional z varía de cero a L . Consecuentemente la carga piezométrica h varía de cero a $\phi_f + L$, entre la superficie del terreno y la profundidad del frente húmedo. Sustituyendo esa relación en la ecuación de Darcy

$q = -K \frac{\partial h}{\partial z}$, se obtiene entonces la ecuación de Green y Ampt:

$$f = K' \frac{\phi_f + L}{L} \quad (5.3)$$

Y su forma integrada, el volumen infiltrado acumulado, F , está dado por:

$$F = L(\theta' - \theta_i) \quad (5.4)$$

donde:

- f = tasa o velocidad de infiltración [LT^{-1}],
- K' = conductividad hidráulica efectiva del suelo [LT^{-1}].
- θ' = $\theta_{sat} - \theta_{air}$ = contenido de humedad máximo;
- θ_{sat} = contenido de humedad detrás del frente húmedo, equivale al volumen de vacíos por unidad de volumen de suelo;
- θ_{air} = aire atrapado por unidad de volumen de suelo;
- θ_i = contenido de humedad inicial del suelo.

La ecuación 5.3 puede ser escrita como:

$$f = K' \frac{S_f + F}{F} \quad (5.5)$$

donde S_f es un factor de succión-almacenamiento:

$$S_f = \varphi_f (\theta^i - \theta_i) \quad (5.6)$$

Despejando F en la ecuación 5.5 y analizando el momento de la saturación superficial se obtiene el volumen infiltrado desde el inicio de la precipitación hasta el encharcamiento:

$$F_p = \frac{S_f}{r/K' - 1} \quad (5.7)$$

siendo r la intensidad constante de precipitación que infiltra completamente en este período. Esto lleva a la deducción de la siguiente expresión del tiempo de encharcamiento:

$$t_p = \frac{1}{r} \frac{S_f}{(r/K' - 1)} \quad (5.8)$$

Como, $f = dF/dt$ se puede obtener una ecuación implícita de $F(t)$ integrando la ecuación 5.5, siendo los límites inferiores de integración $t = t_p$ y $F = F_p$. De este cálculo se obtiene:

$$F(t) = K'(t - t_p) + F_p + S_f \ln \left[\frac{F(t) + S_f}{F_p + S_f} \right] \quad (5.9)$$

La ecuación 5.9 permite evaluar el volumen infiltrado F para diferentes tiempos t , y por consiguiente las tasas f , con lo que se puede determinar el hietograma de precipitación efectiva a partir de un hietograma de precipitación total.

5.4.2. Parámetros de Green y Ampt

El ajuste de la ecuación 5.9 a datos medidos en campo por infiltrómetros permite determinar los valores de S_f y K' . Iterando se pueden determinar los parámetros S_f y K' para obtener la curva teórica de F en función del tiempo que mejor se ajusta a los datos registrados. K' se estima fácilmente porque representa la conductividad hidráulica saturada aparente del suelo.

Rawls y Brakensiek (Hutten, 2001) presentaron en la década de los ochenta ábacos y ecuaciones de estimación para la succión φ_f y la conductividad hidráulica K' , en función de la composición del suelo y la porosidad ϕ , que corresponde a la θ_{sat} . Estas ecuaciones son:

$$\varphi_f = \exp \left[\begin{array}{l} 6.53 - 7.326(\varphi) + 0.00158(C^2) + 3.809(\varphi^2) + 0.000344(S)(C) - \\ - 0.04989(S)(C) + 0.016(S^2)(\varphi^2) + 0.0016(C^2)(\varphi^2) - \\ - 0.0000136(S^2)(C) - 0.00348(C^2)(\varphi) - 0.000799(S^2)(\varphi) \end{array} \right] [cm] \quad (5.10)$$

$$K' = \frac{\exp \left[\begin{array}{l} 19.52348(\varphi) - 8.96847 - 0.028212(C) + 0.00018107(S) - \\ - 0.0094125(C^2) - 8.395215(\varphi^2) + 0.077718(S)(\varphi) - 0.00298(S^2)(\varphi^2) - \\ - 0.019492(C^2)(\varphi^2) + 0.0000173(S^2)(C) + 0.02733(C^2)(\varphi) + \\ 0.001434(S^2)(\varphi) - 0.0000035(C^2)(S) \end{array} \right]}{\beta} [cm/h] \quad (5.11)$$

donde:

C = porcentaje de arcilla en el suelo

S = porcentaje de arena en el suelo

ϕ = porosidad del suelo

β = factor de reducción del valor de la conductividad saturada para determinar K'.

Estos valores se calculan para cada celda.

5.4.3. Datos de entrada

Además de la tabla de los hietogramas totales en cada celda, obtenidos en el módulo de precipitación en el shapefile *P_celda* (ver Figura 5.18), es necesario conocer los diversos tipos de suelo que hay en la cuenca, pues las abstracciones no serán las mismas y variarán espacialmente en toda ella.

Cada fuente debe contener estos valores, dependiendo de su ubicación en la cuenca. Estos valores se asignan sobre la base de una cobertura vectorial (shapefile *Suelo*) que contiene polígonos numerados sectorizando el tipo de suelo presente en la cuenca, con sus correspondientes datos como los porcentajes de arcilla y de arena, los contenidos de humedad inicial y de aire atrapado en él y la porosidad; y se ingresan en sendas columnas de una tabla donde las filas son las diferentes zonas de suelo encontradas en la cuenca (ver Figura 5.19).

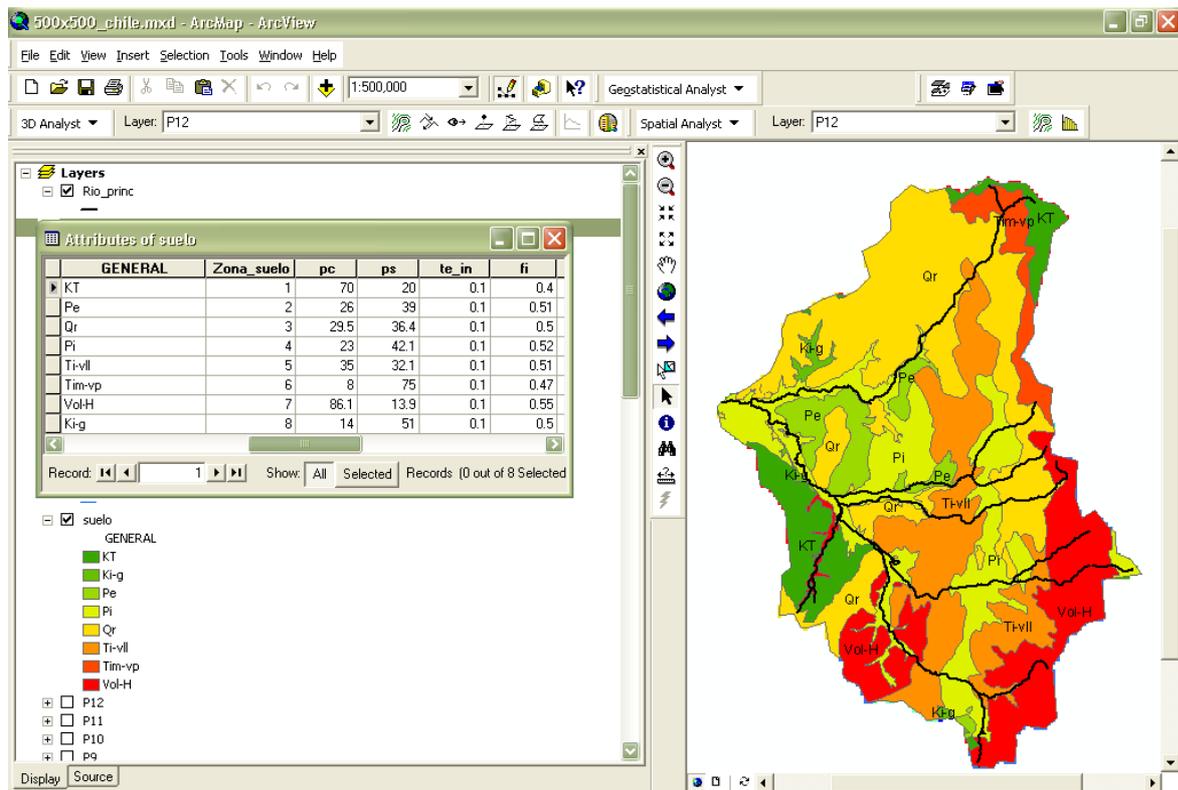


Figura 5.19. Entre los datos de entrada al módulo infiltración están las características del suelo, las mismas que se ingresan zonificando la cuenca mediante el shapefile “suelo”.

5.4.4. Funcionamiento

Teniendo información del hietograma total de cada celda, en P_{celda} , y datos del tipo de suelo en Suelo, se aplica el módulo de infiltración. El módulo consiste en la aplicación de cuatro herramientas o extensiones:

5.4.4.1. Analista Espacial

Creada por ESRI, que mediante la opción “convertir elementos a raster” permite la conversión del shapefile Suelo al raster Suelogrd en base al dato “zona_suelo” y al tamaño de la celda, 500 m (ver Figura 5.20).

5.4.4.2. Valorderaster

Extrae los valores de *Suelogrd* que identifican las zonas de suelo al shapefile P_{celda} , asignando así a cada celda la identificación de la zona a que corresponde.

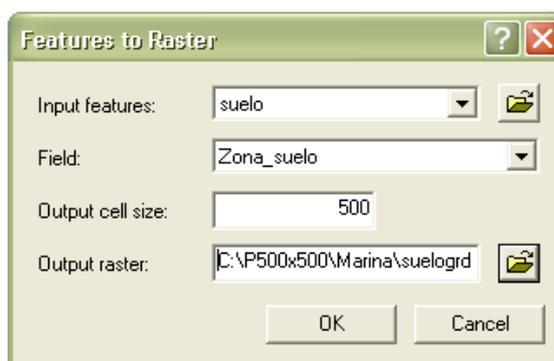


Figura 5.20. Conversión de shapefile a cobertura ráster.

