

# HERRAMIENTAS TECNICAS Y DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO

---

**John Fernando Escobar Martínez**

*Ingeniero de Petróleos, Especialista Gestión Ambiental  
Facultad de Ingeniería Ambiental Universidad de Medellín.*

**Carlos Sierra Ramírez**

*Ingeniero Sanitario, Msc.  
Subgerencia Aguas Residuales - EE PP M  
Profesor catedrático Universidad de Medellín*

**Francisco Molina Pérez**

*Ingeniero Sanitario, Msc. Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia*

## RESUMEN

Dada la complejidad de un ecosistema acuático y la imposibilidad de realizar experimentos a escala real, el ingeniero de calidad de aguas representa las diferentes reacciones e interacciones, que ocurren en estos ecosistemas, por medio de modelos matemáticos. Esto constituye una poderosa herramienta que permite el desarrollo de estudios prospectivos y el apoyo a la toma de decisiones.

Este artículo presenta una propuesta de integración que permite asociar las capacidades de análisis espacial y representación visual de SIG, con los resultados obtenidos tradicionalmente de los modelos de calidad del agua, de tal forma que se aumente la interacción con el usuario de la información, y se desarrollan nuevas herramientas que ayudan en la toma de decisiones y la administración del recurso hídrico.

## ABSTRACT

Given the complexity of an aquatic ecosystem and the impossibility of making experiments on a real scale, the water quality engineer represents the different reactions and interactions, that happen in these ecosystems using mathematical models. This constitutes a powerful tool that allows prospective studies and helps in the decision making.

On the other hand, the huge volumes of information produced by the geographical space analysis and the large amount of variables involved, make the Geographical Information Systems (GIS) a powerful tool to develop analysis, modeling and simulation tasks on a defined area and the processes related to it.

This article presents an integration proposal that permits to associate both, the spatial analysis and the visual representation capabilities of a GIS application with the water quality results obtained from a mathematical model, in such a way that, the interaction of the users of the information get increased, and the development of new tools helps in the decisions making and administrative process in the management of the water resources.

## INTRODUCCIÓN

La gestión de la calidad del agua se fundamenta en los conceptos de sistema y de mejoramiento continuo a través de ciclos de retroalimentación, que permiten que el usuario se acerque cada vez más a metas establecidas. Los principales componentes del sistema de gestión de un recurso hídrico se esquematizan en la Figura 1.

Las entradas corresponden tanto a las variables naturales del sistema, como caudal, velocidad, secciones hidráulicas, etc., como a las variables antrópicas: descargas de aguas residuales, captaciones y adiciones de caudal, etc.

Las reacciones y el transporte físico, se relacionan con las transformaciones e interacciones físicas, químicas y biológicas que sufren las sustancias y compuestos presentes en la corriente o cuerpo de agua, cuyo resultado son los diferentes niveles de calidad del agua en el tiempo y espacio del ecosistema acuático.

Dada la complejidad de los ecosistemas acuáticos y la imposibilidad práctica de realizar experimentos a escala real, el ingeniero de calidad del agua representa las distintas reacciones e interacciones que ocurren en estos ecosistemas por medio de modelos matemáticos, reemplazando el modelo real por el modelo que lo simula; de esta manera se construye una herramienta que permite hacer prospectiva y tomar decisiones.

Las salidas, son las concentraciones resultantes de las sustancias estudiadas (oxígeno disuelto, nutrientes, etc.) en el cuerpo de agua, con lo cual se configura la calidad del agua del sistema en un tiempo específico y en un lugar determinado.

Las metas de calidad del recurso, están relacionadas generalmente con un deseo concertado entre los usuarios e interesados y un ente de control y regulación; de esta manera, a través de audiencias públicas, legislación y evaluación, se establece el uso deseable del agua para una región particular.

