

UNIVERSIDAD DE LAS CIENCIAS INFORMÁTICAS

Facultad 9



TÍTULO: Modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en Sistemas de Información Geográfica.

TRABAJO DE DIPLOMA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN CIENCIAS INFORMÁTICAS

AUTORA: Mailin Dieguez Pavón.

TUTOR: Ing. Yoenis Pantoja Zaldívar.

CO-TUTOR: Lic. Yinet Marzo Manuel.

CONSULTOR: M.Sc. Argelio Omar Fernández Richelme.

Ciudad de La Habana, Junio 2010

“Año 52 de la Revolución”

FRASE

“El verdadero honor es el que resulta del ejercicio de la virtud y del cumplimiento de los propios deberes”

Gaspar Melchor de Jovellanos

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor de este trabajo y autorizo a la Facultad 9 de la Universidad de las Ciencias Informáticas a hacer uso del mismo en su beneficio.

Para que así conste firmo la presente a los ____ días del mes de _____ del año 2010.

Mailin Dieguez Pavón

Yoenis Pantoja Zaldívar

DATOS DE CONTACTO

DATOS DE CONTACTO

Tutor: Ing. Yoenis Pantoja Zaldívar. Ingeniero en Informática, Universidad de Holguín 2006. Profesor del Departamento de Geoinformática, Facultad 9.

Correo electrónico: ypantojaz@uci.cu . Teléfono: 837 3150

Co-tutor: Lic. Yinet Marzo Manuel. Licenciada en Geografía, Universidad de la Habana, 2008. Profesora del Departamento de Ciencias Básicas, Facultad 9.

Correo electrónico: yinetmm@uci.cu . Teléfono: 837 2118

Consultor: Msc. Argelio Omar Fernández Richelme. Máster en Manejo Integral del Agua, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, 2007. Especialista de la Dirección de Cuencas Hidrográficas, Servicio Hidrológico Nacional, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Correo electrónico: argelio@hidro.cu . Teléfono: 836 3449

RESUMEN

RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Los SIG aplicados a procesos de modelizaciones hidrológicas están adquiriendo un gran auge a nivel mundial, debido al gran valor que están obteniendo en la construcción de modelos hidrológicos. Estos sistemas aportan un conjunto de instrumentos que pueden ser aplicados en la modelación hidrológica y que a su vez facilitan la evaluación de los recursos hídricos. En Cuba existen grandes dificultades en el proceso de evaluación de las variables hidrológicas, debido a que no cuenta con un sistema que le brinde las herramientas de apoyo a la toma de decisiones y a la evaluación de todos los procesos asociados.

En el presente trabajo se propone como solución de dicho problema el desarrollo de un modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG. Para ello se hace necesario realizar una valoración del estado del arte de los SIG y las modelizaciones hidrológicas, plantear las características físicas, geográficas e hidrológicas de la isla y llevar a cabo un estudio de la variable hidrológica precipitación, pues en esta se centra específicamente el modelo, por ser uno de los componentes más importantes del balance hídrico.

PALABRAS CLAVES: SIG, modelizaciones hidrológicas, hidrología, precipitaciones.

ÍNDICE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: Fundamentación Teórica	6
1.1 Introducción.	6
1.2 Conceptos asociados al dominio del problema.....	6
1.2.1 Hidrología.....	6
1.2.2 Hidrografía.	7
1.2.3 Cuencas.....	7
1.2.4 Régimen hidrológico.....	7
1.2.5 Balance hídrico.....	8
1.2.6 Recursos Hídricos (RH).....	8
1.2.7 Ciclo Hidrológico.	9
1.2.8 Precipitación.....	9
1.2.9 Sistemas de Información.	9
1.2.10 Información Geográfica.	10
1.2.11 Datos Espaciales.....	10
1.3 Objeto de Estudio.....	11
1.3.1 Descripción General.	11
1.3.2 Procesos de Modelizaciones Hidrológicas.....	11
1.3.3 Precipitación como variable componente de las modelizaciones hidrológicas.....	12
1.3.4 Sistemas de Información Geográfica.....	14
1.3.5 Relación de los Procesos de Modelizaciones Hidrológicas con los SIG.	14
1.3.6 Descripción actual del dominio del problema.....	15
1.3.7 Situación Problemática.....	16
1.4 Análisis de soluciones existentes.	17
1.4.1 HydroSIG.	18
1.4.2 Arc Hydro.	20
1.4.3 GIS-BALAN.....	25
1.4.4 ILWIS.	26
1.4.5 AGWA.....	27
1.4.6 Observaciones del estudio de las soluciones existentes.	28
1.5 Conclusiones parciales.	29

ÍNDICE

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.....	30
2.1 Introducción.	30
2.2 Metodologías para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica.	30
2.3 Lineamientos para la conceptualización de procesos de modelizaciones hidrológicas.....	33
2.4 Precipitación como variable del ciclo hidrológico.....	35
2.5 Elementos para la modelización de precipitaciones.	37
2.6. Objetivos hidrográficos de precipitaciones.	38
2.8 Conclusiones parciales.	39
CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo.....	40
3.1 Introducción.	40
3.2 Descripción del modelo.	40
3.2.1 Variables del modelo.	40
3.3 Descripción de las actividades del modelo.	42
3.3.1 Creación de las bases cartográficas.....	42
3.3.2 Creación de las bases alfanuméricas.	44
3.3.3 Combinación de las caracterizaciones representadas.....	45
3.3.4 Obtención de características resultantes de la combinación.....	46
3.3.5 Generación de Modelos Digitales de Precipitaciones (MDP).....	48
3.3.6 Análisis del comportamiento espacial de la variable precipitación.	49
3.4 Técnicas y herramientas de soporte al modelo.	49
3.4.1 Técnicas de soporte al modelo.....	49
3.4.2 Herramientas de soporte al modelo.....	50
3.5 Evaluación del modelo.	52
3.6 Validación del modelo.	53
3.7 Conclusiones parciales.	61
CONCLUSIONES GENERALES	63
RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Esquema conceptual de HidroSIG.....	18
Figura 1. 2 Interfaz principal de HidroSIG.....	19
Figura 1. 3 Componentes del modelo de datos de Arc Hydro. Aguas Superficiales.....	21
Figura 1. 4 Componentes del modelo de datos de Arc Hydro incluyendo objetos de las aguas subterráneas.....	22
Figura 1. 5 Arc GIS características de 2 y 3 dimensiones..	23
Figura 1. 6 Opciones de interfaz para extraer y escribir información desde y hacia el modelo de datos.....	24
Figura 1. 7 Integración de los modelos que utilizan el modelo de estructura de datos.....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla # 1 Coeficiente de competencia entre los expertos	56
Tabla # 2 Pesos asignados por los expertos para cada criterio.....	56
Tabla # 3 Orden de los rangos de puntajes ligados.....	58
Tabla # 4 Evaluación de la compatibilidad de los expertos según el coeficiente de Kendall.	61

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo económico de cualquier país constituye una necesidad primordial el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, constituyendo uno de los retos más importantes la planificación del uso del agua por su distribución limitada sobre la superficie terrestre. Planificar el uso de los recursos, por tanto, se convierte en un objetivo imprescindible en la actualidad.

Del total de los recursos hídricos de la Tierra, sólo 2.5% es agua dulce, el resto es salada. La mayor parte del agua dulce se encuentra en los hielos polares o como humedad del suelo o bien a profundidades inaccesibles en acuíferos subterráneos, con la cual queda menos del 1% disponible para su utilización. El desarrollo humano sostenible depende de la disponibilidad de agua. Se calcula que más de un tercio de la producción mundial de alimentos se basa en el riego, del cual una proporción importante puede depender de recursos de aguas subterráneas no sostenibles. A pesar de los progresos alcanzados en los dos últimos decenios para mejorar el acceso del agua potable, alrededor de 1 100 millones de personas todavía carecen de estos recursos. Las zonas de escasez y penuria de agua son cada vez más numerosas, particularmente en África septentrional y Asia occidental. En los próximos dos decenios se espera un aumento del 40% en la demanda total de agua. Para el año 2025, dos tercios de la población mundial podrían estar viviendo en países con escasez de agua moderada o grave. (Heinonen, 2008)

El reto es cómo gestionar este recurso finito, en la actualidad y en el futuro. Por el hecho de que los recursos de agua dulce con gran frecuencia son compartidos por más de un país dentro de una región, se necesitarán acciones a niveles nacionales e internacionales para mejorar el acceso en las regiones que carecen de agua y mejorar el uso eficiente en aquellas regiones que tienen agua actualmente, de modo que esos recursos puedan mantenerse para las futuras generaciones. La clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos consiste en poseer los conocimientos necesarios para tomar las decisiones apropiadas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido, gracias al desarrollo de los medios informáticos, en una potente herramienta de apoyo a la gestión de recursos naturales, constituyéndose durante los últimos veinte años en una de las herramientas de trabajo más importantes para investigadores, analistas y planificadores.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de solucionar problemas de mayor complejidad y manejar eficientemente la información, ha convertido a los SIG en instrumentos vitales para el análisis, planeamiento y administración de los recursos naturales. Con el desarrollo de esta tecnología los planificadores tienen a su alcance un sistema que facilita la manipulación y análisis de datos geográficos. Los SIG también aportan una serie de instrumentos que se utilizan en la modelación de elementos y fenómenos del mundo real, brindando al investigador la posibilidad de visualizar y entender con claridad las relaciones espaciales. Estas cualidades son de interés primordial en actividades relacionadas con la planificación y se torna en un factor importante en la toma de decisiones, al contribuir al estudio de la distribución y monitoreo de recursos naturales, en aras de lograr la utilización racional y sostenible de los mismos.

En los últimos años los SIG han alcanzado gran aplicación en el campo de la hidrología, específicamente, en la gestión integrada de los recursos hídricos. Estos programas permiten mejorar la representación de la variabilidad en la componente espacial de sistemas naturales, como los hidrológicos, a partir de la construcción de modelos espaciales. Es por ello que se han consolidado en los últimos años como las herramientas más adecuadas para afrontar de forma eficiente la modelización hidrológica.

El uso de los SIG ha llegado a la mayoría de los entornos de negocio, sobre todo para su puesta en marcha en la toma de decisiones. Las propiedades de estos software brindan mucho apoyo por la utilidad de representación de objetivos geográficos de cualquier orden, dígame económicos, sociales o naturales. En este último aspecto, tienen grandes ventajas por el compendio de variables que pueden asociarse a los datos espaciales, como comportamientos, proyecciones y demás parámetros involucrados en fenómenos o estructuras naturales.

La evaluación de los recursos hídricos requiere la realización de balances de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Para ello, se utilizan diferentes métodos, los cuales tienen algunas limitaciones provocadas por los problemas e inseguridades existentes en la estimación de ciertos parámetros y componentes del balance. En este contexto el desarrollo de modelos digitales es una alternativa para la obtención de información hidrológica de variables del balance hídrico.

Los recursos hídricos constituyen elementos claves dentro de la naturaleza, sobre ellos recae la mayoría de los análisis ambientales que forman parte del estado actual de territorios desde el punto de vista hidrográfico. Cuba es uno de los países más complejos en el proceso de evaluación de los recursos

INTRODUCCIÓN

hidrológicos por su forma alargada y estrecha, lo que provoca que las fuentes de agua dulce sean cortas y por ende difíciles de evaluar.

La situación actual de los recursos hídricos en Cuba se ve medida principalmente por la variable hidrológica “precipitación”, debido a los grandes volúmenes de lluvia e intensas sequías que prevalecen en ciertas épocas del año. Embalses, canales magistrales, obras de protección, estaciones de bombeo para el abasto de agua, acueductos y alcantarillados en la ciudad y en el campo, desarrollo de la hidroenergía, educación, capacitación y divulgación, personal calificado e instrumentos jurídicos han sido desarrollados para controlar y evaluar los recursos hídricos en la isla, lo que constituyen las fortalezas que posee el sector agua en Cuba, para servir de sostén al desarrollo económico-social, a la protección a la sociedad, el medio ambiente y la economía, y al mejoramiento de la calidad y seguridad de la vida humana.

Las empresas hidrológicas no cuentan muchas veces con sistemas automatizados que le garanticen métodos de ayuda en la toma de decisiones y en la evaluación de todos los procesos asociados al análisis de las precipitaciones. Hay muchos sistemas que incluyen varias herramientas para este fin, pero su carácter privativo y los términos de licencia obligan a utilizar las técnicas más obsoletas que hacen que los resultados no sean los más eficientes.

Teniendo en cuenta la información preliminar y tomando como referencia algunas peculiaridades de los recursos hídricos en Cuba, específicamente los referidos a las precipitaciones y su evaluación, surge para la presente investigación el siguiente **problema a resolver**: *Dificultad en los procesos de análisis de variables hidrológicas (precipitaciones) en los sistemas de gestión integral de recursos hídricos en Cuba.*

Se define como **objeto de estudio** los *Procesos de Modelizaciones Hidrológicas*. De ello se deriva que el **campo de acción** donde se enmarca la investigación sea la *modelización de la variable precipitación en el análisis hidrológico*.

Se plantea como **objetivo general** de la investigación *describir un modelo que permita la representación y análisis de variables hidrológicas sobre Sistema de Información Geográfica*.

Para darle cumplimiento al objetivo trazado se determinó que las **tareas** a realizar durante la investigación serían las siguientes:

1. Identificar los problemas existentes en el proceso de modelizaciones hidrológicas en Cuba.

INTRODUCCIÓN

2. Caracterizar el estado del arte de los procesos de modelizaciones hidrológicas.
3. Caracterizar el estado del arte de los Sistemas de Información Geográfica para la hidrología.
4. Identificar las vías y pasos para aplicar SIG en procesos de modelizaciones hidrológicas.
5. Adecuar modelización hidrológica sobre SIG para la variable precipitación.
6. Crear el modelo que permita aplicar los Sistemas de Información Geográfica en procesos de Modelizaciones Hidrológicas para la evaluación de la variable precipitación.
7. Validar el modelo.

El cumplimiento exitoso de las tareas expuestas anteriormente contribuyen a la contrastación y/o verificación de la **hipótesis** de esta investigación: *Un modelo para la representación y análisis de variables hidrológicas sobre SIG permitirá la evaluación de las precipitaciones en los sistemas de gestión integral de recursos hídricos en Cuba de manera más eficiente, en menos tiempo y con la utilización mínima de recursos.*

Como **posible resultado** se tiene *un modelo que permita la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en Sistemas de Información Geográfica para mejorar el proceso de evaluación de las precipitaciones en los sistemas de gestión integral de recursos hídricos en Cuba.*

Para el desarrollo de la investigación se utilizan varios métodos científicos, tanto teóricos como empíricos. Dentro de los métodos teóricos son utilizados el Método Histórico – Lógico y el Análisis y Síntesis, y dentro de los métodos empíricos sólo la Encuesta. A continuación se explica el por qué de la selección de los mismos.

1. Histórico – Lógico: Se aplica para realizar el seguimiento de la evolución del objeto de estudio y una predicción de lo que puede hacerse en el futuro, en este caso se utiliza para investigar la existencia de las funcionalidades de los SIG que pueden ser aplicados a procesos de modelizaciones hidrológicas.
2. Análisis y Síntesis: Se utiliza para identificar y analizar las diversas funcionalidades de los SIG que pueden ser aplicadas a la hidrología y su posterior síntesis a partir de la selección de las funcionalidades aplicables a los procesos de modelizaciones hidrológicas conforme a las necesidades de Cuba.

INTRODUCCIÓN

3. Encuesta: Se utiliza para determinar la oportunidad de aplicación del modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG y para la validación de los resultados de la investigación.

Para lograr resultados que le dieran credibilidad a esta investigación fue necesario seleccionar una población, de la cual se extrajo una muestra que fue analizada. De los resultados obtenidos a partir de este análisis se pudo deducir cómo se iba a comportar dicha población. A continuación se presentan:

Población: Cinco especialistas en los Sistemas de Información Geográfica.

Muestra: Cinco especialistas en los Sistemas de Información Geográfica.

Unidad de Estudio: Un especialista en los Sistemas de Información Geográfica.

Para la selección de la muestra fue utilizada la técnica de muestreo no probabilístico, específicamente, el muestreo intencional, pues este permite escoger los integrantes de la muestra, por lo que permite seleccionar explícitamente los elementos que son representativos o con posibilidad de tomar más información.

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica.

1.1 Introducción.

En el presente capítulo se realiza un estudio sobre los Sistemas de Información Geográfica y los procesos de modelizaciones hidrológicas, su evolución y funcionalidad para lograr una eficaz fusión entre ellos. Además, se dan a conocer elementos sustantivos de la aplicación de SIG en procesos de modelizaciones hidrológicas a nivel mundial de forma general y se manejan términos referidos a las precipitaciones como variable componente del ciclo hidrológico.

1.2 Conceptos asociados al dominio del problema.

Con el propósito de que el lector tenga una mejor comprensión de los temas que serán abordados en este capítulo, directamente relacionados con el objeto de estudio de esta investigación, se describen a continuación un grupo de conceptos relacionados con el dominio del problema, entre los que se destacan: Hidrología, Hidrografía, Cuencas Hidrológicas, Régimen Hidrológico, Balance Hídrico, Recursos Hídricos, Ciclo Hidrológico, Precipitación, Sistemas de Información, Información Geográfica, Datos Espaciales y Uso Integrado de los Recursos Hídricos.