5.4.4.3. Parámetros de suelo

Calcula en el shapefile *Suelo* la succión, ϕ_f , la conductividad hidráulica, K' , y el contenido de humedad detrás del frente húmedo, θ_{sat} , para cada zona de suelo considerada en la cuenca, tal como se indica en el acápite 5.4.1.

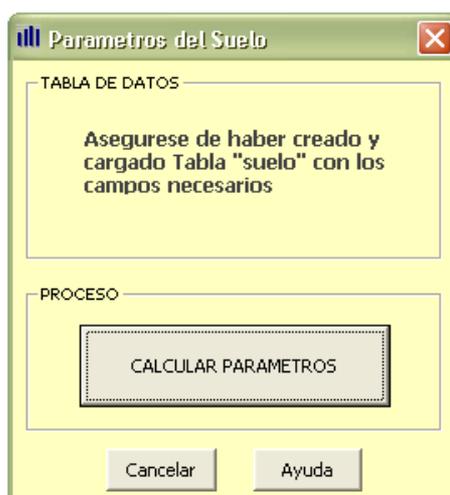


Figura 5.21. Herramienta “Parámetros de suelo”.

5.4.4.4. Hietograma efectivo

Consiste de tres subrutinas que se ejecutan celda a celda:

- Asignar los parámetros de las zonas de suelo a las celdas de la cuenca.
- Determinar el momento en que se produce la condición de encharcamiento, t_p , y el volumen de agua, F_p , infiltrado hasta ese momento.
- Calcular el hietograma efectivo que afecta la celda.

Figura 5.22. Herramienta “Hietograma efectivo”.

5.4.5. Resultados

La salida está constituida, por un lado, por nuevos campos agregados a la tabla P_celda y cuyo contenido son los diversos parámetros calculados para cada celda como: K' , ψ_f , S_f , etc. Además, se genera un nuevo shapefile cuya tabla contiene:

- Los valores de t_p y F_p , referidos al momento del encharcamiento.
- El hietograma efectivo intervalo a intervalo y celda a celda.

Cada uno de estos resultados es asequible tanto en formato tabular como en mapas correspondientes a t_p , F_p o a la intensidad de cada intervalo de tiempo: Pe_1 , Pe_2 , etc.

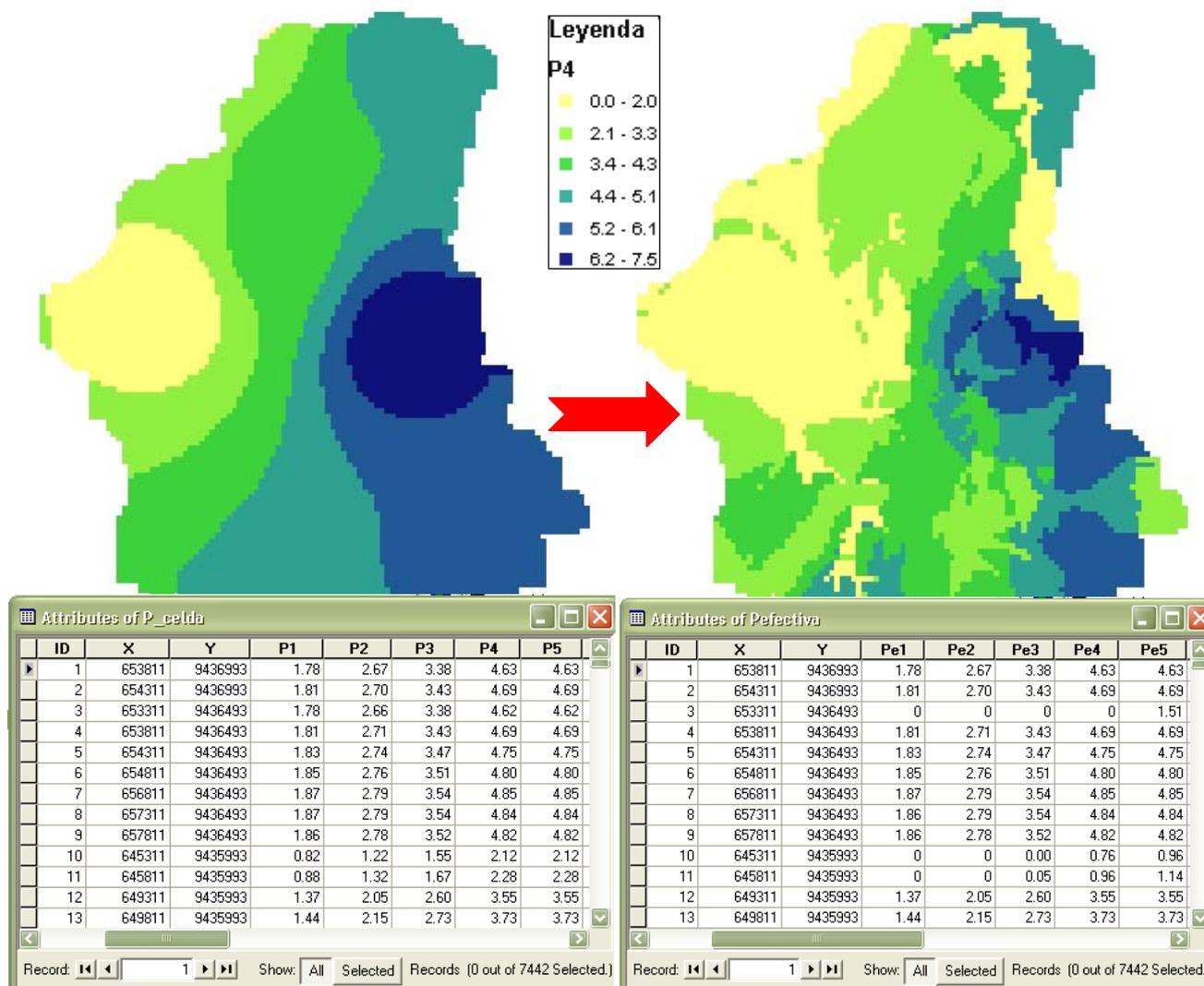


Figura 5.23. Shapefiles de entrada y salida del módulo infiltración. Se muestran las tablas con valores para cada intervalo de tiempo y los mapas grafican las intensidades de lluvia totales y efectivas para el cuarto intervalo de tiempo.

5.4.6. Sensibilidad

El cálculo de la precipitación efectiva tiene como datos de entrada las características del suelo, que influyen en la mayor o menor capacidad de infiltración del mismo. En tal sentido, se probó variar algunas de estas características encontrándose que al aumentar en 10% la porosidad del suelo de la cuenca, la infiltración aumentó, afectando directamente el tiempo de encharcamiento, que creció en un 50%, para las celdas donde esta condición se llegó a alcanzar e hizo aumentar en 65% el número de celdas que no alcanzaron tal condición.

Por otro lado, al variar el contenido de aire atrapado en el suelo de 0 a 0.1, los tiempos de encharcamiento disminuyeron en 12%, así como el número de celdas que no alcanzaron tal condición disminuyeron en un 6%.

Como se puede observar el contenido de aire atrapado no afecta grandemente el proceso de infiltración, sin embargo la porosidad considerada en los diferentes tipos de suelo sí influye en el proceso. Esto se debe tener muy en cuenta considerando además que la porosidad muchas veces es deducida a partir del tipo de terreno.

CAPITULO 6: CUENCA BIGOTE - HUARMACA

6.1 UBICACIÓN

La cuenca Bigote-Huarmaca está ubicada en la cabecera de la cuenca del Río Piura y se extiende desde un nivel aproximado de 150 m.s.n.m en la parte baja, hasta altitudes de 3,600 m.s.n.m. Políticamente se encuentra ubicada en el Departamento de Piura, en la parte nor occidental del Perú.

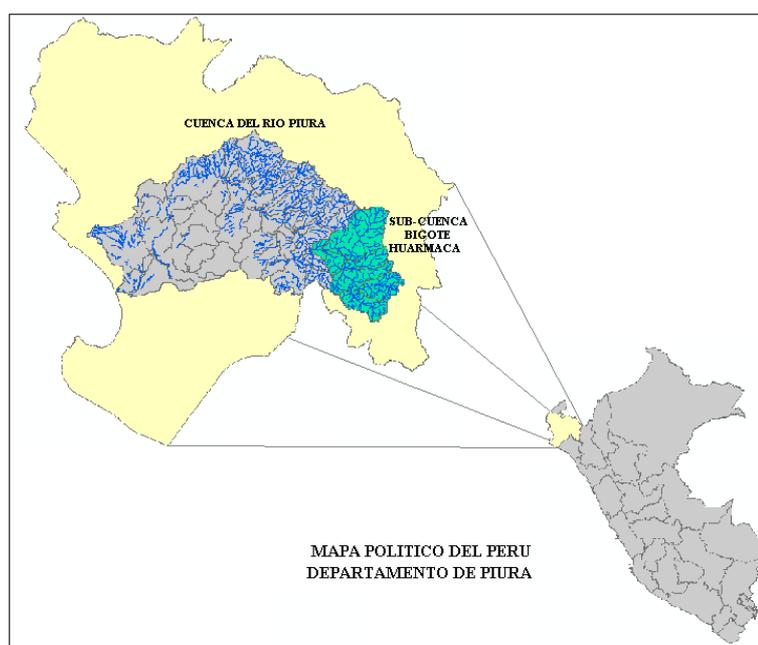


Figura 6.1. Ubicación de la cuenca Bigote-Huarmaca.