Tal uso deseable se traduce en normas de salud pública y ambientales que luego se comparan con las concentraciones de las sustancias en el cuerpo de agua o corriente. De esta comparación entre lo deseado y lo real, si la concentración actual o proyectada de las sustancias no es igual a la deseada, resulta generalmente la necesidad de implantar medidas de control.

Las medidas de control se diseñan para las descargas, a fin de reducir la concentración real. En la ingeniería ambiental, el estudio de varias alternativas de control para llegar al mismo objetivo, maximizando el impacto positivo de las medidas y minimizando el costo de las mismas, constituye el eje central dentro del proceso de toma de decisiones en la gestión de la calidad del agua.

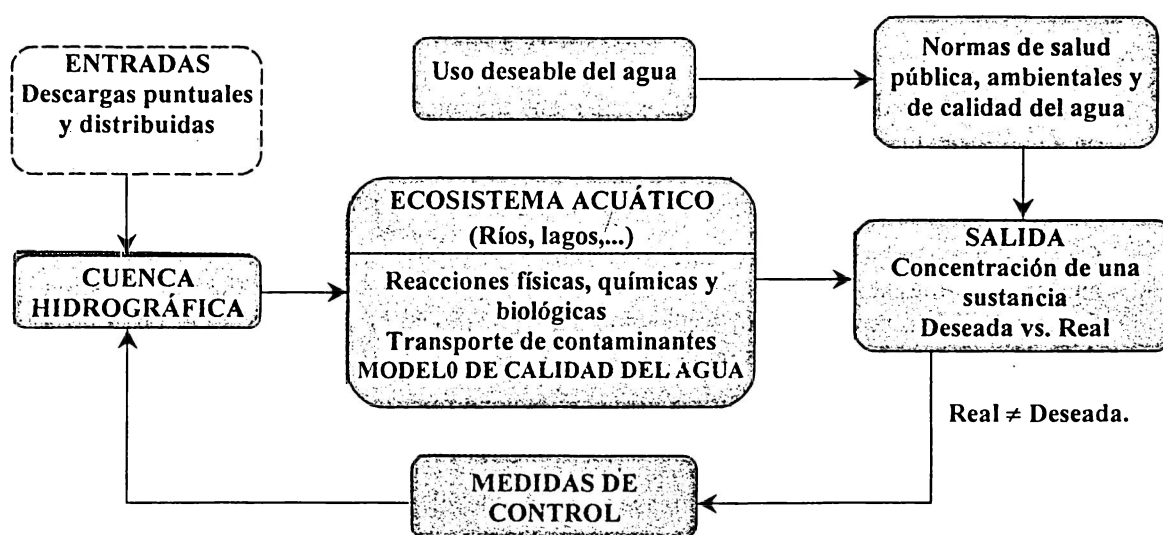


Figura 1. Ingeniería de la calidad del agua.

## LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA COMO HERRAMIENTA QUE CONTRIBUYE A LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden definirse como una serie de herramientas que permiten a los estudiosos de los fenómenos espaciales, integrar datos y métodos, superando las limitantes impuestas por el manejo manual de grandes cantidades (volúmenes) de información, y la simulación de fenómenos complejos, en los cuales intervienen numerosas variables.

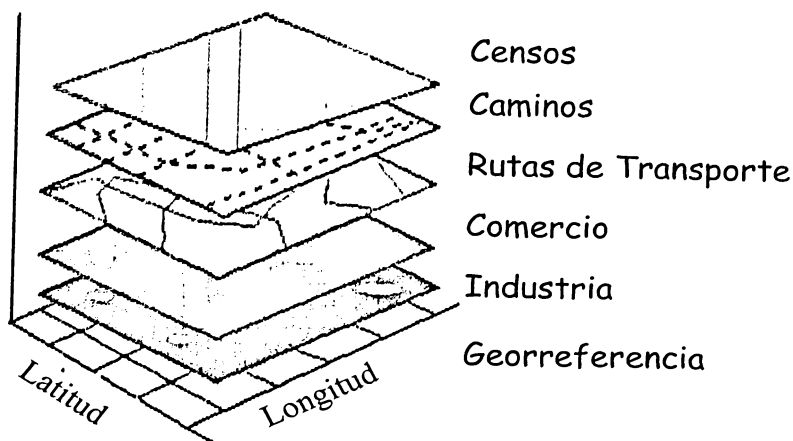
Un Sistema de Información Geográfica es una colección organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y visualizar eficientemente todas las formas de información geográficamente referenciada.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el principal potencial de un SIG es el análisis espacial y el apoyo a la toma de decisiones. Estos procesos en la mayoría