1.2.1 Hidrología.

La Hidrología (del griego hydor-, agua) es la disciplina científica dedicada al estudio de las aguas de la Tierra, incluyendo su presencia, distribución y circulación a través del ciclo hidrológico, y las interacciones con los seres vivos. También trata de las propiedades químicas y físicas del agua en todas sus fases.

El objetivo primario de la hidrología es el estudio de las interrelaciones entre el agua y su ambiente. Ya que la hidrología se interesa principalmente en el agua localizada cerca de la superficie del suelo, se interesa particularmente en aquellos componentes del ciclo hidrológico que se presentan ahí como son: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y agua en el suelo. Los diferentes aspectos de estos fenómenos son estudiados en sus varias disciplinas. La hidrología se nutre de disciplinas como la

geología, química, edafología y fisiología vegetal, empleando muchos de sus principios y métodos. (Marcano, 2005)

1.2.2 Hidrografía.

La hidrografía involucra la descripción y la confección de mapas de los grandes cuerpos de agua, tales como lagos, mares interiores y océanos. Por el otro lado, la hidrología del suelo se centra en el agua que se encuentra en la zona saturada debajo de la superficie del suelo, y en la física suelo-agua en la zona no saturada. (Marcano, 2005)

1.2.3 Cuencas.

Una cuenca se refiere a un espacio de la tierra en donde el agua que llega hacia ella corre por un mismo río, hacia un lago o hacia el mar. Las cuencas hidrográficas son unidades geográficas de superficies variables, delimitadas topográficamente en superficie por la divisoria de aguas que drenan en una misma dirección hacia un cauce principal. (Puerta, 2004)

También se conocen las llamadas cuencas hidrológicas que son áreas mucho más grandes que una cuenca hidrográfica. Son unidades morfológicas integrales que abarcan en su contenido toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo. Puede incluir a varias cuencas hidrográficas. Las cuencas hidrográficas son utilizadas como unidades para la planificación territorial y se subdividen, a su vez, en áreas menores llamadas subcuencas y microcuencas. (Imbach, 2008)

1.2.4 Régimen hidrológico.

El régimen hidrológico no es más que una caracterización cuantitativa y cualitativa de los principales parámetros hidrológicos en sus variaciones con el tiempo de los parámetros de estudio de los sistemas hidrológicos, los cuerpos de agua, o los recursos hídricos; de conjunto o individualmente (niveles, volúmenes, tasas, caudales, etc.; vinculados a formas y cambios de almacenamiento, ingresos, o salidas de agua). Tales características siempre se refieren o enmarcan a un intervalo de tiempo (período) concreto, de mayor o menor duración; habitualmente: diario, decenal, mensual, estacional, anual, y multianual o hiperanual. (González y Gutiérrez, 1988)

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

En un río las variaciones de caudal definen el régimen hidrológico, es decir, es el modelo predominante del flujo de las aguas en un período de tiempo. Hace referencia a la duración de las épocas de inundaciones como resultado de la cantidad de agua que hay en superficie, las precipitaciones y el flujo de las aguas subterráneas.

1.2.5 Balance hídrico.

Balance cuantitativo de las aguas; es decir, el balance de tipo cuantitativo que se produce, o puede establecerse, entre ingresos y egresos de agua respecto de una unidad o sistema hidrológico, durante un intervalo de tiempo determinado. La diferencia de magnitudes entre ambos tipos de flujo produce un desbalance de agua, favorable o desfavorable, según el caso, con tendencia temporal a la acumulación o al déficit, aunque en determinados lapsos ambos tipos de flujo se equilibran y no hay cambios en los almacenamientos. Es un enfoque que se utiliza como técnica para desarrollar una evaluación hidrológica – integral de un reservorio, de una cuenca o de un territorio determinado.

1.2.6 Recursos Hídricos (RH).

Las reservas de aguas superficiales y subterráneas (incluyendo las nieves y los hielos) y los flujos acuáticos, en todos los objetos hídricos situados en un territorio dado, generalmente compuestos de agua dulce, siempre que sean aprovechables por el hombre para algún fin económico o social útil. En términos simples, son todos los tipos de aguas naturales que pueden utilizarse en la actualidad. Los RH constituyen un concepto cambiante que ha evolucionado, sujeto al desarrollo técnico y científico existente en cada momento histórico. Hoy día las aguas subterráneas medianamente profundas, parte de las aguas glaciares, parte del agua de mar, y las aguas residuales se han incorporado al concepto actual de RH, en tanto ya pueden extraerse de horizontes más profundos o depurarse, mediante modernas tecnologías, para beneficios económico-sociales. De esta manera no solamente se consideran RH las aguas limpias y de almacenamiento en reservorios, sobre todo superficiales, aunque son preferidas por sus buenas condiciones y fácil acceso, sino también otras formas de yacencia, diferentes tipos de flujo, aguas en estado sólido, y aguas residuales. (González y Gutiérrez, 1988)

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

Es decir, se utiliza este término para nombrar a los volúmenes de agua dulce contenidos en la superficie terrestre o en acuíferos subterráneos que están disponibles para su uso como agua potable, regadío, agente energético, etc. (Camacho y Ariosa, 2000)

1.2.7 Ciclo Hidrológico.

Movimiento cíclico del agua desde el mar a la atmósfera y de ahí, en forma de precipitación a la tierra, donde es colectada por las diferentes corrientes y regresa nuevamente al mar, siendo la Radiación Solar la fuente energética de todos estos procesos. (Cruz, 2005)

1.2.8 Precipitación.

Precipitación es cualquier tipo de agua que cae sobre la superficie de la Tierra. Las diferentes formas de precipitación incluyen llovizna, lluvia, nieve, granizo, agua nieve y lluvia congelada. Se define como la fase del ciclo hidrológico que da origen a las corrientes superficiales y profundas, debido a la cual su evaluación y el conocimiento de su distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, son problemas básicos de la hidrología. (Cantillo, 1994)

1.2.9 Sistemas de Información.

Se define un Sistema de Información (SI) como un conjunto de componentes interrelacionados entre sí, que reúne, procesa, almacena y distribuye información para apoyar la toma de decisiones y el control en una organización. (Kosciuk, 2004)

Los beneficios que se pueden obtener usando Sistemas de Información son:

- Acceso rápido a la información y por ende mejora en la atención a los usuarios.
- Mayor motivación en los medios para anticipar los requerimientos de las directivas.
- Generación de informes e indicadores en línea, que permiten corregir fallas difíciles de detectar y controlar con un sistema manual.
- Posibilidad de planear y generar proyectos institucionales soportados en Sistemas de Información que presentan elementos claros y sustentados.

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

- Evitar pérdida de tiempo recopilando información que ya está almacenada en bases de datos que se pueden compartir.
- Impulso a la creación de grupos de trabajo e investigación debido a la facilidad para encontrar y manipular la información.
- Soluciona el problema de falta de comunicación entre las diferentes instancias o entes a nivel directivo se hace más efectiva la comunicación.
- Organización en el manejo de archivos e información clasificada por temas de interés general y particular.
- Generación de nuevas dinámicas, utilizando medios informáticos como el correo electrónico, multimedia, tele-conferencia, acceso directo a bases de datos y redes nacionales e internacionales.
- Acceso a programas y convenios e intercambios interinstitucionales.
- Aumento de la productividad gracias a la liberación de tiempos en búsqueda y generación de información repetida.
- Enlace mundial y acceso al mundo global a través de sitios web logrando mayor competitividad y disponibilidad de los negocios en forma mundial. (Correa, Saavedra y Arévalo, 2009)

1.2.10 Información Geográfica.

Se le nombra Información Geográfica al conjunto organizado de datos espaciales georreferenciados, que mediante símbolos y códigos genera el conocimiento acerca de las condiciones físico - ambientales, de los recursos naturales y de las obras de naturaleza antrópica del territorio nacional. (INEGI, 2005)

1.2.11 Datos Espaciales.

Los datos espaciales son informaciones sobre la localización y las formas de un objeto geográfico y las relaciones entre ellos, normalmente con coordenadas y topología (Martín de Agar, 2008). Es una variable asociada a una localización en el espacio, por tanto, se refieren a entidades o fenómenos que cumplen los siguientes principios básicos:

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

- Tienen posición absoluta: Sobre un sistema de coordenadas (x, y, z).
- Tienen una posición relativa: Frente a otros elementos del paisaje (topología: incluido, adyacente, cruzado, entre otros).
- Tienen una figura geométrica que las representan (punto, línea, polígono).
- Tienen atributos que lo describen (características del elemento o fenómeno).

1.3 Objeto de Estudio.

1.3.1 Descripción General.

Como el objeto de estudio de la investigación refiere a los procesos de modelizaciones hidrológicas, es preciso reflejar un conjunto de temáticas que caracterizan todo el entorno teórico donde se incluyen. La relación que existe entre los Sistemas de Información Geográfica y estos procesos son puntos claves para la toma de decisiones a nivel de país en la temática de la evaluación de los recursos hídricos, específicamente de las precipitaciones.

1.3.2 Procesos de Modelizaciones Hidrológicas.

Los modelos hidrológicos son representaciones matemáticas simplificadas del sistema hidrológico real que tienen como objetivo estudiar el comportamiento del sistema y predecir sus salidas mediante un conjunto de ecuaciones que conectan las variables hidrológicas de entrada y salida. Se han desarrollado para suplir la falta de datos acerca de la cantidad, calidad o distribución en el tiempo del flujo de agua en cuencas o sectores de cuencas hidrográficas y para obtener un nivel de comprensión de los procesos hidrológicos inherentes, que permita pronosticar hidrogramas de salida a partir de datos climáticos (precipitación, evaporación) y de diferentes parámetros físicos de la cuenca (topografía, suelos, vegetación).

Los Procesos de Modelizaciones Hidrológicas son un conjunto de actividades o eventos que se realizan con el objetivo de crear una representación ideal o simplificada de la distribución, espacial y temporal de las propiedades del agua presentes en la atmósfera y en la corteza terrestre.

Particularmente en las cuencas estas modelizaciones permiten juntos con otras capas de información espacial determinar los parámetros de modelos. Los modelos hidrológicos pueden centralizarse en una, en varias o en todas las secuencias que integran el ciclo hidrológico.

Existe una gran cantidad de programas de simulación hidrológica, que últimamente tienden a integrar diferentes procesos que anteriormente se estudiaban por separado y a combinar la modelización hidrológica con los SIG.

1.3.3 Precipitación como variable componente de las modelizaciones hidrológicas.

1.3.3.1 Descripción.

La precipitación constituye el factor principal de ingreso de agua en el balance hídrico de una cuenca o un territorio, estas tienen un régimen de comportamiento, el cual determina en gran medida el régimen hidrológico. La fuente principal de las precipitaciones son las nubes, pero no se llegan a producir hasta que las diminutas partículas que las constituyen se acrecionan y consiguen un tamaño suficientemente grande como para vencer la fuerza ascendente de las corrientes atmosféricas.

La cantidad, frecuencia y distribución espacial y temporal de las precipitaciones es muy variable, razón por la cual ha sido objeto de intensos estudios por parte del hombre, en la determinación de los climas y en el aprovechamiento de los recursos hídricos que ofrece la naturaleza.

La intensidad de las precipitaciones varía de un lugar a otro, aunque no se encuentren a mucha distancia. A lo largo de un año también hay variaciones. Existen zonas en las que en un sólo día cae más lluvia que en otros a lo largo de todo el año.

Las causas que influyen en la distribución de precipitaciones en el planeta son la proximidad al mar, que aumenta la humedad del aire, y las corrientes ascendentes de aire, como las que obligan a realizar las cordilleras, sobre las cuales las precipitaciones son más numerosas e intensas en la ladera enfrentada a los vientos más frecuentes, o barlovento. (Cantillo, 1994)

1.3.3.2 Tipos de precipitación.

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

En general, las nubes se forman por el enfriamiento del aire por debajo de su punto de saturación. Este enfriamiento puede tener lugar por varios procesos que conducen al ascenso adiabático con el consiguiente descenso de presión y descenso de temperatura. La intensidad y cantidad de precipitación dependerán del contenido de humedad del aire y de la velocidad vertical del mismo. De estos procesos se derivan los diferentes tipos de precipitación:

- **Precipitación ciclónica:** Es la que está asociada al paso de una perturbación ciclónica, es causada por la actividad de una depresión atmosférica.
- **Precipitación convectiva:** Tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende, se enfría, se condensa y se forma la nubosidad de tipo cumuliforme, origen de las precipitaciones en forma de chubascos o tormentas. El ascenso de la masa de aire se debe, generalmente, a un mayor calentamiento en superficie.
- **Precipitación orográfica:** Es aquella que tiene su origen en el ascenso de una masa de aire, forzado por una barrera montañosa. A veces, en caso de una masa de aire inestable, el efecto orográfico no supone más que el mecanismo de disparo de la inestabilidad convectiva.
- **Precipitación advectiva:** Es aquella que tiene su origen en el ascenso de aire cálido y húmedo sobre masa de aire frío. Surge del progresivo enfriamiento, condensación y precipitación, generalmente el avance del frente de Oeste a Este.
- **Precipitación frontal:** Es aquella que puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión. La precipitación frontal se asocia a un frente frío o a un frente cálido.

En los frentes fríos el aire cálido es desplazado violentamente hacia arriba por el aire frío, dando lugar a nubosidad de gran desarrollo vertical acompañada de chubascos que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizos. La precipitación del frente frío es generalmente de tipo tormentoso, extendiéndose poco hacia delante del frente.

En los frentes cálidos el aire caliente asciende con relativa suavidad sobre la cuña fría, en general de escasa pendiente, dando lugar a una nubosidad más estratiforme que en el frente frío y, por lo tanto, a lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero de menor intensidad instantánea. (Cantillo, 1994)

1.3.4 Sistemas de Información Geográfica.

Actualmente los SIG se han consolidado como una de las herramientas más importantes del trabajo especializado en el manejo de información relacionada con disímiles niveles de agregación espacial o territorial, mucho más conocida como información espacial.

Los SIG son un conjunto de hardware, software, datos geográficos, personas y procedimientos; organizados para almacenar, actualizar, analizar y desplegar eficientemente rasgo de información referenciado geográficamente. (Ramírez, 2009)

Los SIG son sistemas computacionales en el cual se puede mapear clientes para el estudio de la demografía, en la búsqueda de patrones para analizar la forma en que se esparce una enfermedad, para la modelación del paso de la contaminación atmosférica, entre otros. Es decir es un sistema dinámico que permite seleccionar y eliminar cualquier criterio para mapear y para analizar cómo distintos factores afectan a un modelo o análisis.

De estas definiciones anteriormente planteadas existe algo en común y es que se refieren a los SIG como un sistema integrado por trabajar con información espacial, y que constituye una herramienta importante e imprescindible para el análisis y la toma de decisiones en diferentes campos de desarrollo económico, político y social.

Los SIG pueden mapear cualquier información almacenada en plantillas o bases de datos, que tenga un componente geográfico que permita ver patrones, relaciones y tendencias que no puedan verse en un formato de tablas o listas. Dan una perspectiva totalmente nueva y dinámica de la información, y ayuda a tomar mejores decisiones.

1.3.5 Relación de los Procesos de Modelizaciones Hidrológicas con los SIG.

En los últimos años se está haciendo más necesaria la utilización de modelos hidrológicos para mantener un mejor control de los recursos hídricos, debido a los cambios climáticos y a las intensas sequías que vive el mundo en estos días.

Los SIG son de vital importancia para lograr una eficiente modelización hidrológica, pues estos pueden actuar a modo de plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos.

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

El Dr. David Maidment, director del Centro de Investigación de Recursos del Agua de la Universidad de Texas en Austin ha agrupado las aplicaciones de los SIG en la hidrología de la siguiente manera:

- Evaluación e inventarios hidrológicos.
- Determinación de parámetros hidrológicos.
- Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico).
- Construcción de modelos hidrológicos integrados.

La mayoría de las aplicaciones hidrológicas llevadas a cabo en los SIG son las evaluaciones de riesgos naturales y estudios de localización.

En los estudios de localización de actividades las condiciones para la implementación son conocidas a priori. En este caso la aplicación de operadores booleanos a datos de diferentes naturaleza se ha mostrado muy eficaz para explorar con rapidez las áreas más apropiadas y las menos favorables para la instalación de una determinada actividad. Por otra parte en las evaluaciones de riesgos naturales se ejecutan operadores aritméticos algo más complejos con el objetivo de generar índices sobre la totalidad o una parte de la cuenca hidrográfica. Estos índices generalmente dan como resultado una representación aritmética y ponderada de los atributos más importantes para el estudio.

Los investigadores y científicos en hidrología encuentran cada vez más efectivo el uso de los SIG debido a su gran capacidad para gestionar datos distribuidos y referenciados en el mundo real.

Se debe tener en cuenta dos consideraciones que ayudan a entender mejor el valor que los SIG están adquiriendo en la construcción de modelos hidrológicos. La primera es la aceptación generalizada de que son una herramienta muy productiva. La segunda hace referencia a sus importantes aportaciones de cara a la percepción de los sistemas y modelos hidrológicos. Los SIG y modelos hidrológicos tienen una fuerte dependencia de los datos espaciales, por lo que resulta conveniente integrarlos en una sola herramienta.