La cuenca del río Piura es uno de los principales de la región, tiene un área total de 7900 km², su longitud total es de 350 Km y nace a 3,600 msnm en la divisoria de la cuenca del río Huancabamba, desde allí inicia su recorrido con dirección Noroeste hasta el paraje denominado Pedregal donde su dirección cambia a Suroeste hasta su desembocadura en el mar.

La cuenca Bigote-Huarmaca desemboca en el río Piura y tiene una extensión de 1,935 Km². Esta característica expresa su importancia en cuanto a extensión, lo cual es un potencial importante para su desarrollo. Está conformada por dos subcuencas: la sub-cuenca del río Bigote y la sub-cuenca del río Huarmaca. Geográficamente la subcuenca del Río Bigote, se ubica entre los paralelos 05° 22' 45" y 05° 04' 45" de latitud sur y los meridianos 79° 52' 55" y 79° 30' 00" de longitud oeste, en tanto que la subcuenca del río Huarmaca se encuentra entre los paralelos 05° 22' 45" y 05° 42' 35" de latitud Sur y los meridianos 79° 55' 28" y 79° 28' 15" de longitud Oeste.

En su parte baja la cuenca comprende una porción del territorio de la provincia de Morropón: los distritos de Salitral y Yamango e íntegramente el distrito San Juan de Bigote, y en su parte alta abarca parte del territorio de la provincia de Huancabamba: el distrito de Lalaquiz y Canchaque en su totalidad y los distritos de San Miguel del Faique, Huarmaca y Huancabamba (Figura 6.2 y Tabla 6.1).

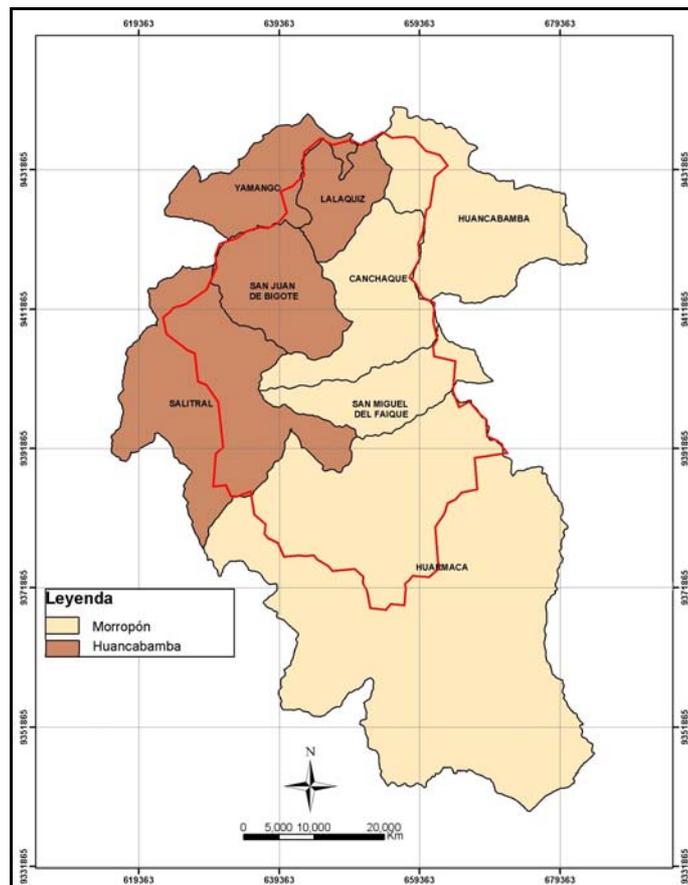


Figura 6.2. Distritos pertenecientes a la cuenca Bigote-Huarmaca

Tabla 6.1. Distritos en las subcuencas.

Subcuenca	Distritos	Provincia
Bigote	1. San Juan de Bigote	Morropón
	2. Canchaque	Huancabamba
	3. Lalaquiz	Huancabamba
	4. Yamango	Morropón
	5. Huancabamba	Huancabamba
Huarmaca	1. Huarmaca	Huancabamba
	2. San Miguel del Faique	Huancabamba
	3. Salitral	Morropón

6.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

6.2.1 Clima

La interacción de diferentes variables: altitud, latitud, circulaciones atmosféricas y corrientes marinas determinan el clima de una zona. Cualquier transformación de esas variables, implicará cambios significativos a nivel de los diversos componentes climáticos.

El clima de la zona de la cuenca Bigote-Huarmaca podemos caracterizarlo como semiárido en el valle, ligeramente húmedo y templado frío en las partes medias y húmedo y semifrío en la parte alta, existiendo pequeñas zonas en la parte más alta que presentan un clima muy húmedo y frío moderado. La variedad de climas determina la posibilidad de sembrar y criar una diversidad de cultivos y ganado.

Para registrar los factores climáticos, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) viene operando una red de estaciones meteorológicas desde el año 1963, así mismo el Proyecto Especial Chira Piura, operó también desde el año 1971 estaciones meteorológicas hasta el año 1992 con registro de 22 años, actualmente el encargado de las estaciones meteorológicas es el Sistema de Alerta Temprana (SIAT).

Las estaciones meteorológicas ubicadas en las subcuencas son en su mayoría pluviométricas y han contribuido con información de precipitaciones, cuya evaluación ha sido importante para determinar la disponibilidad de agua.

6.2.2 Suelos

Los suelos son un recurso importante en la cuenca, pues de ellos depende la capacidad de infiltración del terreno. Actualmente el Alto Piura es una zona con suelos aptos para cultivos pero con restricciones por clima y por la presencia de pastos temporales, siendo esta última la principal causa de la deforestación. Por esta razón, la zonificación con la que se trabajó se basa en las características geológicas de la zona.

6.2.3 Geología

La tectónica es uno de los grandes agentes responsables de las morfologías actuales. A lo largo de los millones de años de la historia geológica ha levantado, doblado, plegado, fracturado y fallado el zócalo, facilitando la acción de los demás agentes naturales.

Geológicamente hablando la cuenca del río Piura está conformada por una amplia gama de rocas y suelos, con un rango comprendido entre el Pre-Cámbrico y el Cuaternario. La información geológica ha sido obtenida del mapa geológico de la cuenca, a escala 1:100 000.

En el área de la cuenca Bigote-Huarmaca, se presentan los siguientes estratos:

- **Pre – Cámbrico: Complejo Olmos (P_E)**

Aflora al sur del paralelo 05°, está constituido por una serie de rocas metamórficas depositadas entre el Pre-Cámbrico y el Paleozoico Temprano. Se le encuentra en las partes altas del sector de Morropón, Valle del Alto Piura, Huancabamba y Olmos. Consiste en una secuencia de esquistos, de naturaleza dominante pelítica, con un grado de metamorfismo menor que el complejo Marañón. El grado de alteración de las rocas varía con el clima. En el clima relativamente seco de la vertiente del Pacífico, el intemperismo se limita a una leve coloración gris-marrón.

- **Paleozoico: Grupo Salas (Pi-s)**

Aflora en los valles del curso superior del río Piura en el área sur de la cuenca. Litológicamente se encuentra constituida por filitas argiláceas gris marrones a gris-violáceas intercaladas con cineritas verde pálidas o gris-brunáceas. Este tipo de paquetes se intercalan con capas delgadas de cuarcitas de grano fino, blanco-grisáceas afectadas por una marcada esquistosidad de fractura. A lo largo de la franja Huarmaca-Canchaque-Los Ranchos se presentan grandes paquetes de rocas lávicas y meta-andesitas que en cierto grado se hallan transformadas en anfibolitas. El grado de metamorfismo que afecta a estas rocas es menor que el de los esquistos del complejo Olmos.

- **Paleozoico: Formación Río Seco (Pi-rs)**

Se encuentra bien expuesta en el caserío de Río Seco, carretera Morropón-Huancabamba, desde donde los afloramientos se extienden a los valles del curso superior del río Piura y a sus tributarios, cubriendo gran parte de las áreas de Morropón, Chulucanas y Olmos. Litológicamente, consiste en bancos de 3 a 4 m de cuarcitas gris oscuro a negras, bastante recristalizadas, con abundantes segregaciones de cuarzo lechoso relleno de fracturas.

- **Mesozoico: Grupo Goyllarisquzga (Ki-g)**

Se expone en el área suroriental de la cuenca. Litológicamente, en su porción inferior consiste en bancos masivos de cuarcitas porfidoblásticas de grano medio a fino, con algunos microconglomerados lenticulares bastante compactos, cuyas coloraciones varían entre el

blanco amarillento hasta los matices rojizos o marrones con brillo resinoso. En el sector de Chignia, donde se observa el techo, está compuesto por bancos de cuarcitas grises de 3 a 4 m de grosor conteniendo intercalaciones de lodolitas gris oscuro a negras con restos de flora fósil. Se halla cubierta concordantemente por la formación Chignia.

- **Mesozoico: Formación Chignia (Km-chi)**

Se le ha localizado entre la quebrada El Salado y los alrededores de Mamayaco en el área suroriental de la cuenca conformando el núcleo del ciclino de Chignia. Litológicamente, en su parte inferior se encuentra constituida por una alternancia de cineritas blanquecinas, calizas, areniscas amarillentas de grano fino, areniscas limosas color gris verdosas en capas delgadas y cineritas pálidas fisibles. Se intercalan algunos horizontes de ignimbritas y areniscas calcáreas de matriz tobácea.