de los casos, se circunscriben a proyectos específicos y/o áreas geográficas limitadas, donde se puede garantizar las características de los datos (precisión, continuidad, complejidad, etc.).

Expresado de otra forma, un SIG es una herramienta que permite representar el mundo real que es completo, grande y complejo, como un modelo que es una porción, simplificada y para un uso específico, a través de una abstracción constituida por una base de datos espacial.

Una base de datos espacial puede visualizarse como un apilamiento de capas de información de características homogéneas, que tienen como elemento común su posición en el espacio (Ver Figura 2), lo cual origina una de las cualidades más relevantes de los sistemas de información geográfica, es decir, la capacidad para modelar y simular integralmente variables y procesos que tengan una presencia o incidencia geográficamente determinada, a través de algoritmos matemáticos y árboles de decisión booleana.



**Figura 2.** Representación esquemática de una base de datos espacial.

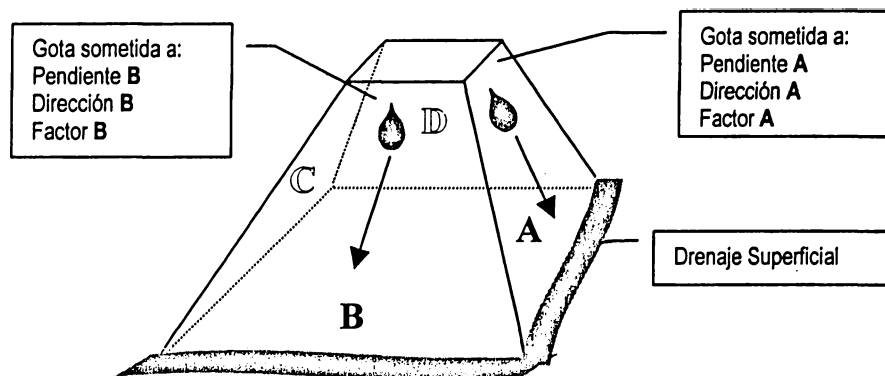
*Fuente: pagina Web Department of Geography, University of Colorado " The Geographer's Craft".*

En lo que se refiere a la modelación de sistemas hídricos, un SIG aporta los instrumentos necesarios para determinar el estado actual y la génesis de un espacio geográfico sometido a las leyes naturales y/o a la intervención antrópica.

Sí en un sistema hídrico, el régimen de escorrentía se rigiera por factores tan simples como la pendiente del terreno, la dirección de la pendiente, y un factor de aceleración o retardo de la escorrentía determinado

por parámetros diversos, una corriente superficial, en este sistema, sería alimentada por la sumatoria de todas las gotas de lluvia que se depositen en su área de influencia.

Para cada una de las gotas de agua que se deposite sobre el terreno, se cumpliría que su trayectoria hasta la corriente superficial sería determinada por la pendiente, por la dirección en la cual fluye y por los factores que retarden o aceleren su viaje (Ver Figura 3).