1.3.6 Descripción actual del dominio del problema.

El archipiélago cubano está situado en el extremo norte-occidental de la gran cuenca del Mar Caribe y emerge sobre este en 109 886 km². Cuba, con sus 104 556 km², es la mayor de las islas de la región y, estando situada en las cercanías del continente de América del Norte, recibe como ninguna otra la

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

influencia del clima imperante en el mismo. Son frecuentes los frentes fríos procedentes del noroeste que afectan mayormente el occidente del país.

Las partes más anchas de Cuba se encuentran, en cambio, hacia las regiones central y oriental, lo cual les aporta ciertos rasgos de continentalidad en el clima: Allí la sequía interestival (julio y agosto) es más marcada que en el occidente. El anticiclón del Atlántico es considerado el gran dictador del clima en la isla. Cuba se encuentra en una de las zonas ciclo genéticas más importantes del mundo. La longitud de 1 250 km, entre los extremos occidental y oriental, convierten al país en blanco predilecto del azote de ciclones y de otros eventos tropicales que, formados en el océano Atlántico Sur y en el propio Mar Caribe, cruzan al país, entre los meses de junio y noviembre, provenientes de los rumbos entre sur y sudeste antes de recurvar hacia el noreste y distanciarse de la región.

El elemento que más varía en el clima de Cuba son las precipitaciones. En la mayor parte del territorio, se reconocen dos temporadas fundamentales: Lluviosa (de mayo a octubre) y poco lluviosa (de noviembre a abril). En la primera cae aproximadamente el 75% del total de lluvia anual. En el nordeste de la región oriental y en las zonas montañosas, estos por cientos cambian, debido a que durante los meses de noviembre a abril es cuando se producen los mayores totales de lluvia. Es precisamente en esa zona del país donde se localizan las áreas con mayor pluviosidad, con valores por encima de los 3 000 mm al año. En cambio, en el litoral sur de las provincias de Guantánamo y Santiago de Cuba, a sotavento de la Sierra Maestra y del Grupo Sagua-Baracoa, se reportan aproximadamente 600 mm, con condiciones de sequedad. Los mayores volúmenes de lluvia están asociados a algunos de los fenómenos meteorológicos más importantes (ciclones tropicales, frentes fríos, ondas tropicales) o tienen su origen en el calentamiento diurno, ocurriendo casi siempre en horas de la tarde en forma de episodios de corta duración. En presencia de sistemas meteorológicos de gran escala pueden producirse períodos de grandes lluvias, sobre todo en los meses de mayo-junio y de septiembre-octubre.

1.3.7 Situación Problemática.

Aunque en el mundo existe un gran número de software que se emplean en el proceso de modelizaciones hidrológicas, Cuba no puede contar con muchos de ellos por cuestiones de bloqueo o por los elevados precios de los mismos. La modelación hidrológica en el país se realiza a mano o con pequeños software

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

propietarios, lo que lo convierte en un proceso bastante complejo y deficiente, pues no existe una herramienta que permita dar una respuesta eficaz a las modelizaciones hidrológicas.

Contar con un Modelo de Datos de Información se hace cada vez más necesario, pues la hidrología tiene una serie de parámetros que son necesarios modelar, y dentro de cada parámetro existe una gran cantidad de información de cada variable. Una de las variables más importantes a modelar es la “precipitación”, que como parte del ciclo hidrológico es el componente fundamental de todo el proceso de modelización.

Para la evaluación de cada uno de los factores asociados a la precipitación son llevados a cabo numerosos procedimientos de análisis y adecuación, que incluyen cálculos estadísticos, proyecciones, estimaciones y fórmulas matemáticas complejas que tributan a la toma de decisiones.

En Cuba la entidad rectora del tema hidrológico es el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), la misma está formada por departamentos especializados en los que se fomenta la investigación, el tratamiento y el análisis de las variables hidrológicas que hoy existen. Para los especialistas del área de precipitaciones todo el trabajo asociado ocurre de manera engorrosa, provocado por la falta de sistemas automatizados que recojan la mayoría de los requerimientos de una modelización tan específica como la de la lluvia.

Los modelos son desarrollados manualmente, lo que hace probable la ocurrencia de errores, demoras en el procesamiento y por ende un proceso más complejo. Este proceso se realiza de la siguiente manera: El encargado de buscar la información puntual de la lluvia debe ir hasta el dispositivo de medida (pluviómetro, pluviógrafo y/o totalizador) para buscar la información de la misma, luego esta información se recoge y es enviada al INRH, todos los cálculos son realizados manualmente. Para la realización de estos cálculos se recoge toda la información en una hoja de cada uno de los dispositivos de medida y luego a través de una calculadora son determinados los resultados matemáticos que se desean. Una vez obtenida esta información se pasa hacia un documento de texto y se envía por correo electrónico al INRH.

1.4 Análisis de soluciones existentes.

El desarrollo de este epígrafe se centra principalmente en el análisis de soluciones existentes a nivel mundial que son utilizadas para procesos de análisis y modelizaciones hidrológicas. Haciendo énfasis en

el estudio de los procesos de modelizaciones hidrológicas y para lograr la aplicación de SIG a estos procesos, se exponen a continuación algunas propuestas de estas aplicaciones en calidad de soluciones existentes.

1.4.1 HidroSIG.

1.4.1.1 Características Generales del Software.

En general, puede decirse que HidroSIG se concibe como un conjunto de herramientas computacionales escritas en lenguaje de programación Java, las cuales se han clasificado dentro de tres categorías, básicas, especializadas y avanzadas, de acuerdo con la utilidad que puedan prestarle al usuario, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 1. 1 Esquema conceptual de HidroSIG. Tomado de (Vélez, 2007)

Se ha diseñado con una arquitectura de ventanas desacopladas, es decir, de manera tal que cada uno de los módulos y herramientas se despliegan como ventanas individuales organizadas de manera

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

preestablecida por el sistema dentro del dominio de visualización. Esto se ha hecho teniendo en cuenta que un usuario del software puede estar interactuando con muchos paquetes informáticos simultáneamente, por ejemplo hojas de cálculo, de los cuales puede obtenerse información de interés para ser incorporada en el análisis mediante HidroSIG (Ver Figura 1.2).

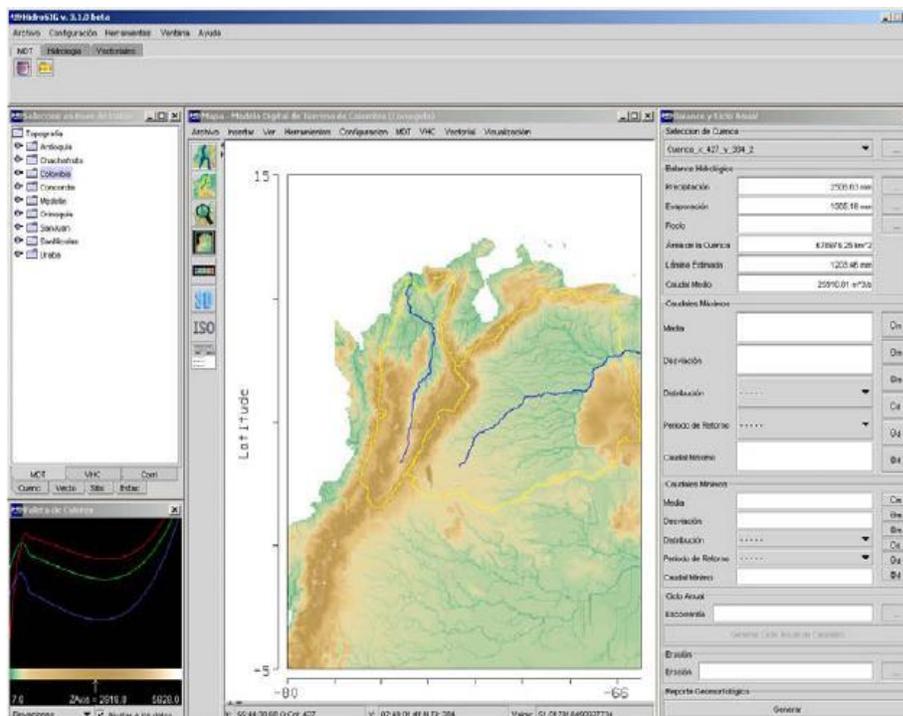


Figura 1. 2 Interfaz principal de HidroSIG. Tomado de (Vélez, 2007)

En la ventana superior se encuentran las opciones principales, módulos y herramientas disponibles en el software. En la ventana del mapa se encuentran las opciones de visualización y las herramientas avanzadas que trabajan con la información del mapa. A la izquierda se encuentra el selector de la información disponible desde la base de datos personalizada. En la parte inferior izquierda se encuentran las opciones de paletas de colores. A la derecha se encuentra la interfaz de los balances hídricos sobre cuencas. (Vélez, 2007)

1.4.1.2 Herramientas Básicas.

Las herramientas básicas comprenden las funciones existentes en la mayoría de los SIG, como las funciones de pre procesamiento de mapas, importación y exportación de formatos de datos vectoriales y ráster, georreferenciación de mapas ráster y opciones de visualización de mapas.

1.4.1.3 Herramientas Especializadas.

Este tipo de herramientas computacionales comprenden algunas funciones de manipulación y análisis vectorial y ráster, calculadora de mapas ráster, procesamiento y corrección de modelos digitales de elevación, interpolación espacial y procesamiento de imágenes.

1.4.1.4 Herramientas Avanzadas.

Este tipo de herramientas computacionales comprenden algunas funcionalidades como reporte geomorfológico, balance hidrológico, modelo hidrológico distribuido, modelo hidrológico y geotécnico para deslizamientos superficiales, modelo unidimensional para transporte de contaminantes en la red de drenaje.

1.4.2 Arc Hydro.

Arc Hydro es un modelo de datos geográficos en el cual se describen los modelos hidrológicos. Un modelo de datos es un conjunto de conceptos expresados en una estructura de datos, describe una simplificación de la realidad mediante tablas y relaciones dentro de una base de datos. El modelo de datos Arc Hydro es una conceptualización de los sistemas de agua superficial y describe algunas características tales como las redes de ríos, cuencas y canales.

Arc Hydro integra la información geoespacial y temporal en una estructura determinada, proporciona una caracterización común y la comprensión del sistema hidrológico, esta descripción puede ser utilizada por varios modelos, herramientas de análisis y sistema de apoyo a las decisiones que hacen referencia a la misma estructura común. En la siguiente figura se muestra los principales componentes del modelo.

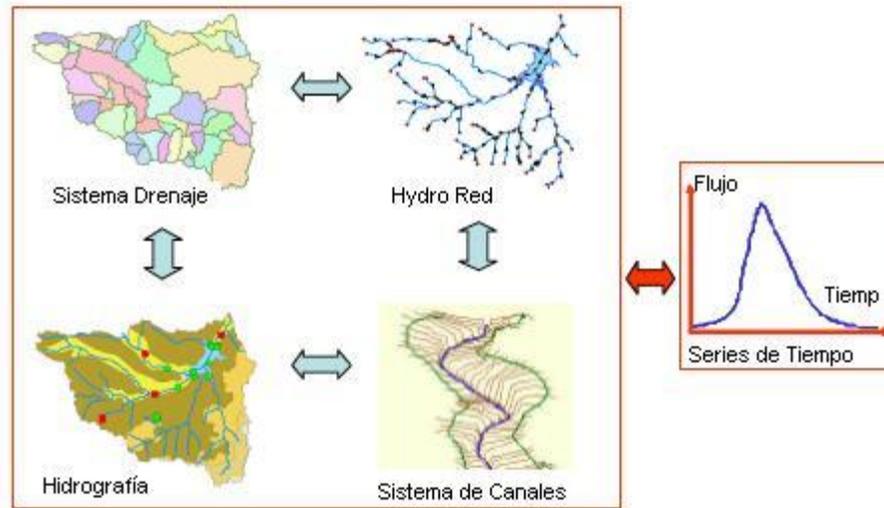


Figura 1. 3 Componentes del modelo de datos de Arc Hydro. Aguas Superficiales. Tomado de (Maidment and Strassberg, 2003).

La mayoría de las aplicaciones de los recursos hídricos de las aguas subterráneas y aguas superficiales enfocan estos elementos de manera separada. Gracias a la incorporación de un componente de las aguas subterráneas existentes en el modelo de datos de Arc Hydro, los usuarios serán capaces de representar las características de las aguas subterráneas y de superficie de manera simultánea. Esto proporcionará una descripción más completa del ciclo hidrológico y una gama más amplia de aplicaciones para los usuarios de Arc Hydro. (Maidment and Strassberg, 2003)

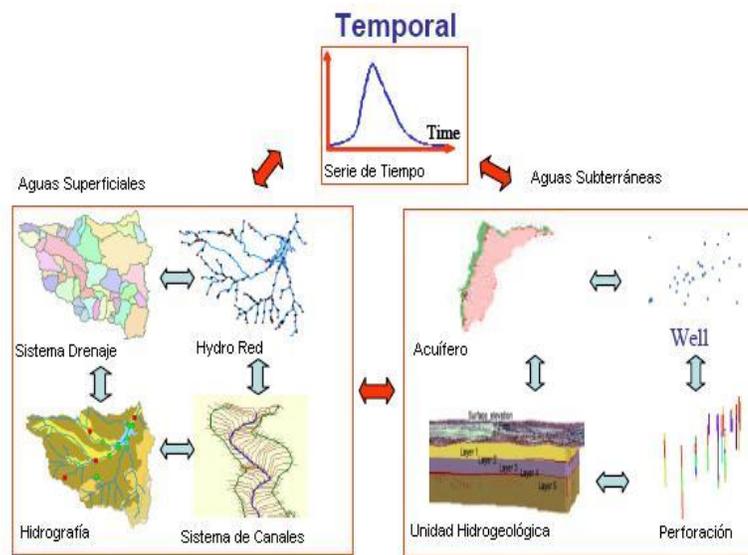


Figura 1. 4 Componentes del modelo de datos de Arc Hydro incluyendo objetos de las aguas subterráneas. Tomado de (Maidment and Strassberg, 2003).

La representación en tres dimensiones de la naturaleza del subsuelo y la descripción de la arquitectura hidrogeológica de sistemas de aguas subterráneas en un marco de SIG es un aspecto importante de este estudio. La naturaleza de tres dimensiones de los sistemas de aguas subterráneas introduce un nuevo nivel de complejidad en el diseño del Arc Hydro. Los objetos tridimensionales que actualmente existen son en forma de puntos 3D, líneas 3D y polígonos 3D.

La figura 1.5 muestra las características disponibles en Arc GIS, estas características pueden ser utilizadas para representar los objetos de las aguas subterráneas, tales como pozos, acuíferos y perforaciones en 2 y 3 dimensiones. También pueden ser almacenadas dentro de una base de datos geográficos y relacionados entre sí y con la serie de tiempo a través de las relaciones en la base de datos.

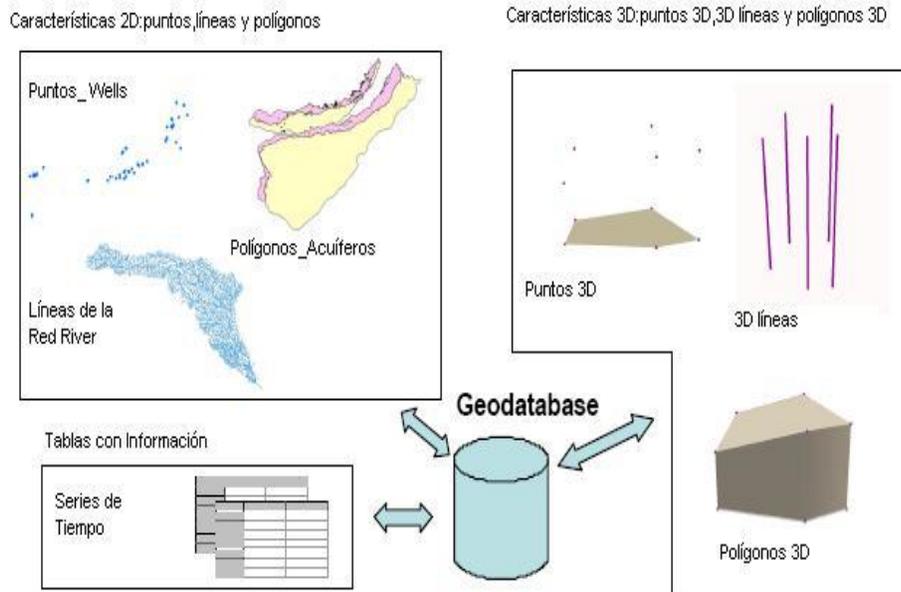


Figura 1. 5 Arc GIS características de 2 y 3 dimensiones. Tomado de (Maidment and Strassberg, 2003).

Las características mencionadas pueden proporcionar puntos de vista tridimensionales de datos, pero todavía hay una falta en la representación de sólidos y herramientas que funcionan en 3 dimensiones (por ejemplo, intersecciones y consultas tridimensionales). La caracterización tridimensional es aún posible dentro de Arc GIS utilizando las características anteriores y las relaciones dentro de la base de datos geográficas, pero le falta muchas relaciones geográficas y herramientas de análisis de las 2 dimensiones disponibles. Otras funciones inherentes a los SIG pueden contribuir a describir los sistemas de aguas subterráneas.