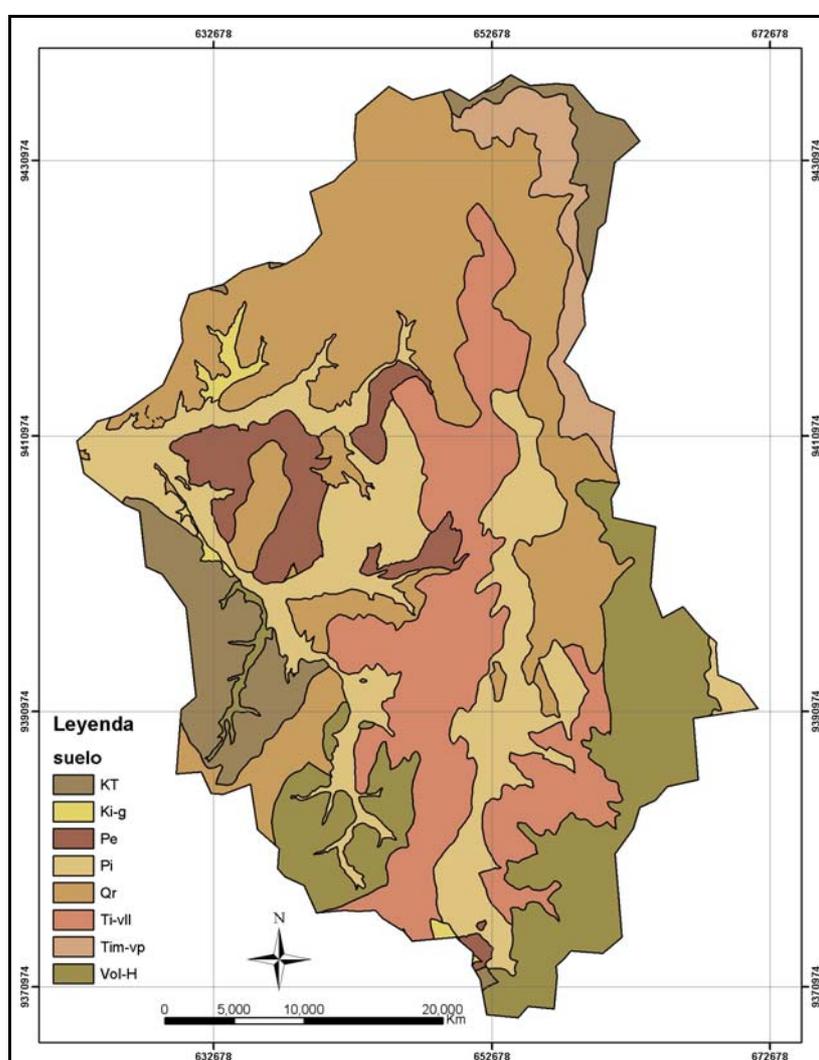


Figura 6.3. Geología de la cuenca Bigote-Huarmaca-INGEMMET.

- **Cenozoico: Terciario-Formación Volcánico Llama (Ti-VII)**

Se le ha encontrado en el área suroriental de la cuenca yaciendo discordantemente sobre unidades más antiguas e infrayaciendo con ligera discordancia angular al volcánico Porculla con un espesor promedio de 200 m.

Su litología está conformada por bancos masivos de brechas piroclásticas andesíticas gris verdosas, y lavas andesíticas que por alteración hidrotermal han tomado un color violáceo, existiendo algunas ocurrencias de lodolitas tobáceas.

- **Cuaternario: Depósitos recientes-Depósitos aluviales (Qr-al)**

Se les localiza al pie de las estribaciones de la Cordillera Occidental, en los flancos de los cursos fluviales del río Piura y sus tributarios y en las llanuras aluviales del área occidental de la cuenca. Están constituidos por materiales conglomerádicos y flangomerados polimícticos poco consolidados con una matriz areniscosa a limo-arcillosa, cuya composición varía de acuerdo al terreno de donde provienen.

- **Granitoides indiferenciados (Kt-i)**

Son rocas intrusivas, que se encuentran formando el Macizo de la Cordillera Occidental que atraviesa la cuenca en su área oriental. El clima húmedo ha causado una profunda alteración en los intrusivos imposibilitando establecer una secuencia de intrusión. Debido a esto y a la poca accesibilidad de los terrenos en donde se encuentran expuestos no han sido diferenciados cartográficamente de acuerdo a las variaciones litológicas.

6.2.4 Hidrología

Los ríos de la cuenca alta del río Piura, tienen un régimen hidrológico irregular, definido por una estación de abundancia de cinco meses, que ocurre en verano entre enero y mayo, y una época de escasez o estiaje que comienza en junio para concluir en diciembre.

Las descargas de estos ríos se presentan en ciclos, con años de máximas avenidas y años de mínimas descargas. Los períodos de duración de estos ciclos no son uniformes, por el contrario presentan gran variabilidad tanto en el tiempo como en magnitud de las descargas. En épocas de FEN, los escurrimientos generados tienden a sobrepasar los valores de descargas registradas, siendo de una magnitud extraordinaria y llegando a producir inundaciones aguas abajo que impactan en forma negativa en el progreso de los pueblos. En las partes altas de la subcuenca el río mantiene su cauce original ya que presenta un lecho rocoso y taludes pedregosos estables.

6.2.5 Sismicidad

Piura está situada en una zona de alta sismicidad, pues se encuentra sobre una franja sísmica muy activa, conocida como Círculo Circumpacífico o Círculo de Fuego del Pacífico. La tectónica de placas indica que la ocurrencia de sismos en la región sudamericana se debe a la interacción de la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca.

La Placa Sudamericana tiene a lo largo de sus bordes una gran concentración de actividad sísmica. Esta placa crece en la cadena Meso-Oceánica del Atlántico, avanzando con la Placa de Nazca, en su extremo occidental, que está constituida en la actualidad por la costa Sudamericana del Pacífico. La placa de Nazca crece en la cadena Meso-Oceánica del Pacífico oriental y avanza hacia el este con velocidades de 5 a 10 cm/año introduciéndose bajo la placa sudamericana con velocidades de 7 a 12 cm/año. La convergencia de la placa de Nazca en la placa Sudamericana Oriental constituye una zona de subducción, llamada zona de Benioff.

Existen plegamientos y fallamientos activos, regionales y locales, producto de la tectónica andina, destacando el conjunto de Huancabamba, que influye en la alta sismicidad de la región.

6.3. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA

La cuenca está conformada por los ríos Bigote y Huarmaca y de cuya unión en Malacasí se forma el río Piura.

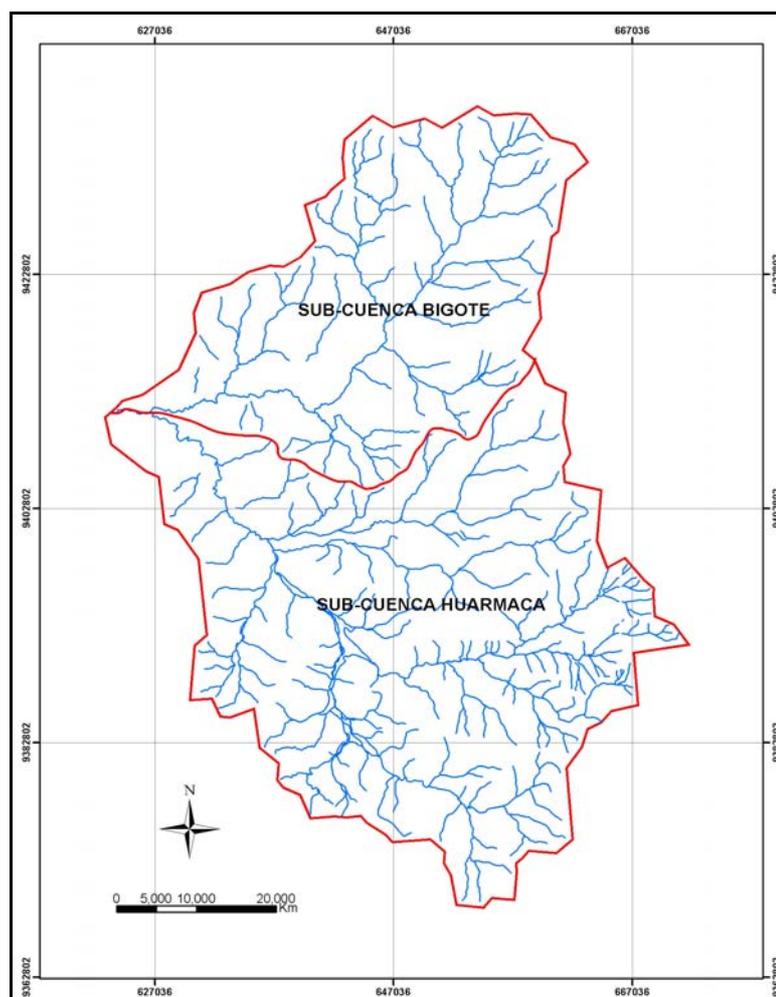


Figura 6.4. Ríos Bigote y Huarmaca.

6.3.1. Área de la cuenca (A)

Es la superficie de la cuenca delimitada por la divisoria natural de aguas, proyectado al plano horizontal. El tamaño influye directamente sobre los escurrimientos. El área de la cuenca Bigote Huarmaca es 1,860 km², correspondiendo el 39% a Bigote y el resto a la subcuenca de Huarmaca.

6.3.2. Perímetro de la cuenca (P)

Corresponde a la longitud de la línea divisoria de aguas que une los puntos de máximas alturas que separan dos cuencas adyacentes. El perímetro de la cuenca Bigote Huarmaca es 213.87 Km.

6.3.3. Longitud mayor del río (Lp)

Es la longitud mayor del cauce principal que atraviesa la cuenca, que es igual al recorrido del río desde la cabecera de la cuenca hasta el punto final o punto de desembocadura de la cuenca. La longitud mayor del cauce de la cuenca Bigote Huarmaca es 65.93 Km y corresponde al río Huarmaca.