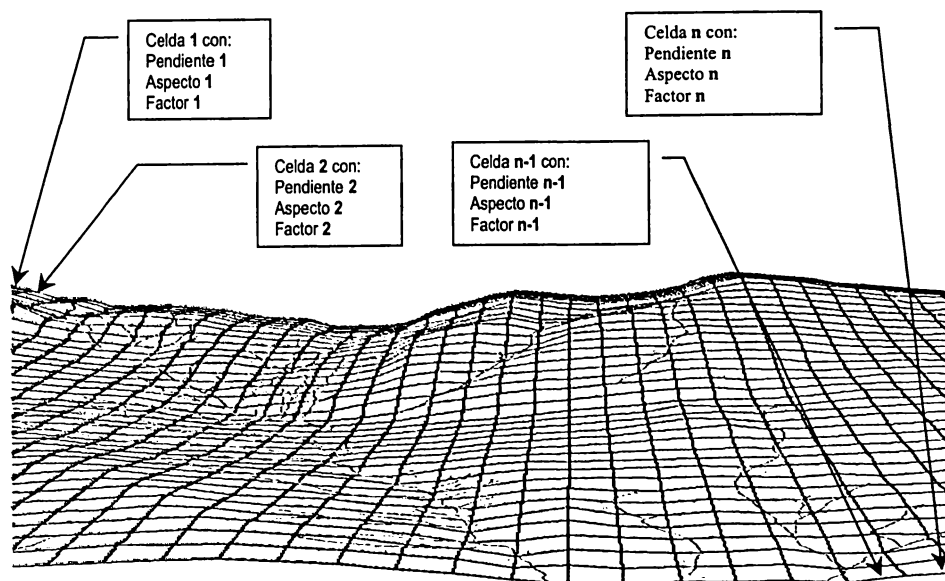
**Figura 3.** Modelo simplificado de la escorrentía superficial

Sin embargo, en el mundo real, estas condiciones tienen una alta variabilidad espacial, y los valores que rigen un metro cuadrado pueden ser substancialmente distintos de los de sus vecinos; por lo tanto es necesario que los análisis se realicen considerando una discretización del espacio geográfico, y la división de éste en celdas<sup>1</sup> donde una o más propiedades presenten un comportamiento homogéneo (ver Figura 4).

Lo anterior es matizado por la gran cantidad de variables que intervienen en la escorrentía superficial, entre las cuales se pueden nombrar: usos del suelo,

tipo de suelos, cantidad y calidad de la cobertura vegetal, evaporación, infiltración, presencia de redes viales y de drenajes artificiales, entre muchas otras.

Los grandes volúmenes de información producidos por el análisis del espacio geográfico a través de celdas discretas, y la gran cantidad de variables involucradas, cada una de las cuales es, en la mayoría de los casos, el resultado de procesos dinámicos en el espacio y en el tiempo, hacen de los SIG, una herramienta privilegiada para el desarrollo de los análisis, la modelación y la simulación de un territorio geográfico determinado.



**Figura 4.** Representación del mundo real a través de un SIG.

<sup>1</sup> En un SIG el tamaño de mínimo de celda, será determinado por la escala de las fuentes de información y por los objetivos del estudio

Retomando el esquema ilustrado en la Figura 2, el Sistema de Información Geográfica (cualquiera que éste sea), puede llegar a cumplir tareas fundamentales, en:

- La determinación de las entradas: identificación, espacialización y cuantificación de las cargas puntuales y distribuidas.
- El cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca y la identificación de coberturas y usos.
- La identificación de tramos de análisis, tanto en caudales principales como afluentes, para alimentar el modelo de calidad de aguas.
- La corroboración de estándares y requerimientos ambientales y legales, a la luz de la normatividad y los planes de ordenamiento territorial
- El aporte de salidas gráficas de los resultados, con una alta posibilidad de interacción con el usuario de la información.
- La determinación del impacto de las medidas de control, a través de la construcción de escenarios basados en múltiples objetivos.

## OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN

No todos los problemas relacionados con la calidad del agua se pueden estudiar o analizar utilizando modelos. Básicamente, un modelo de calidad del agua es una herramienta de planeación que permite a las autoridades encargadas de manejar un recurso hídrico y a las comunidades involucradas, tomar decisiones o seleccionar alternativas.