El modelo de datos se completa una vez que proporciona una conceptualización común del sistema de aguas subterráneas y puedan ser la base para el modelado y para sistemas de soporte de decisiones. La información puede ser extraída del modelo de datos para tareas específicas y los resultados se pueden escribir de nuevo al modelo de datos.

Un modelo de interfaz de datos es una base de datos que está diseñada para contener la información necesaria para ejecutar un modelo específico o la aplicación. Este modelo va a extraer la información necesaria del modelo de datos y construir la entrada de archivos requeridos por el modelo de simulación. Los resultados del modelo también se pueden escribir de nuevo en el modelo de

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

datos a través de la interfaz. La figura 1.6 muestra las opciones y flujo de datos entre el modelo de datos, modelos de simulación y aplicaciones personalizadas.

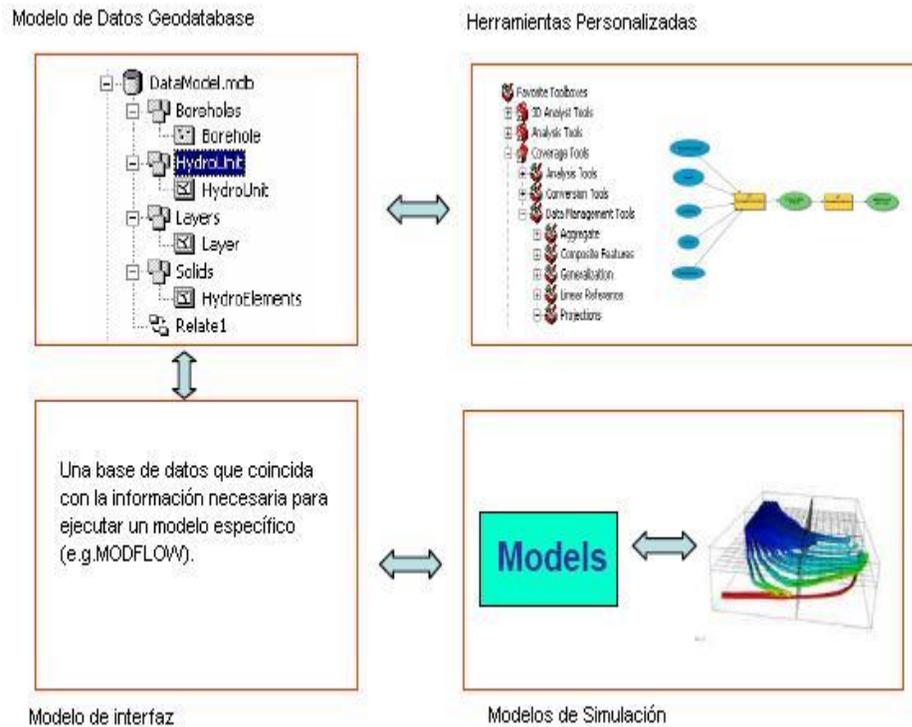


Figura 1. 6 Opciones de interfaz para extraer y escribir información desde y hacia el modelo de datos. Tomado de (Maidment and Strassberg, 2003).

La capacidad de interactuar con el modelo de datos es un aspecto importante de la integración de datos. Si los modelos básicos de datos geográficos describen el agua de la superficie y los componentes de las aguas subterráneas, y si establecen relaciones entre objetos de superficie y los modelos de agua subterránea pueden ser integrados. Los modelos de interfaz pueden para el modelo común de datos subyacentes y los resultados de una simulación ser integrados a otras simulaciones. En la figura 1.7 se ilustra este concepto, el modelo de datos proporciona una descripción de los sistemas de aguas superficiales, las aguas subterráneas y los modelos específicos pueden funcionar utilizando el modelo de estructura de datos. El modelo de datos proporciona una plataforma para el intercambio de datos y la integración entre los modelos. (Maidment and Strassberg, 2003)

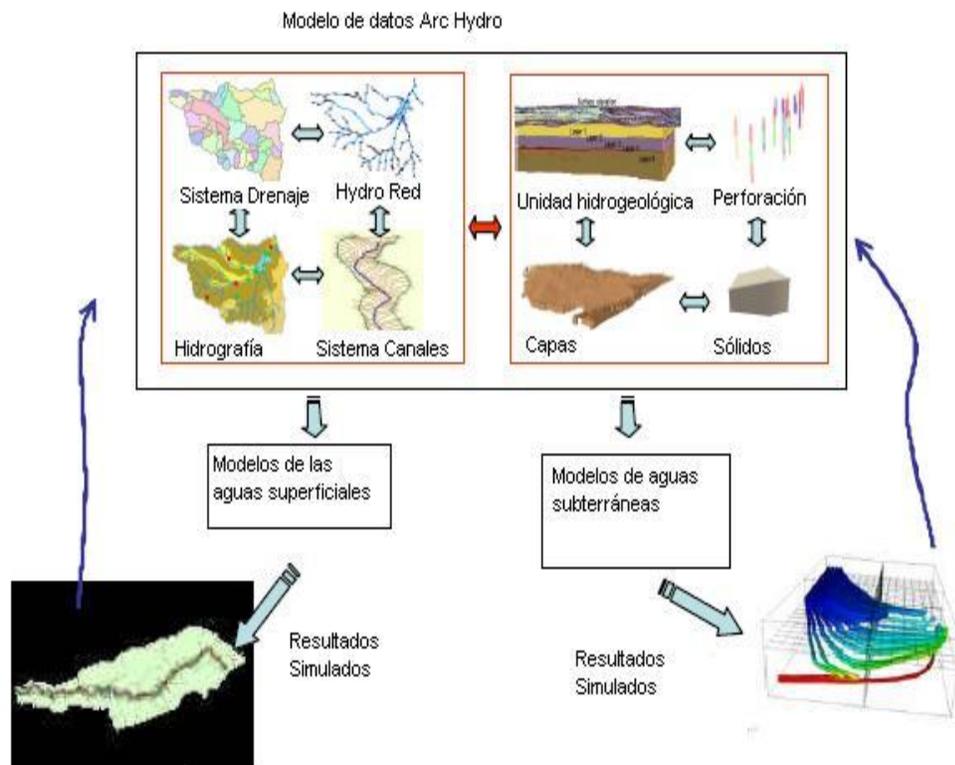


Figura 1. 7 Integración de los modelos que utilizan el modelo de estructura de datos. Tomado de (Maidment and Strassberg, 2003).

1.4.3 GIS-BALAN.

GIS-BALAN es un modelo hidrológico semi-distribuido ampliamente utilizado como herramienta para la evaluación de los recursos hídricos, que se ha acoplado a un SIG. Resuelve el balance hidrológico en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero evaluando secuencialmente las componentes.

1.4.3.1 Principales características de GIS-BALAN.

GIS-BALAN funciona sobre una plataforma SIG y permite discretizar las subcuencas en zonas más pequeñas en las que se pueden considerar parámetros constantes. Además, se ha añadido un módulo para el cálculo del tránsito superficial y se han mejorado los cálculos del balance en la zona no saturada y en el acuífero. Para su programación se ha seguido la filosofía de la programación orientada a objetos,

obteniéndose como resultado un código claro, flexible y escalable. Evalúa los componentes hidrológicos en forma secuencial y realiza balances diarios de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero. Aprovecha la plataforma SIG y permite discretizar el terreno en unidades más pequeñas que una subcuenca: las Zonas Homogéneas (ZH).

En cada ZH se supone uniformidad espacial de las características físicas, climatológicas y de uso de suelo. Se supone entonces único tipo y uso de suelo, pendiente, régimen de cultivo, riego, y también precipitación y evapotranspiración homogéneas. El balance de agua se calcula en cada ZH y la agregación de caudales para el tránsito superficial se hace en cada subcuenca. (Samper, 2007)

1.4.4 ILWIS.

1.4.4.1 Qué es ILWIS.

Sistema Integrado de Información de Tierra y Agua (ILWIS en su acrónimo en inglés (Integrated Land and Water Information System)) es una integración de SIG y herramientas para el procesamiento y análisis de productos generados por sensores remotos. Diseñado originalmente en 1985 para un proyecto de zonificación de uso del suelo y manejo de cuencas por el Instituto Internacional de Estudios Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC) de Enschede, Holanda.

ILWIS es un paquete completo que comprende procesamiento de imágenes, análisis espacial y mapeo digital, es fácil de aprender y de utilizar. (Giron, 2008)

1.4.4.2 Principales características.

- Diseño Integrado Ráster y Vector.
- Importa y Exporta un amplio rango de formatos usados.
- Captura de datos por pantalla y mesa digitalizadora.
- Conjunto de herramientas de procesamiento de imágenes.
- Ortofotos, georreferenciación, transformación y mosaicos de imágenes.
- Modelamiento avanzado y análisis espacial de datos.

CAPÍTULO I: Fundamentación Teórica

- Visualización 3D con edición interactiva para hallar vistas óptimas.
- Amplia librería de Proyecciones y Sistemas de Coordenadas.
- Análisis Geo-estadístico.
- Producción y visualización de pares de imágenes estereoscópicas.
- Evaluación espacial multi-criterio.
- Procesamiento Hidrológico.

Se basa en una arquitectura de microcomputadoras AT con coprocesador matemático, procesador de imágenes y monitor de alta resolución. Incluye conversiones vectoriales-matriciales, trabajos con matrices y otras aplicaciones de interés, como un modelo de digitalización de alto nivel. Sus aplicaciones se han producido en mapas de erosión, facilidades de cultivos y otros. (Giron, 2008)

1.4.5 AGWA.

El Sistema Automatizado de Evaluación de Cuencas Geoespacial (AGWA) es un conjunto de herramientas que trabajan en el entorno del SIG ArcView 3.x, que puede llevar a cabo las evaluaciones de modelos hidrológicos y de cuencas hidrográficas en el momento de múltiples escalas espaciales y temporales. Utiliza un conjunto de datos espaciales normalizados que se pueden obtener a través de Internet.

Permite la extracción automática de parámetros y la generación de los archivos de entrada a dos modelos: Kinos2 y Swat (modelos de simulación de escurrimiento en cuenca y pérdidas por erosión respectivamente), la ejecución de estos modelos en segundo plano y la recuperación de los resultados con la visualización en el ambiente SIG.

Los resultados de las simulaciones múltiples pueden ser diferenciados por AGWA para evaluar y mostrar el cambio relativo en una variedad de escenarios de entrada, como por ejemplo cambio climático, cambio de la cubierta, las condiciones actuales y futuras alternativas. (Burns, 2004)

1.4.5.1 Características principales.

- Capacidad de utilizar los suelos de la FAO (Organización por la Alimentación y la Agricultura de Naciones Unidas) para permitir una aplicación más internacional.
- Capacidad de utilizar en alta resolución la base de datos SSURGO (Base de Datos Geográfica del Levantamiento de Suelos (USA)).
- La capacidad de los usuarios de insertar tiras de amortiguamiento adyacentes a los canales de flujo.
- Multi-delimitación y discretización de todas cuencas hidrográficas dentro de una frontera política.
- La posibilidad de comparar rápidamente el fuego después de comprobar la validez de las simulaciones de incendio.

El Programa AGWA requiere de la extensión Análisis Espacial para el manejo de estructuras de datos ráster (mallas grilladas). Tiene herramientas para la extracción de parámetros fisiográficos a partir del MDE, de extracción de parámetros provenientes de mapas temáticos de tipo y cobertura de suelos, y para el tratamiento espacial de las precipitaciones. (Burns, 2004)

1.4.6 Observaciones del estudio de las soluciones existentes.

A través del estudio de estas soluciones existentes se ha podido observar que las mismas presentan las funcionalidades básicas para cumplir con la necesidad anteriormente planteada. Aunque estas soluciones constituyen plataformas altamente calificadas en los procesos de modelizaciones hidrológicas, no constituyen la solución directa al problema científico planteado en la introducción de este trabajo investigativo, pues no presentan en su conjunto, de manera integrada todas las funcionalidades que son necesarias para aplicar los Sistemas de Información Geográfica en procesos de modelizaciones hidrológicas para la evaluación de la variable precipitación.

Se hace necesario construir un modelo que contemple las funcionalidades de los SIG que pueden ser aplicados en la modelación de las distintas variables del ciclo hidrológico y de manera específica a la modelización de la precipitación, de manera tal que se logre construir un producto eficaz, ventajoso y cómodo para los futuros usuarios. Tanto Arc Hydro, HydroSIG, GIS-BALAN, ILWIS y AGWA servirán como

guía para la construcción de este modelo, pues el estudio de estos software arrojó varias funcionalidades interesantes que pueden ser utilizadas como guía de apoyo para lograr el objetivo planteado en el presente trabajo investigativo.

1.5 Conclusiones parciales.

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una importante herramienta para la toma de decisiones pues permiten analizar, manejar, consultar y representar datos georreferenciados. La necesidad de aplicar SIG en la modelización hidrológica ha conducido a la elaboración del capítulo que acaba de ser presentado, en el cual se abordaron los conceptos básicos para un mejor entendimiento de la investigación y un conjunto de elementos que la caracteriza.

El estudio del marco conceptual que rodea el objeto de estudio ha permitido lograr un conocimiento general de la situación actual en cuanto al desarrollo de la aplicación de SIG en procesos de modelizaciones hidrológicas, haciendo énfasis en las precipitaciones como uno de los componentes esenciales del ciclo hidrológico. Además se analizaron varias soluciones existentes que realizan modelizaciones hidrológicas, las cuales no constituyen la solución al problema planteado porque no manejan a la precipitación como variable para la modelización hidrológica. Por todo ello se puede llegar a la conclusión que para lograr una eficiente evaluación, estudio y planificación de los recursos hídricos en el INRH es indispensable el uso de SIG que brinden las funcionalidades necesarias para ello.

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

2.1 Introducción.

Para construir un software en el tiempo planificado, seguro, efectivo y con los precios establecidos, es necesario trabajar de forma organizada, donde se documente y controle todo lo relacionado con el proyecto en cuestión y puedan disminuir y/o eliminar los riesgos que puedan presentarse en el desarrollo del mismo, es necesario el empleo de una metodología eficaz que se adapte a la características propias del software que se esté desarrollando.

En el transcurso de este capítulo se realiza una descripción de las metodologías para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica, así como los lineamientos para la conceptualización de modelos que traten la variable precipitación.

2.2 Metodologías para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica.

Las Metodologías para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica tienen diversos objetivos los cuales se muestran a continuación. (Sánchez, 2007)

- Lograr minimizar el impacto organizacional que implica la implantación de SIG en cualquier institución.
- Permitir establecer un balance entre eficiencia y efectividad para obtener un SIG eficaz.
- Facilitar la oportuna toma de decisiones mediante la obtención de información de alta calidad para reducir la incertidumbre.

Metodología General para la Implantación de SIG.

Esta metodología contempla a la implantación de un SIG como un proceso evolutivo. Es importante tener en cuenta que este proceso implica un período largo de tiempo, en el cual constantemente se incorporan

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

nuevos requerimientos tecnológicos y de información. Es por ello que esta metodología persigue brindarle un enfoque evolutivo e incremental al proceso de implantación de un SIG.

- **Divulgación al Personal.**

En esta fase se decide dar conocimiento a todo el personal de la organización a través de charlas, conferencias, seminarios y talleres que se implantará un SIG, dando a conocer sus potencialidades y beneficios para lograr la aceptación de todo el personal.

- **Formación/Educación.**

En esta fase ya la organización ha decidido implantar un SIG por lo que se hace necesario formar y educar al personal para lograr una implantación exitosa del Sistema de Información Geográfica.

- **Análisis de las Necesidades de Información.**

En esta fase el Grupo de Desarrollo SIG debe identificar cuáles son las necesidades de información existentes en función de los objetivos y el modelo de negocio de la organización, cuáles son las actividades y procesos que se desean eliminar o mejorar considerando los beneficios potenciales y definir las estrategias que debe seguir para el proceso de implantación.

- **Definición del alcance SIG.**

En esta fase el objetivo fundamental es establecer de manera muy clara de cuál sería el alcance del sistema. Debe concebirse el SIG bajo una visión que responda a las mejoras y potencialidades para facilitar y optimizar la toma de decisiones, la cual es generalmente la principal necesidad de información. Del alcance del SIG depende fundamentalmente el diseño y cumplimiento del plan de actividades que contempla el proceso de implantación, por lo que debe realizarse un análisis exhaustivo del dimensionamiento y equilibrio entre tiempo y recursos.

- **Conversión de Datos.**

El proceso de conversión de datos constituye la etapa más costosa de SIG, pues es una necesidad trabajar con datos digitales compatibles con el sistema. Se recomienda tratarlos por separado: datos gráficos y datos atributivos, los cuales posteriormente se integrarán mediante los programas y aplicaciones del sistema. Las fuentes en su mayoría son analógicas y están constituidas por mapas,

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

imágenes, fotografías, planos, documentos, tablas y gráficos entre otras. Asimismo, deben seleccionarse las fuentes más confiables en cuanto a calidad de la información, actualización, precisión, y escalas de representación.

- **Carga de Datos.**

Esta fase consiste en la incorporación al sistema en formato digital de los datos gráficos y atributos al sistema. Es recomendable en esta fase establecer los procedimientos de revisión y control de calidad de manera permanente para garantizar la calidad de la información que suministrará el SIG.