6.3.4. Ancho promedio

El ancho promedio es la relación entre el área y la longitud del curso más largo.

$$A_p = \frac{A}{L_p} = \frac{1860}{65.93} = 28.2 \text{ Km}$$

6.3.5. Pendiente media del río

La pendiente influye sobre la velocidad del flujo y es un factor importante en la forma del hidrograma. La definición de la pendiente promedio del cauce en una cuenca es muy difícil, por lo general sólo se considera la pendiente del cauce principal. Para este caso, se ha calculado la pendiente media de los dos ríos principales .

$$S = \frac{H_M - H_m}{L_p} * 100 \quad (6.1)$$

$$S_{Huarmaca} = \frac{H_M - H_m}{L_p} * 100 = \frac{3600 - 150}{65930} * 100 = 5.23\%$$

$$S_{Bigote} = \frac{H_M - H_m}{L_p} * 100 = \frac{3150 - 150}{60790} * 100 = 4.94\%$$

H_M : Cota máxima (msnm)

H_m : Cota mínima (msnm)

6.3.6. Índice de Compacidad o Coeficiente de Gravelius

Es un coeficiente adimensional que nos da idea de la forma de la cuenca. Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de igual área a la de la cuenca. Viene expresado por:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0.2821 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (6.2)$$

$$K_c = \frac{0.2821 * 213.87}{\sqrt{1860}} = 1.4$$

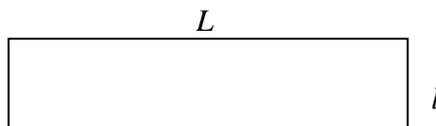
Por lo general K_c es mayor que 1. Este número nos da una idea de cómo será la escorrentía y la forma del hidrograma resultante de una determinada lluvia caída sobre la cuenca.

6.3.7. Rectángulo equivalente

Relaciona el perímetro y el área de la cuenca, tratando de reducirlo a las dimensiones de un rectángulo con la misma área y el mismo perímetro que la cuenca. Los lados de este rectángulo equivalente son:

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right) \quad (6.3)$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right) \quad (6.4)$$



$$L = \frac{1.4 * \sqrt{1860}}{1.12} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.4} \right)^2} \right) = 96.6 \text{ Km}$$

$$l = \frac{1.4 * \sqrt{1860}}{1.12} * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.4} \right)^2} \right) = 24.15 \text{ Km}$$

6.3.8. Relación área-elevación

Indica el porcentaje del área de la cuenca que se encuentra por encima o por debajo de una altitud considerada. Esta curva se puede considerar como una especie de perfil de la cuenca y su pendiente media en Km/Km², es un elemento sintético de comparación de la topografía entre cuencas.

Tabla 6.2. Área sobre cada una de las cotas.

Cota (msnm)	Área	
	km ²	%
3600	0.08	0
3000	92.26	5.0
2500	198.43	10.7
2000	387.79	20.9
1500	608.33	32.8
1000	932.89	50.3
500	1,407.49	75.9
150	1,854.82	100.0

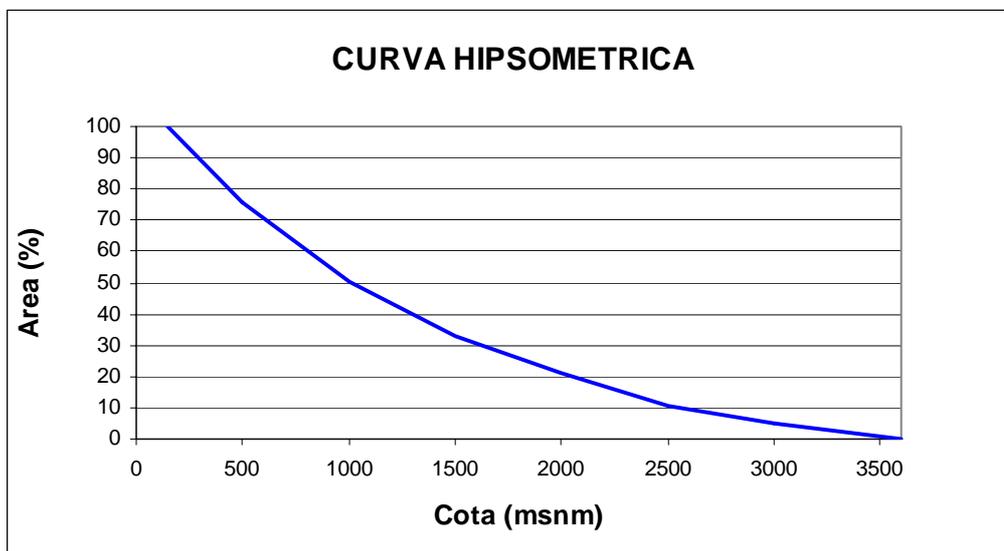


Figura 6.5. Curva Hipsométrica de la cuenca Bigote Huarmaca.

6.4. RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Las estaciones que operan dentro y en los alrededores de la cuenca Bigote-Huarmaca son las que se muestran en la tabla 6.3 y la Figura 6.6.

Tabla 6.3. Estaciones meteorológicas en el área de influencia.

Estación	Coordenadas		Altitud m.s.n.m	Período Registro	Institución Operante	Categoría
	Latitud S	Longitud W				
Altamiza	05° 04' 00"	79° 44' 00"	2,600	1979 - 1987	PECHP	PLU
Bigote	05° 20' 00"	79° 47' 00"	200	1963 - 1998	SENAMHI	PLU
Barrios	05° 17' 00"	79° 42' 00"	310	1974 - 1993	PECHP	PLU – H
Canchaque	05° 22' 00"	79° 36' 00"	1,200	1979 - 1987	SENAMHI	PLU-PG
Chignia	05° 36' 00"	79° 38' 00"	845	1979 - 1987	PECHP	PG
Morropón	05° 11' 00"	79° 59' 00"	140	1970 - 1998	SENAMHI	CO
Paltashaco	05° 07' 00"	79° 52' 00"	900	1971 - 1991	PECHP	PLU – H
Pasapampa	05° 07' 00"	79° 36' 00"	3,410	1964 - 1993	PECHP	PLU
Pirga	05° 40' 00"	79° 37' 00"	1,510	1979 - 1983	SENAMHI/P ECHP	PLU
Huarmaca	05° 34' 00"	79° 31' 00"	2,180	1973 - 1998	SENAMHI	CO

Fuente: Inventario de Estaciones Meteorológicas del SENAMHI (1998).

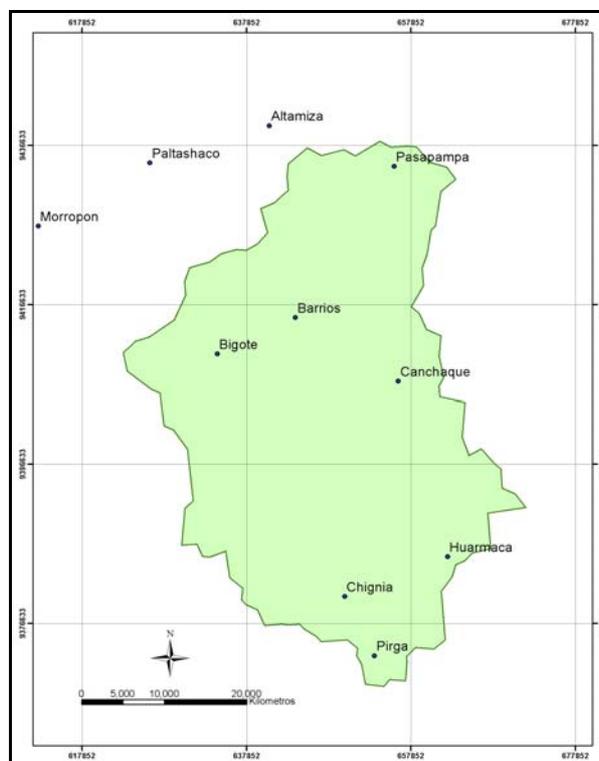


Figura 6.6. Red de estaciones meteorológicas en la cuenca Bigote Huarmaca.

6.5. APLICACIÓN DEL MODELO

6.5.1. Módulo Cuenca

Para el desarrollo del modelo se ha digitalizado la topografía de la carta nacional, la cual está a escala 1:100,000.

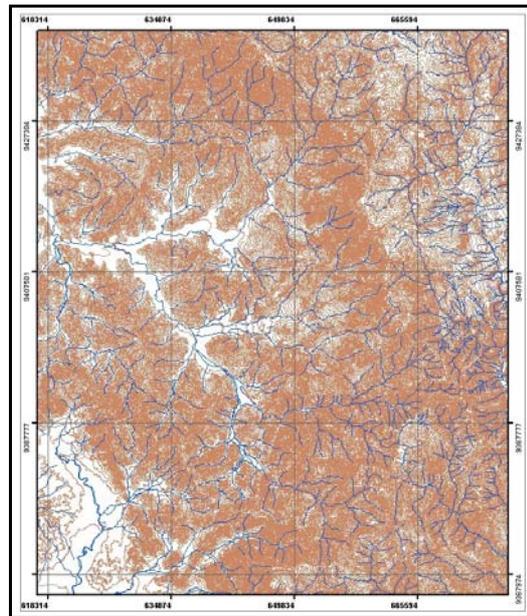


Figura 6.7. Topografía y red hídrica de la zona de estudio.

Con la información topográfica y puntos geodésicos se generó el TIN.