Por esta razón, es importante tener claro en qué tipo de situaciones se necesita modelar y cuál es el proceso normal de un estudio de modelación.

**¿Qué problemas de calidad del agua en una corriente o cuerpo de agua se pueden resolver a través de la modelación?**

Los siguientes estudios son los que comúnmente se realizan utilizando un modelo de calidad del agua:

*Determinar la capacidad asimilativa de una corriente*

Pertenece a este tipo de estudios los análisis que se realizan cuando se quieren establecer normas de calidad del agua, así como, los estudios destinados a obtener o determinar metas ambientales.

### *Otorgar permiso de vertimientos*

Los modelos de simulación son herramientas prácticas, cuando se requiere evaluar el efecto en la calidad del agua de una carga contaminante. Se entiende por carga contaminante, las descargas puntuales de efluentes como el alcantarillado de un municipio, una industria, la entrada de un tributario, etc. También se puede analizar el efecto de cargas distribuidas (escorrentía). Las autoridades ambientales pueden utilizar esta información para aprobar la ubicación de una industria, la localización o justificación de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales.

### *Evaluar las variaciones diarias de temperatura y oxígeno disuelto*

No es raro que en determinados cuerpos de agua existan cantidades apreciables de oxígeno durante el día (producido por la fotosíntesis) pero que, durante la noche, se agote (como resultado de la respiración). Como consecuencia de este fenómeno, se puede presentar la mortalidad de especies biológicas que no soporten estos cambios.

### *Estudiar la respuesta de la calidad del agua en la corriente ante eventos especiales*

Tales como cambios bruscos en la concentración de una descarga, efectos de una tormenta, etc.

## PROCESO DE MODELACIÓN

Recuérdese que un modelo de calidad del agua es sólo una etapa en el esquema global del manejo de un recurso hídrico (ver Figura 1). El proceso general recomendado por los expertos para desarrollar la modelación de la calidad del agua se muestra en la Figura 5. A continuación se ilustran cada uno de los pasos.

### **Especificación del Problema**

En esta fase se combinan dos fuentes de información. La primera está relacionada con las autoridades encargadas de administrar el recurso hídrico, las cuales deben establecer los criterios de calidad, el presupuesto, las metas ambientales, etc.

La segunda fuente de información son los datos

relacionados con la calidad del agua (muestreos preexistentes), los datos climatológicos y los datos morfológicos (área de la cuenca, geometría del cuerpo de agua, etc.). En nuestro medio, por lo general, esta información o se encuentra muy dispersa o no existe.

Cuando esta fase está completa, el modelador tiene una idea clara de los objetivos de la modelación y tiene identificadas las variables principales que gobiernan la calidad del agua.

## Selección del Modelo

En esta fase, el modelador tiene dos opciones: utilizar un modelo existente o desarrollar su propio modelo de simulación. Generalmente, es preferible seleccionar la primera alternativa, porque ya alguien ha hecho el trabajo; y además, porque en el mercado existen software que gozan de alta credibilidad y han sido ampliamente utilizados.