- **Evaluación y Selección Tecnológica.**

En esta fase es necesario diseñar un documento basado en evaluaciones tecnológicas sobre la plataforma del sistema en cuanto a hardware y software, seleccionando por supuesto la que satisfaga las necesidades de información, y cumpla con los criterios establecidos de evaluación tecnológica. Debe considerarse como tecnologías candidatas las libres pues en Cuba la comercialización de software mayoritariamente se realiza a través de los software libres.

- **Adquisición e Instalación de la Plataforma Tecnológica.**

En esta fase es necesario adquirir una plataforma de hardware y software que sustente el Sistema de Información Geográfica. Para esto es recomendable adquirir la tecnología más reciente para el momento en función de la obsolescencia computacional, las actualizaciones de versiones de software y el "performance" o rendimiento del sistema y su ciclo de vida.

- **Diseño Conceptual y Lógico de la Base de Datos.**

Esta fase consiste en modelar cuál será la realidad operacional del SIG de acuerdo a la consideración e implementación de todos los requerimientos de los usuarios y la previa definición de objetivos y metas que determinan la calidad mínima tolerable, frecuencia, horizonte temporal y escalas. En ese sentido, se pueden emplear las técnicas de modelaje de base de datos para sistemas de información, específicamente las del enfoque relacional, las cuales se adaptan muy bien a las funcionalidades y necesidades del SIG.

- **Diseño Físico de la Base de Datos.**

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

Consiste fundamentalmente en expresar en tablas el modelo lógico de datos, contemplando por supuesto todos los aspectos directivos de diseño, tales como claves primarias y foráneas para relacionar las tablas entre sí y con las tablas gráficas, nombre y tamaño de los campos, usuarios, entre otros. Para el desarrollo de esta fase el grupo SIG debe recibir el entrenamiento en la herramienta utilizada como manejador de la base de datos, para construir las tablas respectivas.

- **Desarrollo de Programas y Aplicaciones.**

En esta fase se estructuran todos los módulos de aplicaciones que van a interactuar con los usuarios del SIG, tales como consultas, reportes, análisis, impresión mapas, diseño de gráficos; dichos módulos deben ser bastante amigables al usuario, así como también deben proveer la información precisa y necesaria para facilitar la toma de decisiones.

- **Pruebas del SIG.**

En esta fase se prueba el funcionamiento del sistema, su propósito fundamental es verificar y ajustar el modelo realizado con la realidad organizacional. Las pruebas realizadas del SIG permiten incorporar mejoras y nuevos requerimientos para de esa manera se garantiza la optimización del sistema y se incrementa la productividad organizacional.

- **Implantación del SIG.**

Esta fase consolida la instalación y puesta en marcha del SIG y el inicio de la operación del sistema por parte de los usuarios de la organización. Se puede evaluar si la metodología empleada logró implantar un SIG sistémico y con un grado de impacto organizacional mínimo.

2.3 Lineamientos para la conceptualización de procesos de modelizaciones hidrológicas.

Para llevar a cabo la conceptualización de sistemas de modelizaciones hidrológicas es necesario contar con una serie de fuentes de información cartográfica y de otros tipos de datos espaciales referidos a distintas variables medioambientales, que se utilizan en el tratamiento de datos SIG y de aplicación en el desarrollo de modelos hidrológicos.

Los SIG pueden ayudar al diseño, calibración, modificación y comparación de los modelos hidrológicos, según Goodchild (1993) estos últimos deben proporcionar a la modelación hidrológica lo siguiente:

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

- 1- Herramientas eficientes de datos de entrada.
- 2- Utilización de modelos de datos alternativos (ráster o vectorial).
- 3- Capacidad de calcular relaciones entre objetos basadas en su geometría y atributos.
- 4- Capacidad para realizar operaciones geométricas estándar.
- 5- Capacidad de generar nuevos objetos.
- 6- Capacidad para asignar nuevos atributos a objetos basados en atributos existentes y en reglas aritméticas y lógicas complejas.
- 7- Soporte para la transferencia de datos de paquetes estadísticos y de modelización.

La mayor aplicación de SIG en Hidrología ha sido el campo de la modelización de cuencas, esto es comprensible ya que los modelos informáticos de hidrología de cuencas están compuestos de muchos datos y los SIG son la tecnología idónea para procesar grandes volúmenes de datos. (Martínez y Alonso, 2005)

Para la conceptualización de sistemas de modelizaciones hidrológicas es necesaria la utilización de la siguiente metodología:

- **Necesidad del estudio hidrológico.**

En esta etapa inicial se determina la necesidad e importancia de la realización de estudios hidrológicos en una zona determinada. Es necesario conocer todos los objetivos hídricos del área de estudio, la necesidad de predecir los riesgos de inundación, la calidad del agua, la evaluación de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico y todos los conceptos asociados, además de plasmar la importancia de la realización del estudio en la zona seleccionada.

- **Caracterización geográfica.**

Esta etapa permite conocer las características físico-geográficas del área de estudio, a partir del análisis de la información básica disponible. Se analiza el comportamiento de los componentes naturales del medio geográfico, para ello es necesario contar con una serie de fuentes de información cartográfica y de otro tipo de datos espaciales referidos a distintas variables medioambientales. Además se representa el

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

efecto de todos los factores físicos que la caracterizan como localización, extensión, geología, relieve, hidrografía, suelo, clima, flora y fauna.

- **Caracterización hidrológica.**

La caracterización hidrológica permite obtener un conocimiento cuantitativo de las variables ambientales del área de estudio. En esta fase se determinan, a partir de métodos matemático-estadísticos propios de estudios hidrológicos, las características morfológicas y morfométricas del objeto de estudio. Se realiza el análisis hidrológico a partir de los resultados de la medición de las variables que intervienen en el balance hídrico. Se calcula el volumen promedio precipitado del tiempo que se especifica, los coeficientes de escurrimiento y los volúmenes y usos del agua subterránea.

- **Modelización Hidrológica.**

En esta fase se construye el modelo hidrológico a partir del comportamiento de las variables hidrológicas de entrada y salida. Se pronostican hidrogramas de salida a partir de los datos climáticos (precipitación, evaporación) y parámetros físicos (topografía, suelos, vegetación) establecidos en la etapa anterior. La modelización hidrológica es el resultado del análisis de las fases anteriores, que deben haber sido desarrolladas con éxito y sin violar pasos, pues toda la información adquirida es necesaria para obtener un modelo eficiente y de calidad.

2.4 Precipitación como variable del ciclo hidrológico.

En la construcción de los modelos hidrológicos de una zona dada es necesario tener en consideración el comportamiento de cada uno de los parámetros que componen el balance hídrico, especialmente, el comportamiento de la variable precipitación por su influencia directa en el comportamiento del resto de las variables del balance.

Algunos de los problemas que pueden predecirse a partir de los procesos de modelizaciones hidrológicas de precipitaciones son:

- 1. Las alteraciones en el comportamiento hidrológico frente a acciones naturales y antrópicas, dadas por:**

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

- Los cambios en los patrones de comportamiento de las precipitaciones, que en el caso de Cuba es su principal fuente renovable anual del recurso agua.
- Las modificaciones en la dinámica de la relación hidráulica de los acuíferos costeros con el mar.
- La disminución relativa de las disponibilidades de agua, tanto superficial como subterránea.
- La aparición paulatina de zonas con carencias relativas del recurso agua.
- La ocurrencia de cambios en la aparición de desastres causados por fenómenos naturales.
- Los cambios complejos en la dinámica de las relaciones de los principales componentes ambientales (agua, suelo, bosques, agua costeras) en los ecosistemas de mayor interés (cuencas hidrográficas, zonas montañosas, bahías, humedales, zonas costeras) con la ocurrencia de modificaciones en su estructura y característica.
- Las modificaciones en la actual infraestructura de prevención y protección hidrológica ante eventos de intensas precipitaciones.

2. El impacto que produciría un incremento generalizado del riego en los procesos hidrológicos y su vulnerabilidad frente a procesos de contaminación, dado por:

- La incidencia de las variaciones de las disponibilidades de agua, en las condiciones sanitarias y el cuadro epidemiológico general y específico, como resultado de bajas disponibilidades de agua y problemas con su calidad.
- El agravamiento de las condiciones sanitarias de las corrientes superficiales que atraviesan núcleos urbano-industriales.
- La disminución de fuentes de agua de calidad para el riego debido su uso irracional.
- El aumento de la salinidad de los recursos hídricos y uso competitivo del mismo para otros fines.

3. El comportamiento a largo plazo de los flujos superficiales y subterráneos y su almacenamiento, dado por:

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

- La decadencia de los mecanismos para ejercer el control de amenazas por inundación, contaminación y aprovechamiento de aguas subterráneas y superficiales.
- La inexistencia de procesos sistémicos para la evaluación del almacenamiento de los flujos.

2.5 Elementos para la modelización de precipitaciones.

Para la temática de precipitaciones, las modelizaciones hidrológicas disponen de variables y parámetros estándares que deben tenerse en cuenta en cada etapa del proceso. Algunos de estos se describen a continuación:

Lámina o acumulado: Altura del agua producto de la precipitación caída.

Duración (D): Tiempo que transcurre desde el inicio hasta el final de la precipitación. Se puede expresar en segundos, minutos y horas.

Frecuencia (F): Cantidad de veces que tiene lugar la precipitación. Se expresa de forma acumulativa.

Probabilidad (P): La probabilidad de precipitación se refiere al día pluviométrico en conjunto, es decir, es la probabilidad de que se produzca cualquier cantidad de precipitación entre las 8 UTC (hora solar) de un día y las 8 UTC del día siguiente. Se considera en función de la probabilidad de la precipitación que:

- Cuando la probabilidad es inferior al 10%, no se esperan precipitaciones.
- Cuando la probabilidad de precipitación está comprendida entre el 10% y el 40%, se considera que existe posibilidad de precipitaciones.
- Cuando la probabilidad está comprendida entre el 40% y el 70% se considera probable la ocurrencia de precipitaciones.
- Si la probabilidad de precipitación es superior al 70%, puede considerarse con un alto grado de confianza su ocurrencia, dependiendo este grado de confianza del valor de la probabilidad.

Precipitación Media: Es el cociente de dividir el volumen total de agua generado por la lluvia durante cierto intervalo de tiempo entre el área de la cuenca. Para ello se utilizan varios métodos dentro de los que se encuentran el promedio aritmético, el método de isoyetas y polígonos de Thiessen.

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

Intensidad de la precipitación: La intensidad de la precipitación suele medirse en milímetros por hora, es decir, precipitación por unidad de tiempo. Cuando se trata de precipitaciones muy intensas se pueden medir en milímetros por minuto.

2.6. Objetivos hidrográficos de precipitaciones.

Los datos e información de los objetivos hidrográficos de las precipitaciones se registran y obtienen en cada uno de los distintos objetivos, distribuidos a lo largo y ancho de todo el país, ubicadas en las distintas provincias. Estos recogen información indispensable para las modelizaciones hidrológicas, principalmente para las modelizaciones de las precipitaciones.

Estaciones: Representado en las cartografías base: Código de la estación, tipo de estación, nombre, fecha de establecimiento, elevación, permeabilidad, capacidad de almacenamiento de agua y la precipitación acumulada. Estas estaciones a su vez pueden ser cualquier dispositivo de medición como pluviómetros, pluviógrafos y totalizadores. Podemos encontrarlas a lo largo y ancho de todo el país para llevar un control de los datos hidrológicos de la isla.

- **Pluviómetros:** Representación de cada estación pluviométrica existente en el país. Estos pluviómetros son instrumentos que miden la cantidad de agua precipitada en una zona determinada.
- **Pluviógrafos:** Representación de cada pluviógrafo existentes en la isla. Estos son instrumentos para registrar distribuciones de lluvia en el tiempo en un determinado lugar. Con los pluviógrafos se conoce la cantidad de lluvia a través del tiempo y también su intensidad.
- **Totalizadores:** Representación de cada totalizador existente en el país. Estos instrumentos obtienen una sola medida de la precipitación total caída en un punto durante un largo período (un año hidrológico, un verano, un período de lluvias). Son ubicados en regiones apartadas, donde el servicio frecuente es complicado con el objetivo de almacenar la información de la lluvia precipitada.

Cuerpos de agua: Representación de ríos, presa, embalses, lagunas, lago, mar y océanos que reciben directamente los efectos de las precipitaciones.

CAPÍTULO 2: Conceptualización de Sistemas de Información Geográfica para la modelización de precipitaciones.

Distribución espacial de las precipitaciones: Representación de la precipitación diaria, mensual y anual, la precipitación media de un área determinada, mapas isoyético para representar la variabilidad de las precipitaciones.

Cuenca superficial: Representación de las cuencas superficiales de la isla.

Región natural: Representación de todas las regiones definidas a partir de características físico-geográficas y/o hidrológicas.

2.8 Conclusiones parciales.

En el capítulo que acaba de ser presentado se abordaron las metodologías para el desarrollo de SIG, las cuales constituyen la base para una eficiente implantación de los mismos. Además fueron presentados los principales lineamientos para la conceptualización de procesos de modelizaciones hidrológicas y precipitaciones, de los que se puede decir que establecen la línea base para el modelado hidrológico de una región determinada y tomar decisiones sobre ella. También fueron presentados los elementos principales de las modelizaciones de las precipitaciones y los objetivos hidrográficos de las mismas así como las etapas para su modelización en SIG.

A partir del análisis realizado de todos los aspectos abordados, se puede llegar a la conclusión que las modelizaciones de la precipitación es una de las actividades más importantes para lograr eficientes modelizaciones hidrológicas. Dentro de estas modelizaciones se hace indispensable el uso de SIG pues es una de las vías más óptimas para realizarlas con calidad. Además todo ello contribuye a lograr evaluar los recursos hídricos de manera eficiente en el país y facilitar el trabajo que se lleva a cabo en la actualidad.

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo.

3.1 Introducción.

La creación de un modelo es una parte esencial de toda actividad científica, pues estos brindan los conocimientos necesarios para lograr un objetivo determinado. Un ejemplo de ello es la modelación cartográfica que en su forma más simple, es una manera genérica de expresar y organizar los métodos por los cuales las variables y operaciones espaciales son seleccionadas y usadas para desarrollar un modelo SIG. De manera general para lograr una eficiente evaluación de la geografía y específicamente de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico se hace necesaria la utilización de modelos para cada una de ellas.

En el transcurso de este capítulo se realiza la creación y descripción del modelo que soluciona el problema científico planteado para la presente investigación. Además se especifican las técnicas y herramientas que le darán soporte así como la evaluación de la misma por parte de los expertos.

3.2 Descripción del modelo.

Un modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en Sistemas de Información Geográfica se establece con el objetivo de controlar y evaluar de manera eficiente las diferentes variables que intervienen en el ciclo hidrológico. En este ciclo intervienen un gran número de variables, pero básicamente el modelo en cuestión se basa en “las precipitaciones” y dentro de estas se centra específicamente en la precipitación líquida.

3.2.1 Variables del modelo.

Los modelos en general constan de variables que permiten su verificación, como por ejemplo los modelos matemáticos, físicos y químicos, es por ello que este modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG también está compuesto por distintas variables las cuales se definen a continuación.

3.2.1.1 Reusabilidad.

Esta variable hace referencia a poder volver a usar parte de un software en otro proyecto. La reusabilidad es muy importante pues permite usar características estándares de un lenguaje en otro programa, no depende del hardware y su implementación es simple. Cuando un software es reusable garantiza en cualquier entorno de trabajo la disminución de tiempo y esfuerzo en la construcción de un nuevo producto derivado del mismo.

3.2.1.2 Esfuerzo.

Esta variable se refiere al empeño y a la energía que surge en los trabajadores de una empresa u organización a la hora de realizar una tarea determinada. El esfuerzo, muchas veces, depende de las características y desarrollo tecnológico con el que se cuente en el centro de trabajo. Cuando se tiene un gran desarrollo en las tecnologías y las comunicaciones, es un hecho que el esfuerzo disminuye y aumenta la eficacia y rapidez.

3.2.1.3 Fiabilidad.

Esta variable define la probabilidad de que un programa realice su objetivo satisfactoriamente (sin fallos) en un determinado período de tiempo y en un entorno concreto. El punto de partida de la fiabilidad es lograr que el sistema no tenga fallos y si los tiene que sean mínimos. Cuando un software es fiable se puede garantizar su eficacia y aceptación pues de esta manera produce beneficios económicos y sociales.

Cuando la fiabilidad de un sistema es insuficiente se reduce la disponibilidad y aumenta la necesidad de mantenimiento, es por ello que para alcanzar suficiente fiabilidad se debe:

- Evitar los fallos.
- Detectar los errores.
- Corregir el fallo.
- Localizar los daños y remediarlos.

3.2.1.4 Escalabilidad.

Esta variable se refiere en un sistema a la capacidad de crecer y adaptarse a nuevos requisitos. Es necesario que el sistema sea escalable pues de esa manera permite agregar nuevas funcionalidades para lograr un sistema completo, según las necesidades del usuario. La escalabilidad debe formar parte del proceso de diseño porque no es una característica separada que se pueda agregar después, las decisiones que se tomen durante las primeras fases de diseño y codificación determinarán en gran medida la escalabilidad de la aplicación.

3.3 Descripción de las actividades del modelo.

El modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG está compuesto por varias actividades, las cuales tributan a alcanzar el objetivo de dicho modelo. Estas actividades se describen a continuación.