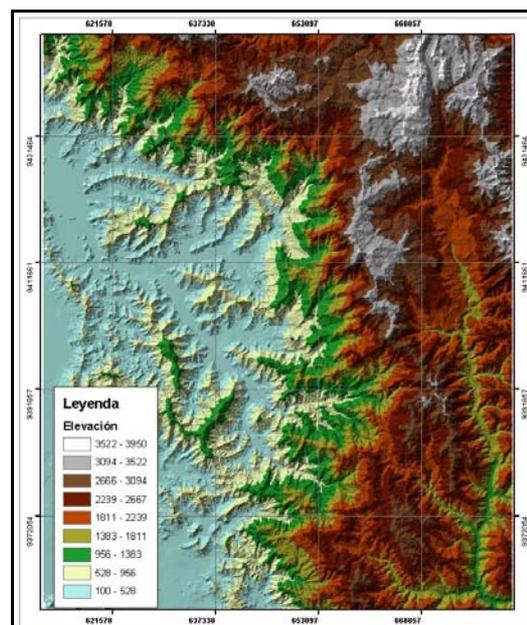


Figura 6.8. TIN de la zona de estudio.

Para generar el grid de la zona de estudio se trabajó con celdas de 500m x 500m por ser un tamaño proporcional con el área total de la cuenca.

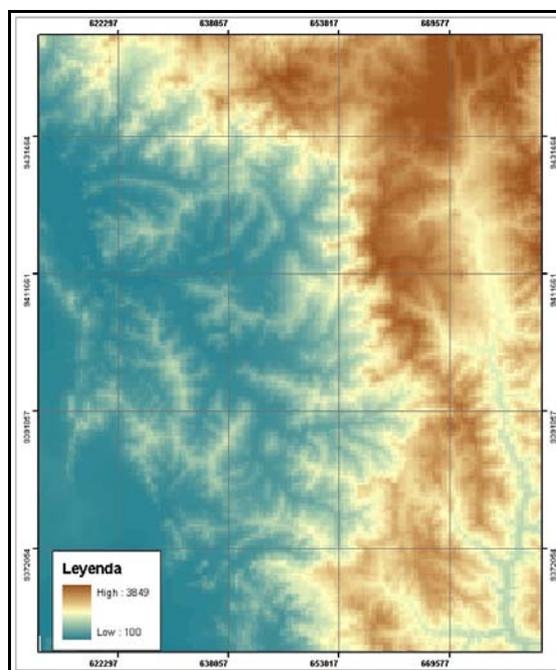


Figura 6.9. Grid de la zona de estudio.

Con el uso de las herramientas para ArcView Herr_MPE.avx se generaron los shapefile: Dirección de flujo y Acumulación de flujo.

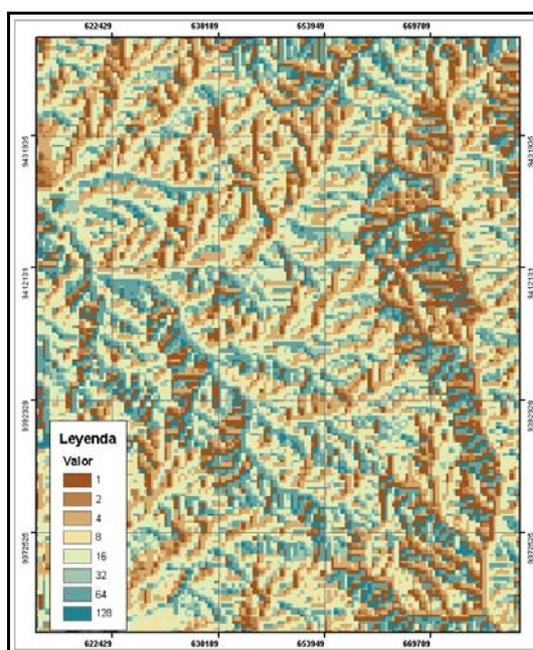


Figura 6.10. Dirección de flujo de la zona de estudio.

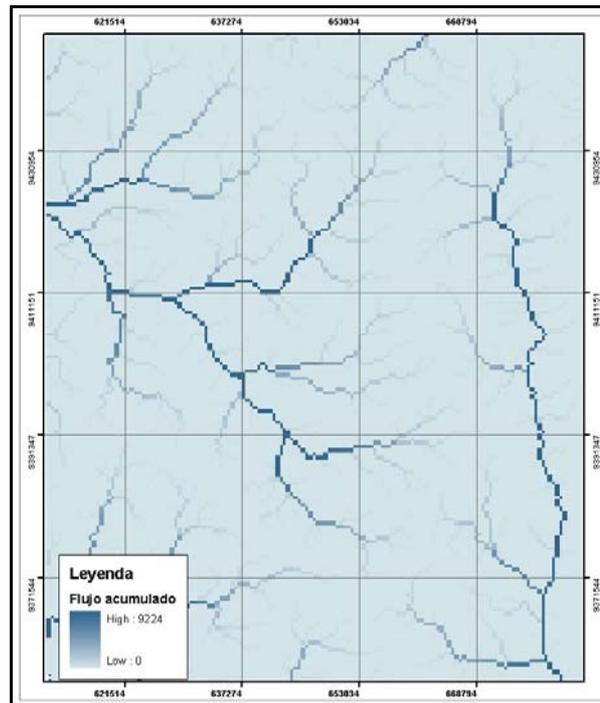


Figura 6.11. Acumulación de flujo de la zona de estudio.

Posteriormente, se generó el shapefile de delimitación de la cuenca Bigote-Huarmaca en formato vectorial.

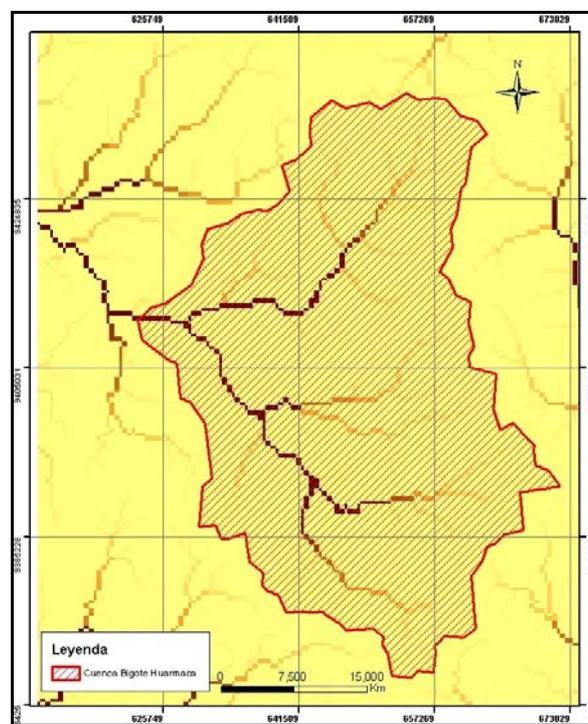


Figura 6.12. Delimitación de la cuenca Bigote-Huarmaca.

Con la cuenca en formato vectorial y el grid de celdas cuadradas se generó el shapefile fuentes de escorrentía el cual contiene 7442 celdas de 500x500 m. Estas celdas están identificadas con un ID y las coordenadas de su centroide (ver figura 6.14).

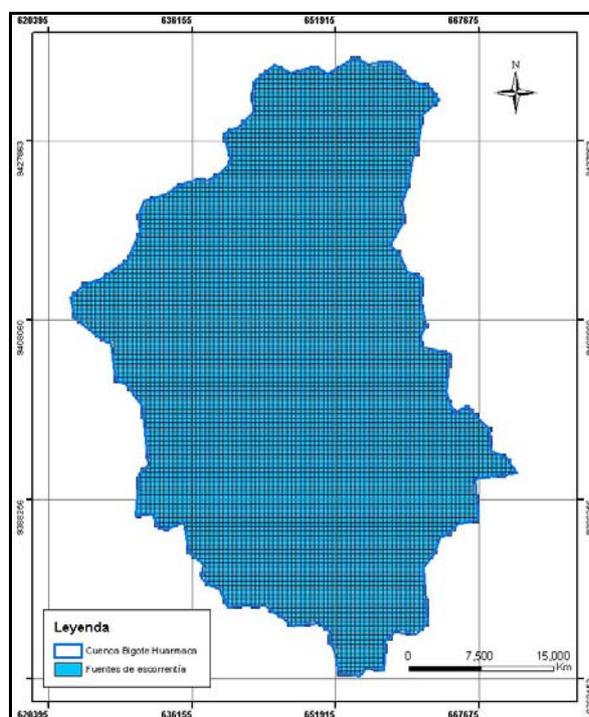


Figura 6.13. Fuentes de escorrentía de 500x500 m generadas para la cuenca Bigote-Huarmaca.

Attributes of Fuentes de escorrentía					
FID	Shape	ID	AREA	CENTRO_X	CENTRO_Y
7425	Polygon	7426	250000	655311.347	9369993.3471
7426	Polygon	7427	250000	655811.347	9369993.3471
7427	Polygon	7428	250000	656311.347	9369993.3471
7428	Polygon	7429	250000	656811.347	9369993.3471
7429	Polygon	7430	250000	652311.347	9369493.3471
7430	Polygon	7431	250000	652811.347	9369493.3471
7431	Polygon	7432	250000	653311.347	9369493.3471
7432	Polygon	7433	250000	653811.347	9369493.3471
7433	Polygon	7434	250000	654311.347	9369493.3471
7434	Polygon	7435	250000	654811.347	9369493.3471
7435	Polygon	7436	250000	656311.347	9369493.3471
7436	Polygon	7437	250000	656811.347	9369493.3471
7437	Polygon	7438	250000	652311.347	9368993.3471
7438	Polygon	7439	250000	652811.347	9368993.3471
7439	Polygon	7440	250000	653311.347	9368993.3471
7440	Polygon	7441	250000	653811.347	9368993.3471
7441	Polygon	7442	250000	654311.347	9368993.3471

Record: 1 Show: All Selected Records (0 out of 7442 Selected.)

Figura 6.14. Resultados del módulo cuenca.