3.3.1 Creación de las bases cartográficas.

En este paso se identifican las capas cartográficas o grupos de datos espaciales requeridos. Consiste en la confección o recopilación de toda la información temática referida al área de estudio seleccionada y que intervienen directamente en el comportamiento de las variables hidrológicas. Para la creación de las bases cartográficas se consideran como fuentes las que a continuación se relacionan:

- Las estadísticas.
- Las encuestas y descripciones literarias.
- Las imágenes.
- Otros mapas.

Para los fines de la investigación y con el propósito de lograr de manera eficiente la interpretación de los resultados del modelo, es necesario contar con las capas temáticas de los principales componentes naturales del medio físico-geográfico, dígame geología, relieve, suelo y vegetación. En ocasiones el proceso de obtención de estas capas temáticas se dificulta debido a que la dispersión de la cartografía

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

temática es muy superior a la de la básica, por estas razones es necesario recurrir a los organismos o empresas implicadas en el tema de estudio y en otros casos es elaborada por el propio investigador.

A pesar de las ventajas que representan obtener la cartografía previamente elaborada se pueden presentar problemas, tales como que, la cartografía no se encuentra en formato digital, y en los casos en los que sí se encuentra suele haber problemas de actualización, formatos y/o calidad.

En el primer caso se procede a la entrada de datos al SIG. Es el conjunto de operaciones para convertir la información analógica de la realidad, (ya sea la observada directamente en el campo o la disponible en forma de cartografía al formato digital concreto de cada programa informático. (Bosque, 1992)

La entrada de datos a un SIG vectorial puede ser realizada de forma directa en el terreno mediante el empleo de receptores GPS (Sistema de Posicionamiento Global), mediante la vectorización de fuentes secundaria en formato analógico a partir del empleo de la tabla digitalizadora y mediante el empleo de otras fuentes en formato digital.

Por otra parte la entrada de datos a un SIG ráster puede ser, de acuerdo con la fuente empleada, digital o analógica. La fuente digital básicamente proviene de sensores remotos como satélites que de forma digital registran la información correspondiente a sectores de la superficie terrestre para distintos rangos del espectro electromagnético. Esta información se recoge en formato "ráster" y por tanto es fácilmente utilizable en un SIG de este tipo. Cuando se dispone de información en formato analógico, entonces, se realiza la conversión a formato digital, a través de los dispositivos de entrada al SIG (en este caso escáner). El escaneo es el proceso mediante el cual se convierten a formato digital datos analógicos mediante escáneres.

Otro de los procesos principales para garantizar la calidad del resto del trabajo es la georreferenciación (corrección geométrica). Mediante la misma se referencia a la superficie terrestre una imagen ráster o cualquier otra representación vectorial del terreno, o lo que en este caso es lo mismo, la transferencia del sistema de coordenadas del mapa topográfico a la imagen escaneada.

Esta operación puede ser realizada con ayuda de un SIG de la siguiente forma:

- Se carga la imagen correspondiente (generalmente en formato .JPEG).

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

- Se ubican cuatro puntos de control o más puntos en las intersecciones de cuadrículas más cercanas a los bordes de la hoja o puntos de referencia bien definidos en caso de que la red no esté densificada.
- Transferencia de los niveles digitales a la nueva posición.
- Se guarda la imagen georreferenciada.

Una vez georreferenciada la imagen se procede a su digitalización. Este es el proceso mediante el cual se van convirtiendo en vectores (puntos, líneas y áreas) cada uno de los elementos del terreno representados sobre una imagen ráster. La digitalización se realiza de varias formas: la automática, la semiautomática y la manual. La forma más empleada es la digitalización manual. Esta se realiza dibujando directamente sobre la imagen cada uno de los objetos del terreno, teniendo en cuenta los símbolos convencionales establecidos. La misma se aplica a todas las temáticas del mapa.

La digitalización automática se realiza a partir de un proceso de digitalización vectorial o vectorización sobre una imagen binaria o sea una imagen en la que los píxeles a sectorizar tienen valor de uno y el resto tiene valor de cero. La digitalización semiautomática es donde se graba automáticamente mientras se hace un seguimiento manual de las líneas.

Al concluir este proceso se obtiene una base cartográfica digital organizada por capas según el contenido del mapa, con una representación del terreno mediante líneas, puntos y áreas.

En caso de que esta base cartográfica haya sido obtenida en formato digital pero con problemas de actualización, formatos y/o calidad se realiza la corrección y edición de la misma. La corrección es el proceso mediante el cual se eliminan errores de digitalización de la información temática; mientras que la edición consiste en la preparación de los resultados (preliminares y/o finales) de cada uno de los procesos realizados en un formato ráster o vectorial cartográfico y mediante esta se garantiza que la información descriptora que se encuentra almacenada en Bases de Datos se muestre de forma gráfica, facilitando la interpretación del fenómeno representado.

3.3.2 Creación de las bases alfanuméricas.

En este paso se crea o reutilizan base de datos de la información temática que se requiere. Si las bases de datos ya existen, es decir, que sean brindadas por las empresas y organizaciones especializadas en el

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

tema, se hace necesario en la mayoría de los casos realizar un proceso de normalización y homogeneización. Por una parte las bases de datos pueden presentar un grado notable de heterogeneidad lógica, teniendo en cuenta los distintos orígenes y usos de la información. Además, las coordenadas contenidas en las mismas están sujetas a errores propios de una información geográfica que no ha sido contrastada con un SIG. Por otra parte, la información existente no es en su totalidad directamente utilizable por un SIG, debido a su especialización, por todo ello es necesario realizar un proceso completo de diseño y normalización de bases de datos seguido de la carga de las mismas y un chequeo completo de la información.

En el caso que las bases de datos no existan, es necesaria su creación para su posterior utilización en el SIG. Para crear una base de datos se deben realizar dos ejercicios de diseño, un diseño lógico y uno físico. El diseño lógico es un modelo abstracto de la base de datos desde el punto de vista del negocio, mientras que el diseño físico muestra como la base de datos se ordena realmente en los dispositivos de almacenamiento de acceso directo. Este diseño físico es llevado a cabo por especialistas en base de datos, mientras que el diseño lógico requiere de una descripción detallada del negocio de los usuarios finales, es decir, se describe cómo los elementos han de quedar agrupados en la base de datos. En el proceso de diseño se identifican las relaciones entre los elementos de datos y la manera más eficiente de agruparlos para cumplir con los requerimientos de información que requiere el SIG. Los grupos de datos son organizados, refinados y agilizados hasta que surja una imagen lógica general de las relaciones entre todos los elementos de la base de datos.

Estas bases de datos presentan una estructura que permite realizar actualizaciones de información, agregar nuevos campos y permite la fusión con otras bases de datos. Los datos que la componen se encuentran íntimamente vinculados con una representación gráfica, es decir, cada uno de los registros de las tablas está asociado a un elemento gráfico y a través de la superposición de varias capas de información se obtiene una visión integradora de diversos procesos y relaciones espaciales. Cada una de estas capas está vinculada con la base gráfica de información asociada a parámetros cartográficos.

3.3.3 Combinación de las caracterizaciones representadas.

En este paso se procede a la combinación o superposición de los datos obtenidos en los pasos anteriores, dígame bases cartográficas y bases alfanuméricas, con el objetivo de obtener las áreas de respuestas

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

hidrológicas. Se tienen en consideración los elementos condicionantes del escurrimiento por ser esta la componente del balance hídrico que más rápido responde a los efectos de la precipitación, entre estos factores condicionantes se encuentran la geología, el relieve, la hidrografía, los suelos y la vegetación.

Actualmente una de las estructuras en las que se basan los procedimientos para el cálculo de diferentes parámetros hidrológicos lo constituye el Modelo Digital de Elevación (MDE). Este permite representar la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (el relieve) constituyendo la principal característica en este proceso de combinación.

Una de las ventajas de los SIG es que facilitan la obtención de MDE y su posterior combinación con el resto de las caracterizaciones representadas, permitiendo la extracción automática de los parámetros a incluir en la modelización hidrológica. A partir del MDE es posible delimitar el área de las cuencas y subcuencas, así como la dirección del flujo en base a las pendientes (redes de drenaje). Finalmente es posible calcular las propiedades de las cuencas y de las redes de drenaje. Contar con la delimitación de estas áreas hidrológicas llamadas cuencas constituye un elemento esencial para el análisis de la precipitación; sin embargo es necesario conocer cómo se distribuyen en esta zona la geología, los suelos y la vegetación.

En algunas áreas de estudio más complejas el establecimiento de recursos hídricos se basa en la interpolación. Los métodos que se recomiendan utilizar en este paso son los lineales y/o cuadráticos, en los cuales los valores interpolados se derivan exclusivamente a partir de los valores de precipitación dados en los observatorios.

3.3.4 Obtención de características resultantes de la combinación.

La combinación de los datos de las diferentes variables condicionantes, posibilita la delimitación de las áreas de respuestas hidrológicas. Como resultado de esta combinación se obtiene entonces características específicas para cada objetivo hidrográfico que constituyen la base para el análisis de los valores de precipitación.

En este paso se le asigna a cada objetivo hidrográfico la información de precipitación correspondiente según el método de cálculo empleado. Existen diferentes métodos para el cálculo de la precipitación tales como el método de la media aritmética, el método de las medianas o método de Thiessen y el método de

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

las isoyetas. La elección de un método en particular depende del objetivo del análisis y el carácter de la región en estudio.

Método de la Media Aritmética.

Este método es el más simple, y consiste en tomar las láminas de lluvia para los “n” puntos dentro y cercanos a la cuenca, sumar sus valores y luego esa sumatoria dividirla por “n”. Tiene el defecto que no considera la influencia de cada punto en el área total, admite que todos los puntos tienen igual influencia areal. Es recomendable su uso cuando la distribución de las estaciones en la cuenca es bastante uniforme en las zonas bajas y convenientemente elegidas en zonas montañosas.

Método de Thiessen.

El dominio del área de estudio se divide en G subregiones o zonas de influencia en torno a cada estación. La precipitación calculada en cada pluviómetro se pondera entonces por la fracción del área total de la cuenca comprendida en cada zona de influencia. Las subregiones se determinan de manera tal que todos los puntos incluidos en esa subregión estén más cercanos al pluviómetro correspondiente que a cualquier otra estación. Una vez delimitadas las G zonas de influencia y calculadas sus áreas (dentro de la cuenca) se obtiene el promedio espacial. Esta metodología es objetiva y entrega resultados satisfactorios si se tiene una red adecuada de pluviómetros. No es recomendable en áreas montañosas, ya que los coeficientes no reflejan de ninguna manera los efectos altitudinales y tampoco se recomienda su aplicación para derivar promedios regionales en el caso de tormentas locales intensas. (Mijares, 1999)

Método de las isoyetas.

Este es uno de los métodos más precisos, pero es subjetivo y dependiente del criterio de algún hidrólogo que tenga buen conocimiento de las características de la lluvia en la región estudiada. Permite incorporar los mecanismos físicos que explican la variabilidad de la lluvia dentro de la cuenca. El método consiste en trazar líneas de igual precipitación llamadas isoyetas a partir de los datos puntuales reportados por cada estación.

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

Al área entre dos isoyetas sucesivas, se le asigna el valor de precipitación promedio entre tales isoyetas. Conociendo el área encerrada entre pares sucesivos de isoyetas, obtenemos la precipitación regional. El método requiere hacer supuestos en cimas y hoyos.

Al trazar las isoyetas para lluvias mensuales o anuales, podemos incorporar los efectos topográficos sobre la distribución espacial de la precipitación, tomando en cuenta factores tales como la altura y la exposición de la estación. También se recomienda este método para calcular promedios espaciales en el caso de eventos individuales localizados. (Mijares, 1999)

3.3.5 Generación de Modelos Digitales de Precipitaciones (MDP).

Una vez obtenida la información puntual de la precipitación, se genera el modelo con la representación de la distribución espacial de la precipitación para el área de estudio en general. Los MDP permiten caracterizar con gran detalle la precipitación y se sustenta de técnicas de análisis espacial. Desde el punto de vista matemático, cualquiera de los métodos de combinación e interpolación van a dar resultados aceptables, por lo que todos ellos pueden ser utilizados sin ninguna consideración accesoria a la realización de esta tarea.

Es posible la creación de un MDP basado en polígonos de Thiessen, simplemente calculando para cada celda la distancia a cada uno de los puntos de datos conocidos y asignando a la misma el valor de aquella situada más próxima. Haciendo una pequeña abstracción, se supone que cada celda es una estación de datos ya conocidos y el objetivo de este método es completar las celdas restantes de la maya.

Los MDP pueden responder a estimaciones realizadas sobre un espacio bidimensional, o considerar su variabilidad espacial con relación a la topografía, en este último caso basándose en los MDE. Estas estimaciones se han resuelto mediante la aplicación de SIG pues brindan la posibilidad de trabajar los datos considerando su posición geográfica y permite exactitud y velocidad en los cálculos necesarios para la elaboración de los documentos definitivos.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente sólo resta considerar los siguientes puntos:

- Los datos que se recogen en las estaciones son la materia base para el estudio y variabilidad espacial de la lluvia en la isla, es por ello que son muy importantes para la elaboración de MDP.

- El establecimiento de los MDP debe hacerse siguiendo todos los pasos necesarios que aseguren la bondad del modelo, dichos pasos deben comenzar desde el mismo momento de la toma de datos.

3.3.6 Análisis del comportamiento espacial de la variable precipitación.

En este paso se analiza el comportamiento espacial del fenómeno a partir del modelo obtenido. En este caso es importante tener en cuenta el comportamiento territorial de la precipitación a partir de las características edafo-geólogo-geomorfológicas del área de estudio. Este punto es esencial para investigadores, planificadores y especialistas para predecir de manera fiable los riesgos de inundación de una zona determinada, así como las áreas más vulnerables a largas temporadas de sequías. El análisis de la precipitación permite la planificación a largo plazo, el establecimiento de escenarios de cambio climático, previsiones hidrológicas y estudios de impacto ambiental.

Cuando se analiza la precipitación es necesario conocer los diferentes procesos que afectan su génesis y la importancia relativa de cada uno de ellos. A partir de este análisis se puede determinar el comportamiento de las distintas variables hidrogeológicas donde la precipitación actúa de manera directa e indirectamente.

3.4 Técnicas y herramientas de soporte al modelo.

3.4.1 Técnicas de soporte al modelo.

El modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas de precipitaciones en SIG debe estar respaldado de técnicas que sirvan de soporte al mismo. Se utilizan técnicas para cada uno de los pasos y actividades que conforman el modelo. Para la creación de las bases cartográficas se debe tener en consideración las diferentes técnicas o métodos de representación cartográfica existentes. Estas técnicas permiten caracterizar un determinado fenómeno, facilitando llevar al mapa los elementos y aspectos esenciales, que posibilitan una plena identificación entre los objetos reales y su representación en el mapa. Estos métodos pueden ser signos fuera de escala, signos lineales, isolíneas, fondo cualitativo, diagramas locales, método de puntos, método de áreas, signos de movimiento, cartodiagramas y

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

cartogramas. La utilización de uno u otro método depende de las características del fenómeno a representar.

En la creación de las bases alfanuméricas es necesario llevar a cabo todos los pasos que garanticen que sea segura y robusta. Para ello es necesario contar con una base de datos normalizada, según el Diagrama Entidad Relación, por lo menos hasta su tercera forma normal.

Para la combinación de las caracterizaciones representadas se utilizan diferentes técnicas de interpolación y de superposición de información, las cuales permiten definir la unidades geográficas de análisis para las cuales se obtendrá finalmente el modelo de precipitación. En la obtención de este modelo es necesario contar con los datos de precipitación para cada unidad, por lo que es conveniente y recomendable aplicar las técnicas de cálculo de precipitación, que en este caso se recomienda el método aritmético.

3.4.2 Herramientas de soporte al modelo.

El modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas de precipitaciones en SIG debe estar respaldado de herramientas que sirvan de soporte al mismo. Como las soluciones existentes no manejan a las precipitaciones como variable para la modelización hidrológica se propone para que este modelo cumpla su objetivo incorporarlo a la plataforma soberana GeneSIG. Esta plataforma es una herramienta informática ideada por un grupo de proyecto conformado por especialistas de GeoCuba, las Fuerzas Armadas Revolucionarias (FAR) y la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI). Sirve como soporte de desarrollo de aplicaciones de SIG en entornos Web con tecnologías libres, cumpliendo además con las especificaciones OpenGIS que establece el Open Geospatial Consortium (OGC), garantizando la interoperabilidad global entre SIG y en consecuencia con la política de migración de software libre y de soberanía tecnológica que impulsa el país.