6.5.2. Módulo Precipitación

En el departamento de Piura, generalmente las tormentas tienen duraciones menores a las 12 horas, salvo en regiones de las partes altas de las cuencas de los ríos Chira y Piura, como es el caso de la estación Huarmaca, donde se encontraron tormentas con duraciones que bordeaban las 24 horas. La magnitud de las tormentas se obtiene de los registros pluviométricos diarios del Proyecto Especial Chira Piura hasta 1993, del SENAMHI y del Sistema de Alerta Temprana (SIAT) que registra la precipitación actualmente.

Ardila (2001) observó que los perfiles calculados para las tormentas en Piura son bastante similares a los encontrados por Huff, además que se presenta una marcada tendencia de las tormentas del tipo I, seguidas por tormentas de los tipos II y III. En cuanto a las tormentas del tipo IV, éstas se presentaban en una menor proporción, llegando incluso a no presentarse en algunas estaciones.

Para la aplicación del modelo a la cuenca Bigote-Huarmaca, se trabajó con la distribución de tormentas Tipo I propuestos por Huff pues es muy similar a los perfiles de lluvia presentados en el departamento de Piura, además permiten distribuir una tormenta de duración y magnitud total conocida, en intervalos de tiempo más cortos.

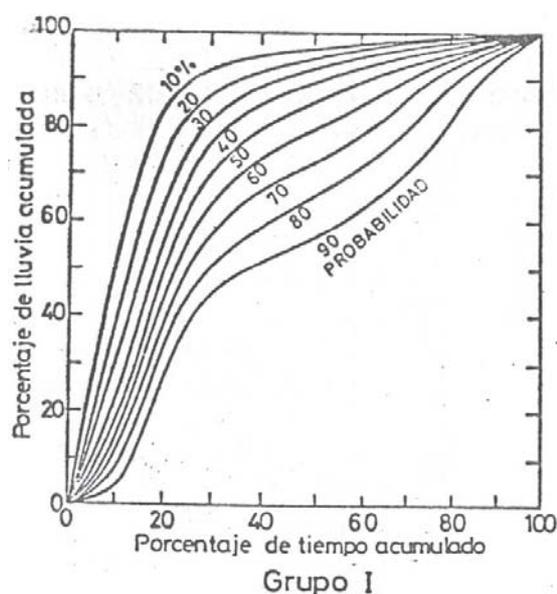


Figura 6.15. Distribución Tipo I propuesta por Huff.

Los hietogramas de precipitación total de las estaciones cercanas y pertenecientes a la cuenca Bigote-Huarmaca se almacenan en una tabla (ver figura 6.16). Posteriormente se interpolan con el método de interpolación Kriging Simple y se obtienen los hietogramas de precipitación total para cada celda fuente de la cuenca (ver figuras 6.17 y 6.18).

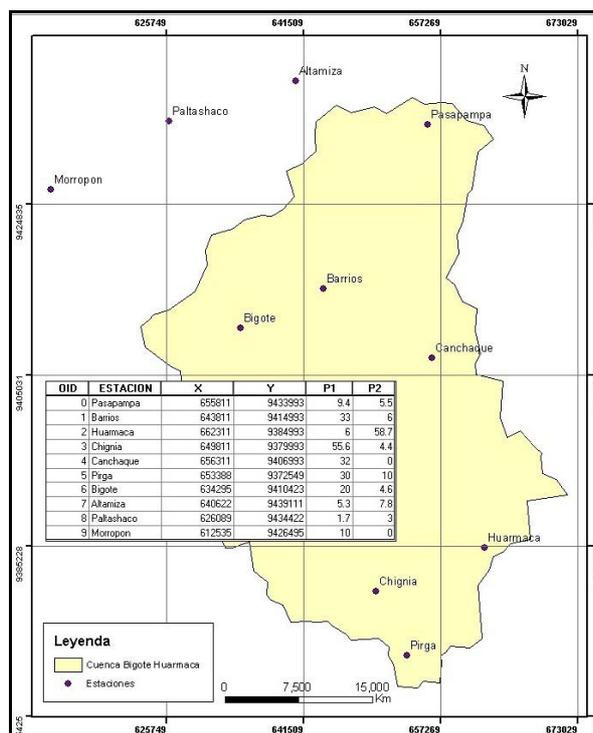


Figura 6.16. Estaciones de la cuenca Bigote-Huarmaca y tabla de hietograma de precipitación total.

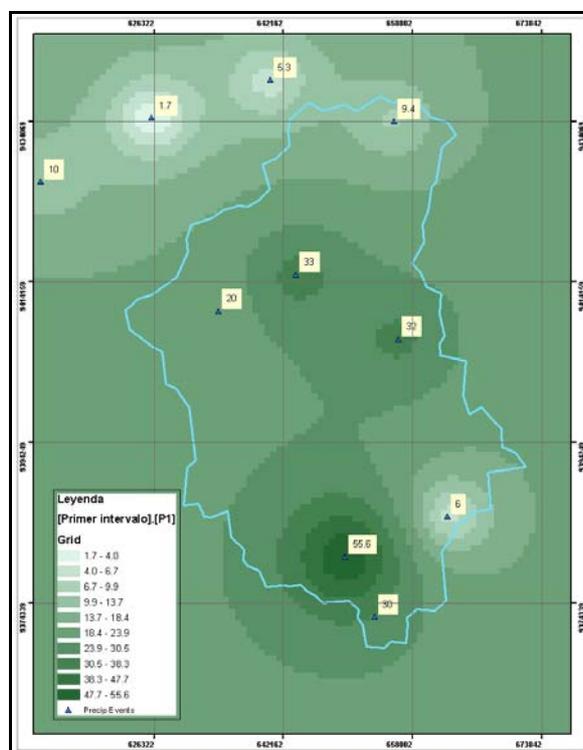


Figura 6.17. Interpolación del primer intervalo de precipitación con método Kriging Simple.

Attributes of P_celda

FID	Shape	ID	X	Y	P1	P2
0	Point	1	653811.347	9436993.3471	10.11	5.75
1	Point	2	654311.347	9436993.3471	10.04	5.71
2	Point	3	653311.347	9436493.3471	10.12	5.75
3	Point	4	653811.347	9436493.3471	10.02	5.71
4	Point	5	654311.347	9436493.3471	9.93	5.67
5	Point	6	654811.347	9436493.3471	9.86	5.64
6	Point	7	656811.347	9436493.3471	9.83	5.61
7	Point	8	657311.347	9436493.3471	9.89	5.63
8	Point	9	657811.347	9436493.3471	9.98	5.65
9	Point	10	645311.347	9435993.3471	8.42	7.05
10	Point	11	645811.347	9435993.3471	8.76	6.97
11	Point	12	649311.347	9435993.3471	10.43	6.33
12	Point	13	649811.347	9435993.3471	10.51	6.24
13	Point	14	652311.347	9435993.3471	10.29	5.83
14	Point	15	652811.347	9435993.3471	10.17	5.77
15	Point	16	653311.347	9435993.3471	10.05	5.71
16	Point	17	653811.347	9435993.3471	9.94	5.67
17	Point	18	654311.347	9435993.3471	9.84	5.63
18	Point	19	654811.347	9435993.3471	9.75	5.60
19	Point	20	655311.347	9435993.3471	9.70	5.58
20	Point	21	656811.347	9435993.3471	9.67	5.57

Record: 1 Show: All Selected Records (0 out of 7442 Selected.) Options

Figura 6.18. Resultados módulo precipitación.

6.5.3. Módulo Infiltración

Las abstracciones en una cuenca no son las mismas y varían espacialmente en toda ella, por ello es necesario conocer los diversos tipos de suelo que hay en la misma. Para la cuenca Bigote-Huarmaca se obtuvieron estudios de suelos realizados en la zona por el Gobierno Regional – Piura en los años 2002 y 2003.

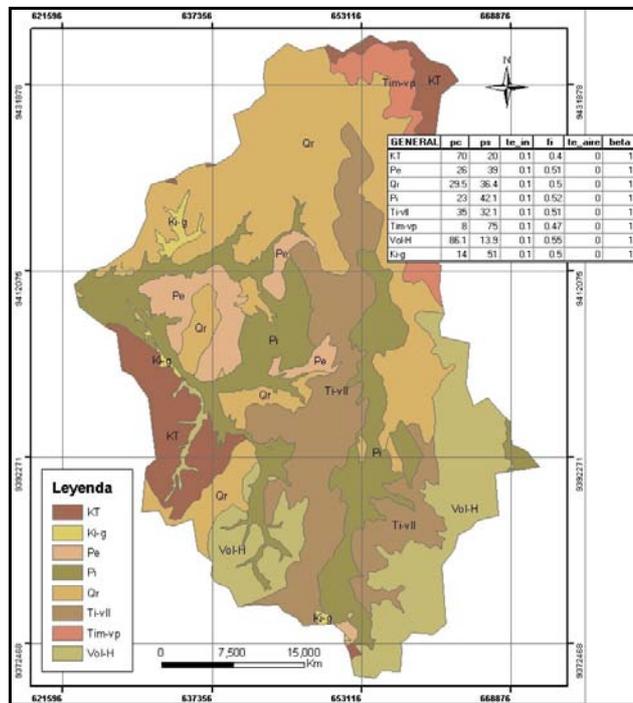


Figura 6.19. Tipos de suelos en la cuenca Bigote-Huarmaca.

Finalmente, con los hietogramas totales en cada celda obtenidos en el módulo de precipitación, los tipos de suelo con sus respectivas características y el uso de las herramientas “Parámetros de suelo” y “Hietograma efectivo” se obtuvieron los hietogramas de precipitación efectiva para cada celda de la cuenca Bigote-Huarmaca.