La Plataforma está desarrollada sobre el Sistema Operativo GNU/Linux en su distribución Ubuntu v8.10, aunque también brinda la posibilidad de poder ser ejecutada en Windows. Para este modelo es necesario el uso de los siguientes módulos incluidos en la plataforma GeneSIG:

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

- **Módulo de Navegación:** Se encarga de gestionar toda la interacción del usuario con la interfaz visual donde se encuentra el mapa y garantiza que este pueda realizar las operaciones de movimiento, acercamiento y alejamiento en sus diferentes variantes.
- **Módulo de Selección:** Ofrece la posibilidad de selección de objetos geográficos dentro de las capas seleccionables definidas y realizar operaciones de consulta o persistencia de selección.
- **Módulo de Consulta Espacial:** Permite consultar espacialmente objetos puntuales o los determinados por un área que defina el usuario, rectangular, circular o poligonal.
- **Módulo de Análisis:** Ofrece la posibilidad de realizar análisis espacial sobre el mapa como cálculo de distancias, superficies y localizaciones.
- **Módulo de Configuración del Mapa:** Permite la configuración de la aplicación para el manejo de los datos y el mapa, unidades de medidas, tipo de coordenadas, proyección, entre otros.
- **Módulo de Impresión:** Ofrece la posibilidad de impresión del área que defina el usuario en el formato de papel que corresponda.
- **Módulo de Servicios:** Realiza operaciones relacionadas con la gestión de las capas, como selección y agregado de nuevas capas en diferentes formatos y conexión a servicios de mapas.
- **Módulo de Edición:** Realiza operaciones de edición que permiten a los usuarios insertar nuevos objetos geográficos a capas temporales, además de otras funciones como la activación de puntos.
- **Módulo de Ayuda:** Relaciona opciones de apoyo al usuario para el trabajo con la plataforma, como un manual de usuario y ayuda en línea.

El gestor de base de datos que se recomienda utilizar es PostgreSQL con la extensión PostGIS pues este es el que se usa en la plataforma GeneSIG, además es un proyecto libre (OpenSource). Sus principales características se presentan a continuación:

- Soporta distintos tipos de datos como datos de tipo fecha, monetarios, elementos gráficos, datos sobre redes, además de la creación de tipos de datos propios.
- Incorpora funciones de diversa índole como manejo de fecha, geométricas, orientadas a operaciones con redes, entre otras.

- Incluye herencia entre tablas.
- Permite la declaración de funciones propias, así como la definición de disparadores.
- Permite la gestión de diferentes usuarios, como también los permisos asignados a cada uno de ellos.

3.5 Evaluación del modelo.

Los modelos, tanto matemáticos, físicos o químicos deben ser evaluados para comprobar su eficacia. El modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG también necesita su evaluación según las variables que lo caracteriza. Estas variables que definen el modelo son el esfuerzo, la reusabilidad, la fiabilidad y la escalabilidad.

Esfuerzo

El modelo disminuye el esfuerzo de los trabajadores del INRH, pues a través de este se puede representar y analizar las modelizaciones hidrológicas en SIG. En este instituto existe un Departamento de Hidrología el cual se encarga de llevar a cabo los estudios de las precipitaciones y demás variables asociadas a estas en el país.

Actualmente estos estudios se realizan con mucho esfuerzo pues no cuentan con un sistema automatizado que les brinde la rapidez y la eficacia que necesitan. Una vez realizado este modelo el INRH contará con la herramienta necesaria para aumentar la eficiencia de los estudios, reducir el tiempo de realización de los mismos, lograr exactitud y seguridad en los cálculos de la lluvia, así como respuestas rápidas ante casos extremos (inundaciones, sequías, fenómenos naturales, entre otros) y disminuir el esfuerzo que emplean los trabajadores a la hora de realizar estos estudios.

Reusabilidad

Este modelo permite la reusabilidad pues se basa específicamente en las precipitaciones como variable componente del ciclo hidrológico, pero su contenido es perfectamente reusable a cualquier otro ciclo de la naturaleza como por ejemplo los que tiene que ver con los suelos, el relieve, la vegetación, entre otros. Esta propiedad es muy importante pues de esta manera aumenta el alcance del modelo y por ende las perspectivas comerciales del mismo.

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

La reusabilidad es una variable muy importante en este modelo porque permite, además de una evaluación eficiente de las variables hidrológicas, la futura evaluación de los demás componentes de la naturaleza, logrando una buena planificación y análisis de los recursos naturales en general.

Fiabilidad

El modelo es fiable pues garantiza con un alto nivel de seguridad que todos los datos que se manejan son confiables y que funciona con calidad. El INRH necesita trabajar con un software que garantice la fiabilidad en todo el proceso de evaluación de los recursos hídricos y específicamente en la evaluación, representación y análisis de la precipitación y un objetivo de este modelo es garantizarla.

Actualmente es necesario evitar fallos en los software, trabajar con información confiable y almacenar los datos en sitios seguros, de manera tal que sólo accedan a estos, aquellos que tengan los permisos para ello. Logrando lo anteriormente planteado se puede lograr la fiabilidad de un software, siendo esta una de las principales características que lo describan.

Escalabilidad

El modelo es escalable pues se puede asegurar con un alto nivel de confianza que permite agregar nuevas funcionalidades. Actualmente el modelo está diseñado para la precipitación como variable del ciclo hidrológico, pero se puede garantizar que se pueden incluir las demás variables que componen este ciclo.

La escalabilidad del modelo constituye una gran ventaja, pues una vez representada y analizada la precipitación se hace necesario el análisis de las demás variables en las que esta actúa de manera directa e indirectamente. El INRH una vez que realiza el estudio de la lámina de lluvia, necesita evaluar el comportamiento del resto de las variables del balance hídrico sobre las que influye la precipitación. Se puede analizar la escorrentía, la infiltración y la evaporación, que con la escalabilidad del modelo se podrá realizar.

3.6 Validación del modelo.

En la validación del modelo se utiliza el Método de Evaluación de Expertos. Desde el punto de vista de estado de opinión este método está compuesto a su vez por varios métodos, de los cuales fue escogido el Método de la Preferencia por ser el más empleado, por su gran exactitud, objetividad y rapidez. Para ello se efectúan los siguientes pasos:

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

1. Confección de los criterios a tener en cuenta para la evaluación del modelo, cada criterio se denota con la letra C y un número que lo identifica.

C1: Valor científico del modelo.

C2: Calidad de la investigación.

C3: Satisfacción de las necesidades del Departamento de Hidrología del INRH.

C4: Viabilidad del empleo del modelo.

C5: Facilidad de entendimiento del modelo propuesto.

C6: Necesidad del empleo del modelo.

C7: Disminución del esfuerzo realizado por los trabajadores del INRH.

C8: Reusabilidad, fiabilidad y escalabilidad del modelo.

2. Organizar un comité de expertos, valorando su especialidad, grado científico y currículum. Cada experto se denota con la letra E y un número individual.

E1: Ing. Yoandry Lazo Nodarse (Jefe del Proyecto SIG-Desktop, Centro de Desarrollo GEySED, UCI).

E2: Lic. Bernardo Lora Borrero (Especialista del Departamento de Hidrología del INRH).

E3: Lic. Daniel Echevarría Gonzales (Especialista Funcional del Departamento Geoinformática).

E4: Ing. Antonio Membrides Espinosa (Arquitecto del proyecto GeneSIG).

E5: José Evelio Gutiérrez Hernández (Profesor de Hidrología, Facultad de Geografía, Universidad de La Habana. Cuba).

E6: Ricardo Remond Noa (Profesor de SIG, Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Cuba).

E7: María Elizabeth Flores Vázquez (Comisión Nacional de Agua, Guadalajara, Jalisco. México).

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

3. Entregar a los expertos el modelo y el cuestionario para valorar el peso relativo de cada criterio de evaluación, el valor de cada criterio debe estar entre una escala de 1 (el valor más bajo) y 10 (valor más alto).
4. Determinar la competencia de los expertos por el coeficiente K, el cual se calcula de acuerdo con la opinión del candidato sobre su nivel de conocimiento acerca del problema que se está resolviendo y con las fuentes que le permiten argumentar sus criterios. El coeficiente K se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$K = \frac{K_c + K_a}{2}$$

Donde:

K_c : Es el coeficiente de información que tiene el experto sobre el tema tratado, se calcula en base a la valoración del propio experto en una escala de 0 a 10 y multiplicado por 0.1, de forma tal que:

- El valor 0 indica desconocimiento absoluto sobre el problema evaluado.
- El valor 1 indica pleno conocimiento sobre el problema evaluado.

El K_c de cada experto se calcula promediando los valores de cada pregunta.

K_a : Es el coeficiente de fundamentación de los criterios del experto, se calcula sumando todos los puntos alcanzados.

De tal modo que:

- $0.8 < K \leq 1$ entonces K es Alto, por tanto el experto tiene competencia alta.
- $0.7 \leq K \leq 0.8$ entonces K es Medio, por tanto el experto tiene competencia media.
- $0.5 \leq K < 0.7$ entonces K es Baja, por tanto el experto tiene competencia baja.

La Tabla # 1 muestra los valores del coeficiente K obtenidos para cada experto y la evaluación de su confiabilidad como experto para el tema seleccionado.

Experto	Valores de coeficiente de competencia (K)	Evaluación
---------	---	------------

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

E1	0.88	Competencia alta
E2	0.83	Competencia alta
E3	0.72	Competencia media
E4	0.73	Competencia media
E5	0.86	Competencia alta
E6	0.83	Competencia alta
E7	0.75	Competencia media

Tabla # 1 Coeficiente de competencia entre los expertos. (Elaborado por la autora)

5. Ejecutar Método de Preferencia, para ello se utiliza la Tabla # 2 que muestra los valores de las evaluaciones dadas por los expertos a cada criterio empleado para validar el modelo.

Experto	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	n
E1	8	9	9	8	8	10	9	8	69
E2	9	9	10	9	8	8	9	7	69
E3	5	5	5	9	5	5	8	10	52
E4	7	7	9	9	9	10	9	10	70
E5	7	8	9	9	8	9	8	9	67
E6	8	8	9	9	8	9	9	10	70
E7	7	7	7	8	8	9	9	9	64
m	51	53	58	61	54	60	61	63	461

Tabla # 2 Pesos asignados por los expertos para cada criterio. (Elaborado por la autora)

A partir de los valores anteriores se crea la Tabla # 3 donde se asigna la puntuación de la siguiente forma:

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

La valoración se realiza por filas, asignando el primer valor de rango a la menor evaluación, si aparece repetido el mismo valor, por tanto se suman los lugares de las posiciones que tiene el valor y se divide entre las cantidades de valores iguales que hay:

- El primer valor es 8 y se repite 4 veces en la fila 1, por tanto:

$$\frac{1 + 2 + 3 + 4}{4} = 2.5$$

- El segundo valor es 9 y se repite 3 veces en la fila 1.

$$\frac{5 + 6 + 7}{3} = 6$$

- El tercer valor es 10 y se repite 1 vez en la fila 1.

$$\frac{8}{1} = 8$$

- El cuarto valor es 7 y se repite 1 vez en la fila 2.

$$\frac{9}{1} = 9$$

- El quinto valor es 5 y se repite 5 veces en la fila 3.

$$\frac{9 + 10 + 11 + 12 + 13}{5} = 11$$

El grupo de concordancia entre todos los expertos para todas las preguntas se calcula mediante el coeficiente de concordancia de Kendall, para ello se asigna un rango a cada evaluación dada por el experto i a la pregunta j . Si el experto usa la misma categoría para más de una pregunta, el rango será igual a la media aritmética de las posiciones que deben ser otorgadas. La Tabla # 3 muestra el proceso descrito anteriormente.

Expertos	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
E1	2.5	6	6	2.5	2.5	8	6	2.5
E2	6	6	8	6	2.5	2.5	6	9

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

E3	11	11	11	6	11	11	2.5	8
E4	9	9	6	6	6	8	6	8
E5	9	2.5	6	6	2.5	6	2.5	6
E6	2.5	2.5	6	6	2.5	6	6	8
E7	9	9	9	2.5	2.5	6	6	6
R _j	49	46	52	35	29.5	47.5	35	47.5

Tabla # 3 Orden de los rangos de puntajes ligados. (Elaborado por la autora)

Con los resultados obtenidos en la Tabla # 3 se suman todos los R_j y de esa suma se obtiene el valor de S_j y este se divide entre la cantidad de aspectos tratados para obtener la media de los rangos.

$$S_j = \sum_{i=1}^n R_{ij} = 341.5$$

Donde:

R_{ij}: Es el rango asociado a la evaluación del experto i a la pregunta j.

$$\bar{S} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{n} = \frac{341.5}{8} = 42.68$$

El resultado de la suma de rangos iguales, llamado también observaciones ligadas que ofreció el experto i para las preguntas, se calcula mediante el Factor de Corrección:

$$Ti = \frac{\sum_{i=1}^r (t^3 - t)}{12}$$

Donde:

r: Es el número de grupos con rangos iguales para el experto i.

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

t: Es el número de observaciones dentro de cada uno de los grupos para el experto i.

Si todas las evaluaciones del experto i son diferentes, el valor de T_i es cero.

$$T_1 = \frac{(3^3 - 3) + (3^3 - 3)}{12} = \frac{24 + 24}{12} = 4$$

$$T_2 = \frac{(4^3 - 4) + (2^3 - 2)}{12} = \frac{60 + 6}{12} = 5.5$$

$$T_3 = \frac{(5^3 - 5)}{12} = \frac{25 - 3}{12} = 10$$

$$T_4 = \frac{(2^3 - 2) + (4^3 - 4) + (2^3 - 2)}{12} = \frac{6 + 60 + 6}{12} = 6$$

$$T_5 = \frac{(3^3 - 3) + (4^3 - 4)}{12} = \frac{24 + 60}{12} = 7$$

$$T_6 = \frac{(3^3 - 3) + (4^3 - 4)}{12} = \frac{24 + 60}{12} = 7$$

$$T_7 = \frac{(3^3 - 3) + (2^3 - 2) + (3^3 - 3)}{12} = \frac{24 + 6 + 24}{12} = 4.5$$

El coeficiente de concordancia de Kendall se calcula como:

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

$$W = \frac{12 \times S}{m^2 \times (n^3 - n) - m \sum_{i=1}^m T_i}$$

Donde:

m: Es la cantidad de expertos.

n: Es la cantidad de criterios de validación.

$\sum_{i=1}^m T_i = 44$, donde m es el número de expertos.

$$W = \frac{12 \times 341.5}{7^2 \times (8^3 - 8) - 7 \times 44}$$

$$W = \frac{4098}{24423}$$

$$w = 0.16$$

El valor de este coeficiente indica el grado de asociación entre K variables semejantes y la compatibilidad de los expertos. El valor obtenido se evalúa según la Tabla # 4:

Valor del coeficiente de Kendall	Relación
$0 \leq W < 0.2$	Despreciable
$0.2 \leq W < 0.4$	Baja o ligera
$0.4 \leq W < 0.6$	Moderada
$0.6 \leq W < 0.8$	Sustancial o marcada

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

$0.8 \leq W \leq 1$	Alta o muy alta
---------------------	-----------------

**Tabla # 4 Evaluación de la compatibilidad de los expertos según el coeficiente de Kendall.
Tomado de (Gonzalvo, 1978).**

En este caso el valor de 0.16 indica que la concordancia entre los expertos es despreciable.

6. La prueba de significación para W se realiza calculando el estadígrafo Chi cuadrado mediante la fórmula:

$$X^2 = m(n - 1)W = 8(7 - 1)0.16 = 8.96(\text{Real})$$

Se busca el valor de Chi cuadrado.

$$Df = n - 1 = 8 - 1 = 7$$

$$X^2_{(7,0.001)} = 24.32$$

Se cumple que $X^2_{(7,0.001)} > X^2_{\text{real}}$ por tanto los resultados de la evaluación del modelo son confiables, implicando que los 7 expertos concuerdan en su efectividad y posibilidad de aplicación.

Con una selección de 7 expertos el error de la evaluación es del 10 %, por tanto la confiabilidad del criterio emitido por los expertos es del 90 %.

Dados los resultados obtenidos anteriormente se puede llegar a la conclusión que el modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG es considerado por los expertos de alta calidad y concuerdan en su efectividad como modelo de referencia para representar y analizar modelizaciones hidrológicas en un SIG.

3.7 Conclusiones parciales.

En el capítulo que acaba de ser presentado se ha creado el modelo que proporciona la respuesta al problema científico de la investigación, así como las variables para su evaluación y las técnicas y

CAPÍTULO 3: Creación y validación del modelo

herramientas que darán soporte al mismo. Una vez elaborado dicho modelo se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Las técnicas y herramientas seleccionadas proporcionaran las funcionalidades necesarias para lograr la implantación eficaz del modelo.
- Los expertos consideran que el modelo tiene la calidad científica requerida para su posterior aplicación.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

Una vez realizado el modelo para la representación y análisis de modelizaciones hidrológicas en SIG se podrá contar con una guía necesaria para el desarrollo de un SIG aplicado en el campo de la hidrología. De modo que una vez finalizada la presente investigación se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Para lograr una eficiente evaluación, estudio y planificación de los recursos hídricos en el INRH es necesario el uso de SIG que brinden las funcionalidades necesarias para ello.
- Las modelizaciones de la precipitación es uno de los pasos más importantes para lograr eficientes modelizaciones hidrológicas.
- Las variables que caracterizan al modelo propuesto ofrecen un alto grado de confianza en la calidad del mismo.
- Las técnicas y herramientas seleccionadas proporcionarán las funcionalidades necesarias para lograr la implantación eficaz del modelo.
- La evaluación del modelo por parte de los expertos determinó que tiene la calidad científica requerida para su posterior aplicación.
- Con el modelo se logra un esquema de trabajo formal en los procesos de modelizaciones hidrológicas, el cual servirá de modelo conceptual para las actividades principales del negocio.
- El modelo aporta elementos sistémicos a las actividades de gestión integral de recursos hídricos, de manera que se automaticen los procesos actuales.
- El modelo garantiza para el Departamento de Hidrología del INRH un soporte metodológico del proceso de modelización sobre la experiencia de una herramienta SIG.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Al concluir la presente investigación se recomienda:

- Que el modelo propuesto funcione como patrón en los procesos de modelizaciones hidrológicas en todas las entidades donde estas se realicen.
- Que el modelo propuesto se aplique en el INRH.
- Que el modelo propuesto sea adaptado a otras variables hidrológicas como por ejemplo la escorrentía, la infiltración y la evaporación.
- Que el modelo propuesto sea sustentado con una herramienta SIG como GeneSIG.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bosque Sendra, J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid : Ed. RIALP, S. A. ISBN: 84-321-3154-7. Alcalá, Madrid. p. 451.
2. Burns, I.S and al, et. 2004. *Automated Geospatial Watershed Assesment (AGWA) - A GIS based Hydrologic Modelling Tool – Documentation and User manual*. Version 1.2.4. [Online] 2004. http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/manual/AGWA/frame_controller.html.
3. Cantillo, Juan .1994: *Definición de los métodos de precipitación y purificación de invertasa*. [Online] 1994 <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=132623>
4. Camacho Barreiro, Aurora and Ariosa Roche, Liliana. 2000. *Diccionario de términos ambientales*. Centro Félix Varela, La Habana. [Online] 2000. http://www.cooperahabana.cu/cdl/images/5/56/Diccionario_de_terminos_ambientales.pdf. ISBN: 959-7071-16-9.
5. Correa Morocho, Reucher, Saavedra Arango, Moisés David and Carlos, Arévalo Casariego, Juan. 2009. *Sistemas de Información Gerencial*. En *Contribuciones a la Economía*. [Online] 2009. <http://www.eumed.net/ce/2009b/>.
6. Cruz Moticelli, Juan. 2005. *Road Map to Water Synergies in the Americas*. Departamento de Desarrollo Sostenible. [Online] 2005. <http://www.hidro.cu>
7. Fernández, Luis (1998). *Teoría de la Medición*. Campus Gipuzkoa. [Online] 1998 <http://www.sc.ehu.es/jiwdocoj/remis/docs/teoriamedicion.html>.
8. Giron, Ernesto. 2008. *Sistemas de información Geográfica, Sensores Remotos, Bases de Datos Espaciales y Programación Web mapping*. [Online] 2008. http://ernestogiron.blogspot.com/2008_04_01_archive.html
9. González, Julio Iván and Gutiérrez, José Evelio. 1988. *Hidrología General*. Ciudad de La Habana, Cuba : Editorial Pueblo y Educación, 1988.
10. Gonzalvo, Gonzalo, Gómez, Florentina, Izquierdo, Ramón. 1978. *Diccionario de Metodología estadística*. s .l.: Ediciones Morata, 1978.8471120968, 9788471120960.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

11. Goodchild, M.F. 1993. *The State of GIS for environmental problem-solving. Chapter 2 in Everonmental Modeling with GIS, New York. 488 p.* [Online] 1993 <http://nepis.epa.gov/>
12. Guevara, Betsy (2007). *Procedimiento propuesto para medir la calidad en. Biblioteca UCI.* [Online] 2007 http://bibliodoc.uci.cu/TD/TD_0765_07.pdf.MIS-006086
13. Heinonen, Olli. 2008: *Gestión de los recursos hídricos mediante la hidrología isotópica. International Atomic Energy Agency (IAEA)* [Online] 2008 http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/Spanish/water_sp.pdf.
14. Imbach, Alejandro C. 2008. *Enciclopedia Nicaragüense de Cuencas.* [Online] 2008. <http://www.geolatina.net/cuencasnicaragua/node/32>.
15. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México. 2005. *Norma técnica Geográfica - 005 Modelos Digitales de Elevación.* [Online] 2005. <http://www.inegi.org.mx/snieg/docs/NormatividadGeografia/>.
16. Kosciuk, Nicolás H. 2004. *Resumen de Sistemas de Información Gerencial. Laudon y Laudon.* [Online] 2004. <http://libroslibresuba.ourproject.org/laudon.pdf>.
17. Maidment, David R. and Strassberg, Gil. 2003. *ARC HYDRO GROUNDWATER DATA MODEL.* [Online] 2003. http://twri.tamu.edu/docs/funding/usgs/2003-04/strassberg_awra.pdf
18. Marcano, José E. 2005. *La hidrología.* [Online] 2005. <http://jmarcano.topcities.com/ciencias/hidrologia.html>
19. Martín de Agar y Valverde, Rafael. 2008. *Plan cartográfico de Andalucía 2008 – 2011. Comisión de Cartografía Instituto de Cartografía de Andalucía.* [Online] 2008. http://infodigital.opandalucia.es/bvial/bitstream/123456789/173/2/PLAN%20CARTOGR%c3%81FIC O%20IP%20v30_03.2008.pdf.
20. Martínez Menchón, M. and Alonso Sarría, F. 2005. *Validación de la extracción automática de cauces y cuencas con SIG. Obtención del umbral de área óptimo. Universidad de Murcia.* [Online]2005. http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/XII_1/020%20-%20Martinez%20y%20Alonso.pdf
21. Mijares Aparicio, F.J. 1999. *Fundamentos de Hidrología de Superficie. Ed. Limusa. México.303 p.* [Online] 1999. <http://www.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/ARCHIVOS/PRECIPITACION.htm>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

22. Puerta de Armas, Yordanis. 2004. *Estudio ambiental para la planificación y gestión sostenible de la cuenca hidrográfica del río Zaza*. Ciudad de La Habana, Cuba : Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, 2004. p. 104, Trabajo de curso.
23. Ramírez, Alejandro and Edison, Agrim. 2009. *Implementación de un Sistema de Información Geográfica con un perfil aplicable al sector arrocero*. [Online] 2009. http://egal2009.easyplanners.info/area04/4103_Ramirez_Cardozo_Alejandro.pdf
24. Samper, Javier and al, et. 2007. *GIS - BALAN: Un modelo hidrológico semi - distribuido acoplado a un Sistema de Información Geográfica para la estimación de los recursos hídricos*. [Online] 2007. http://www.zonanosaturada.com/publics/ZNS07/area_4/06.pdf.
25. Sánchez, Edgar (2007): *Una metodología sistémica para la implantación de Sistemas de Información Geográficos*. Caracas, Venezuela. [Online] 2007 www.ceagi.org/portal/files/metodolog1.doc
26. Vélez Jaime, Póveda Germán, Mesa Oscar, Quintero Felipe, Hernández Olver, Ramírez Jorge, Álvarez Oscar, Acero Andrés, Zapata Elizabeth, Alarcón Jorge, Gómez Jesús, Gómez María and Correa Oscar. 2007. *HidroSIG: Un Sistema De Información Geográfica para la gestión de recursos naturales y modelación de medio ambiente*. [Online] 2007. <http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2007/comun/1pdf/17.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

1. Belmonte, Silvina and Núñez, Virgilio. 2006: *Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. En Revista Internacional de Ciencia y tecnología de la Información geográfica. GeoFocus (Informes y comentarios), nº 6, pp.15 - 27. ISSN: 1578-5157 [Online] 2006*
http://geofocus.rediris.es/2006/Informe2_2006.pdf
2. Betancourt, Glenia, Doria, Walter and John, Escobar M. 2007. *Sistemas de Información Geográfica como Herramienta de Apoyo en la Gestión ambiental Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. [Online] 2007.* http://www.unal.edu.co/idea/public/publicac_rev_GA.htm
3. Bosque Sendra, J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica.* Madrid : Ed. RIALP, S. A. ISBN: 84-321-3154-7. Alcalá, Madrid. p. 451.
4. Burns, I.S and al, et. 2004. *Automated Geoespatial Watershed Assesment (AGWA) - A GIS based Hydrologic Modelling Tool – Documentation and User manual. Version 1.2.4. [Online] 2004.*
http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/manual/AGWA/frame_controller.html.
5. Camacho Barreiro, Aurora y Ariosa Roche, Liliana. 2000: *Diccionario de términos ambientales. Centro Félix Varela, La Habana. ISBN: 959-7071-16-9. [Online] 2000*
http://www.cooperahabana.cu/cdl/images/5/56/Diccionario_de_terminos_ambientales.pdf
6. Cesar, Hendrik. 2008. *Guía metodológica para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica en la Universidad de las Ciencias Informáticas. Biblioteca UCI. [Online] 2008.*
7. Colectivo de autores. 2000: *Diccionario Geográfico de Cuba. Ediciones de Geografía. Ciudad de La Habana, Cuba. 386 p.*
8. Conesa, Camelo. 1996: *Áreas de aplicación medioambiental de los SIG. Modelización y avances recientes. Universidad de Murcia. En Papeles de Geografía. nº 23 – 24, pp 101 – 115. [Online]1996*
dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=105539&orden=0
9. Correa Morocho, Reucher; Saavedra Arango, Moisés David y Arévalo Casariego Juan Carlos. 2009: *"Sistemas de Información Gerencial" en Contribuciones a la Economía. [Online] 2009*
<http://www.eumed.net/ce/2009b/>
10. Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, Javier. (ed.). 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. Las Palmas de Gran Canaria. Madrid. Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. 455 pp.*

11. Cruz Moticelli, Juan. 2005. *Road Map to Water Synergies in the Americas*. Departamento de Desarrollo Sostenible. [Online] 2005. <http://www.hidro.cu>.
12. Fernández, Luis (1998). *Teoría de la Medición*. Campus Gipuzkoa. [Online] 1998 <http://www.sc.ehu.es/jiwdocoj/remis/docs/teoriamedicion.html>.
13. Franco, Roberto y Quentín, Emmanuelle. 2004: *Generación de un submodelo en Idrisi para el análisis de cuencas*. Facultad de Geografía Universidad Autónoma del estado de México. [Online] 2004 http://www.sigte.udg.es/redidrisi/eventos/pdf/13_Roberto_Franco.pdf
14. García, Jorge Mario. 2006. *La aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada del recurso hídrico: Aproximación al caso cubano*. [Online] 2006. <http://www.iwcam.org/documents/meeting-reports/integrated-water-resource-management-iwrm-workshops/cuba-integrated-water-resources-management-iwrm-inception-workshop-march->
15. Giron, Ernesto. 2008. *Sistemas de información Geográfica, Sensores Remotos, Bases de Datos Espaciales y Programación Web mapping*. [Online] 2008. http://ernestogiron.blogspot.com/2008_04_01_archive.html
16. González, Julio Iván y Gutiérrez, José Evelio. 1988: *Hidrología General*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana, Cuba.
17. Goodchild, M.F. 1993. *The State of GIS for environmental problem-solving*. Chapter 2 in *Everonmental Modeling with GIS*, New York. 488 p. [Online] 1993 <http://nepis.epa.gov/>
18. Guevara, Bedsy (2007). *Procedimiento propuesto para medir la calidad en*. Biblioteca UCI. [Online] 2007 http://bibliodoc.uci.cu/TD/TD_0765_07.pdf.MIS-006086
19. Imbach, Alejandro C. 2008: *Enciclopedia Nicaragüense de Cuencas*. [Online] 2008 <http://www.geolatina.net/cuencasnicaragua/node/32>
20. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México .2005: *Norma técnica Geográfica - 005 Modelos Digitales de Elevación*. [Online] 2005 <http://www.inegi.org.mx/snieg/docs/NormatividadGeografia/>
21. Kosciuk, Nicolás H. 2004: *Resumen de Sistemas de Información Gerencial*. Laudon y Laudon [Online] 2004 <http://libroslibresuba.ourproject.org/laudon.pdf>
22. Llorens, Pilar. 2003: *La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca*. En *Ecosistemas*, enero – abril año/vol. XII, número 001.Asocacion Española de Ecología Terrestre. Alicante, España, pp. 1 - 4 [Online] 2003 <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/540/54012111.pdf>

23. Maidment, David R. and Strassberg, Gil. 2003. *Arc Hydro groundwater data model*. [Online] 2003. http://twri.tamu.edu/docs/funding/usgs/2003-04/strassberg_awra.pdf
24. Marcano, José E. 2005. *La hidrología*. [Online] 2005. <http://jmarcano.topcities.com/ciencias/hidrologia.html>
25. Martín de Agar y Valverde, Rafael. 2008: *Plan cartográfico de Andalucía 2008 – 2011*. Comisión de Cartografía Instituto de Cartografía de Andalucía. [Online] 2008 http://infodigital.opandalucia.es/bvial/bitstream/123456789/173/2/PLAN%20CARTOGR%c3%81FIC O%20IP%20v30_03.2008.pdf
26. Martínez Menchón, M.; Alonso Sarría, F.2005: *Validación de la extracción automática de cauces y cuencas con SIG. Obtención del umbral de área óptimo*. Universidad de Murcia. [Online] 2005. http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/XII_1/020%20-%20Martinez%20y%20Alonso.pdf
27. Morad, Munir and Triviño, Alejandro. *Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación*. [Online]. <http://www.ieg.csic.es/Age/boletin/31/3102.pdf>
28. Mora, Héctor and Marcelo, Carlos. 2003. *Aproximación a la construcción de cartografía social a través de la Geomática*. [Online] 2003. <http://www.umanizales.edu.co/programs/ingenieria/ventana/ventana11/CartografiaSocial.pdf>
29. Naturaleza de los datos espaciales.[Online] http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/rfranco/datos_espaciales.htm
30. Pizarro, Roberto; Soto, Manuel; Farias: César y Jordan, Cristian. 2005: *Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central*. *Bosque* 26(2): 123 - 129 [Online] 2005. http://eias.otalca.cl/2publicaciones/paper/pizarro_soto_farias.pdf
31. Puerta de Armas, Yordanis. 2004: *Estudio ambiental para la planificación y gestión sostenible de la cuenca hidrográfica del río Zaza*. Trabajo de Diploma. Facultad de Geografía, Universidad de La Habana. Ciudad de La Habana, Cuba. 104 p. (Inédito)
32. Pusineri, Graciela, Pedraza, Raúl and Lozeco, Cristóbal. *Usos de los modelos digitales de elevación y de Sistemas de información Geográfica en la modelación hidrológica*. [Online] <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/pusineri.pdf>.

33. Quiñonero Rubio, Juan Manuel. y Alonso Sarría, Francisco. 2007: *Modelización de la dinámica hidrológica y erosiva en barrancos de la cuenca del río Quípar (sureste de España) con Grass*. *GeoFocus (Artículos)*, nº 7, p. 188-215, ISSN: 1578-5157. [Online] 2007 http://geofocus.rediris.es/2007/Articulo10_2007.pdf
34. Ramírez, Alejandro and Edison, Agrim. 2009. *Implementación de un Sistema de Información Geográfica con un perfil aplicable al sector arrocero*. [Online] 2009. http://egal2009.easyplanners.info/area04/4103_Ramirez_Cardozo_Alejandro.pdf
35. Samper, Javier and et al. 2005: *Modelos Hidrológicos y Sistema de Información Geográfica para la estimación de los recursos hídricos. Aplicación de GIS – BALAN a varias cuencas españolas. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol VII*.
36. Samper, Javier and al, et. 2007. *GIS - BALAN: Un modelo hidrológico semi - distribuido acoplado a un Sistema de Información Geográfica para la estimación de los recursos hídricos*. [Online] 2007. http://www.zonanosaturada.com/publics/ZNS07/area_4/06.pdf.
37. Sánchez, Edgar. 2007: *Una metodología sistémica para la implantación de Sistemas de Información Geográficos*. Caracas, Venezuela. [Online] www.ceagi.org/portal/files/metodolog1.doc
38. Tapia, Mario. *Conceptos sobre cuencas hidrográficas*. http://www.cepes.org.pe/pdf/OCR/Partidos/manejo_integral_microcuencas/manejo_integral_microcuencas2.pdf
39. Triviño Pérez, Alejandro y Ortiz Rojas, Sergio. 2004: *Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos – ramblas mediterráneas*. *Investigaciones geográficas nº 35 pp. 67 – 83*. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante [Online] 2004 dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=1065441
40. Urciuolo, Adriana, Iturraspe, Rodolfo, Rosanigo, Beatriz, Parson, Ariel, Moyano Ezequiel and Villarreal, Martín. 2007. *Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes*. [Online] 2007. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco – Sede Ushuaia, Darwin y Canga, (9410) Ushuaia, 2007. <http://www.ing.unp.edu.ar/wicc2007/trabajos/ISBD/092.pdf>.
41. Van Westen, Cees, Kooistra, Jelger and Vargas, Ruben. *ILWIS. International Institute for GeoInformation Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands*. [Online]

<http://www.itc.nl/external/unesco->

<rapca/Presentaciones%20Powerpoint/01%20Introduccion%20SIG/Introduccion%20LWIS.pdf>

42. Vélez Jaime, Póveda Germán, Mesa Oscar, Quintero Felipe, Hernández Olver, Ramírez Jorge, Álvarez Oscar, Acero Andrés, Zapata Elizabeth, Alarcón Jorge, Gómez Jesús, Gómez María and Correa Oscar. 2007. *HidroSIG: un Sistema de Información Geográfica para la gestión de recursos naturales y modelación de medio ambiente.* [Online] 2007. <http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2007/comun/1pdf/17.pdf>