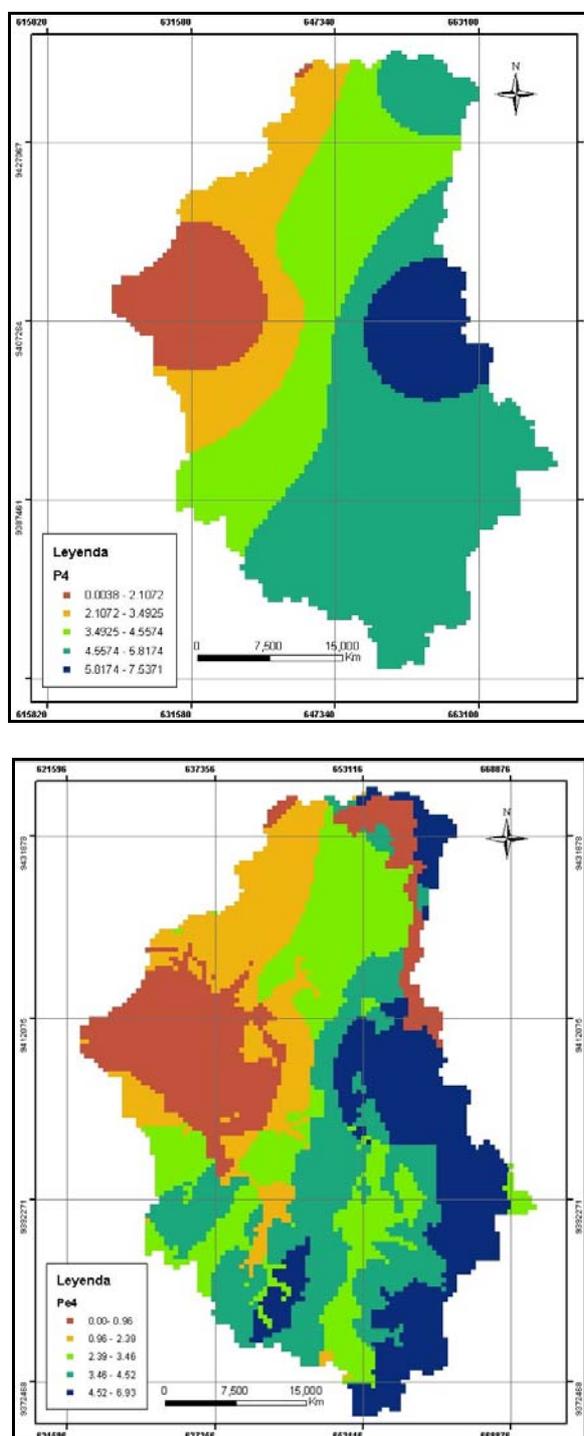


Figura 6.20. Precipitación total y precipitación efectiva (4° intervalo) en la cuenca Bigote-Huarmaca.

ID	X	Y	Pe1	Pe2	Pe3	Pe4
1	653811.347	9436993.3471	0	2.668516	3.384490	4.630090
2	654311.347	9436993.3471	0	2.703522	3.428990	4.691090
3	653311.347	9436493.3471	0	0	0.408361	2.296363
4	653811.347	9436493.3471	0	2.704622	3.430390	4.692890
5	654311.347	9436493.3471	0	2.738828	3.473790	4.752390
6	654811.347	9436493.3471	0	2.764332	3.506290	4.796890
7	656811.347	9436493.3471	0	2.794437	3.544490	4.849290
8	657311.347	9436493.3471	0	2.788336	3.536690	4.838590
9	657811.347	9436493.3471	0	2.778635	3.524290	4.821590
10	645311.347	9435993.3471	0	0	0	0.000000
11	645811.347	9435993.3471	0	0	0	0.000000
12	649311.347	9435993.3471	0	2.048769	2.597590	3.551990
13	649811.347	9435993.3471	0	2.151599	2.728090	3.730790
14	652311.347	9435993.3471	0	0	0.304690	2.141741
15	652811.347	9435993.3471	0	2.640911	3.349390	4.581990
16	653311.347	9435993.3471	0	2.693020	3.415590	4.672690
17	653811.347	9435993.3471	0	2.735627	3.469790	4.746990
18	654311.347	9435993.3471	0	0	0	0.000000
19	654811.347	9435993.3471	0	0	0	0.000000

Record: 0 Show: All Selected Records (0 out of 7442 Selected.)

Figura 6.21. Resultados módulo infiltración.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una tecnología relativamente reciente y representan una herramienta muy poderosa para el análisis y modelación de una multitud de problemas cuya componente común es la variabilidad espacial.
- La precipitación no es uniforme en toda la cuenca y la infiltración varía por la heterogeneidad del terreno. El modelo distribuido que se presenta utiliza la variación de los parámetros dentro del dominio espacial de la cuenca, entregando una respuesta hidrológica más realista que los modelos tradicionales.
- Los modelos lluvia-escorrentía existentes no abordan el cálculo de la infiltración y consideran que la precipitación neta es una variable de ingreso al modelo, ya conocida por otros modelos simplificados. Esto no se aproxima a la realidad.
- El modelo de infiltración de Green y Ampt muestra una gran flexibilidad y facilidad de aplicación para simular el proceso de infiltración. Las aproximaciones explícitas para la infiltración acumulada existentes en la literatura y la disponibilidad de técnicas para estimar los parámetros en función de la textura del suelo convierten al modelo de Green y Ampt en una herramienta poderosa para calcular el hietograma de lluvia efectiva cuando la cuenca se divide en un número grande de fuentes de escorrentía.

- La extensión Geoestadística permite hacer las interpolaciones para una variedad de métodos y modelos y compararlos para elegir el que mejor se ajuste a los registros disponibles. El método de interpolación empleado en el presente trabajo es Kriging simple, pues arrojó el menor valor de raíz media cuadrática (RMS).
- El lenguaje de programación Visual Basic, enlazado al ArcView demostró gran versatilidad en la implementación computacional del modelo hidrológico, debido a que permite el proceso y manejo de matrices de gran tamaño, que contienen los datos espaciales de la cuenca.
- Las principales limitaciones de un modelo hidrológico distribuido como es este caso son la información como topografía, registros pluviográficos consistentes y tipos de suelo. En relación a la plataforma de trabajo se requiere de un equipo de cómputo con capacidad y memoria para soportar el procesamiento de la gran base de datos generada con cada archivo.

7.2. RECOMENDACIONES

- La integración entre los SIG y los modelos hidrológicos, abre la posibilidad de seguir investigando modelos distribuidos que simulen otros procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica.
- Si no se cuenta con el modelo de elevación digital para una cuenca cualquiera, se puede acceder al DEM HYDRO1K, que es una base de datos geográfica desarrollada en el EROS DATA CENTER del U.S. GEOLOGICAL SURVEY'S (USGS), y proporciona una cobertura global y consistente de datos, en una resolución de 1 kilómetro, para todo el mundo.
- Se plantea hacer los estudios de propagación de flujo y separación del caudal de flujo base del efectivo, logrando realizar la comparación del caudal observado con el caudal del modelo, para lo cual se propone aplicar el modelo de precipitación efectiva desarrollado en la presente tesis.
- Para la adecuada aplicación del modelo se recomienda contar con lo siguiente:
 1. Un shapefile de las celdas fuente de la cuenca.
 2. Un shapefile de los centros de las celdas fuente.
 3. Un shapefile llamado "suelo" que contenga la zonificación de la cuenca con las propiedades de cada una.
 4. Un shapefile que contenga la ubicación de cada estación meteorológica, así como los valores de precipitación total correspondientes para cada una.
 5. Cargar la aplicación "De Raster", que permite exportar los valores del archivo grid obtenido a partir de la interpolación de precipitación. Esta aplicación, exporta los valores de precipitación total en cada celda al archivo P_celda.
 6. Cargar la aplicación "Calcular parámetros de suelo" que permite obtener los parámetros de suelo correspondientes a cada zona, a partir del shapefile "suelo".
 7. Cargar la aplicación "Hietograma efectivo" que permite obtener la precipitación efectiva en cada celda de la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- [B-01] **Aplicaciones de los SIG**
<http://www.medioambiente.gov.ar/geoinformacion/aplicaciones/default.htm>
- [B-02] Calle Vásquez, Gustavo. **Modelo Hidrológico Espacialmente Distribuido basado en Sistemas de Información Geográfica**, tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2002, 237 pp.
- [B-03] CHOW, Ven Te. **Hidrología Aplicada**. Mc Graw Hill, Enero 1999.
- [B-04] Ardila Ramírez, Jaime Eduardo. **Determinación de tormentas de diseño para el departamento de Piura**, tesis de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Piura, Marzo 2001.
- [B-05] GTZ, CTAR-PIURA. **Estudio de la capacidad física e hidrología de las subcuencas Bigote y la Gallega: un aporte a su gestión y desarrollo**. Proyecto "ayuda de emergencia el Niño orientado al desarrollo". Piura, diciembre de 1999.
- [B-06] Carlos Tucci. **Hidrología**. Brasil 2002
- [B-07] **HYDRO1k Documentation** <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/readme.html>
- [B-08] Maidment. **Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field**. Center for Research in Water Resources of the University of Texas at Austin, USA. 1996.
- [B-09] Olivera Francisco. **Spatially distributed modeling of storm runoff and non-point source pollution using Geographic Information Systems**. Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering of the University of Texas at Austin, USA. 1996.
- [B-10] Estudios de suelos en algunos caseríos de la cuenca Bigote-Huarmaca desarrollados por el Gobierno Regional Piura, años 2002 y 2003.
- [B-11] REVESZ, Bruno y BERNEX DE FALEN, Nicole, **Atlas Regional de Piura**, Editado por el Centro de Investigación y Promoción del Campesinado (CIPCA) y la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1985, 253 pp.
- [B-12] **Software SIG** <http://www.esri.com>
- [B-13] **Software SIG** <http://www.geotecnologias.com/esri/arcinfo.htm>
- [B-14] **Software SIG**
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=20