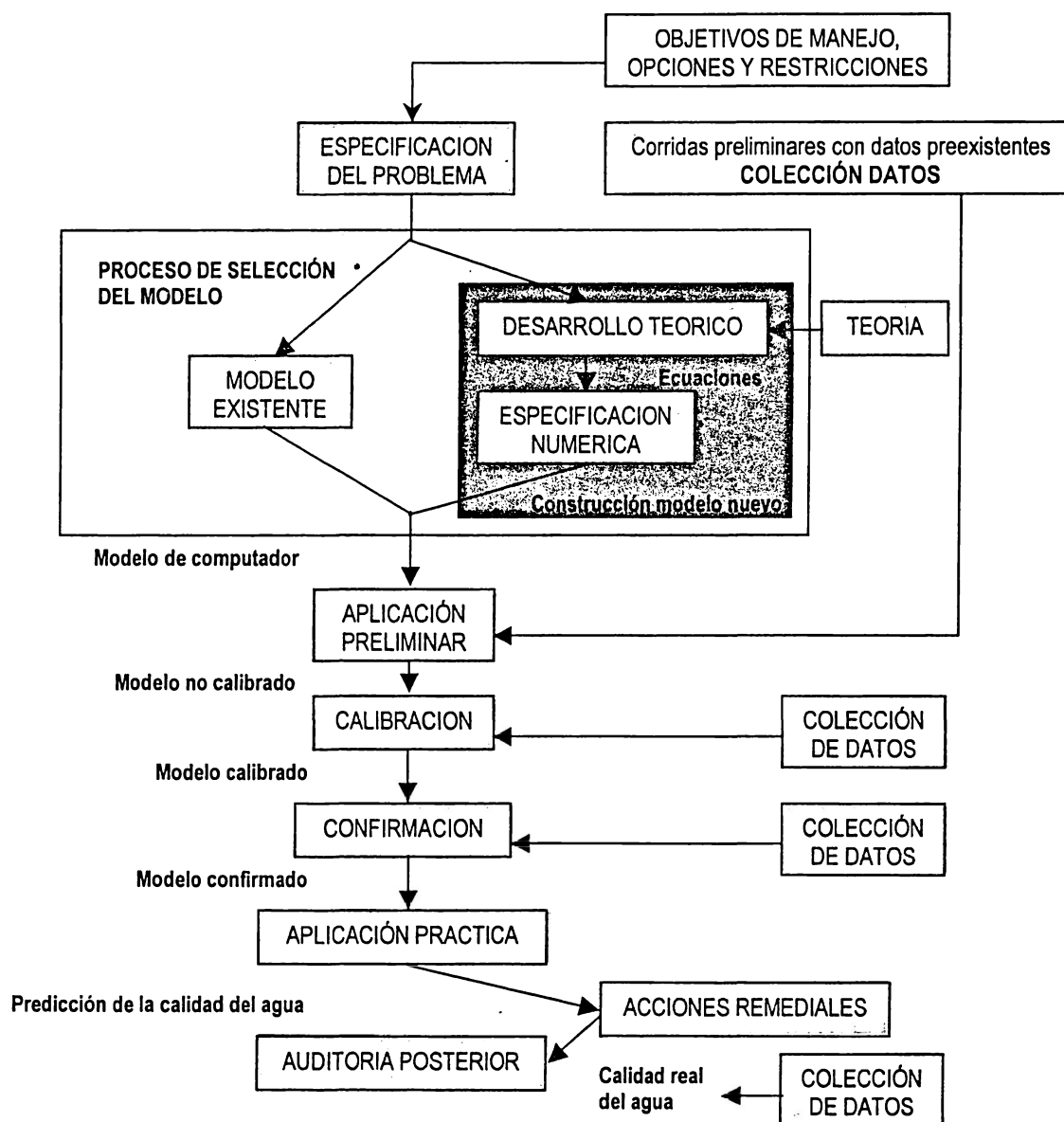


Figura 5. Proceso de modelación de la calidad del agua

Sin embargo, se presentan situaciones especiales, en las cuales no es posible utilizar el software disponible en el mercado, por ejemplo, cuando es necesario investigar un determinado parámetro que ningún modelo comercial incluye.

Las características básicas que debe cumplir la selección del modelo son las siguientes:

- El problema debe estar definido lo mejor posible; es un error proceder en forma contraria, es decir, tener un modelo y utilizarlo para estudiar todos los problemas de calidad del agua que se presentan.
- El modelo debe tener la capacidad de simular los parámetros fundamentales de contaminación: materia orgánica (DBO, Demanda Béntica, OD), sólidos suspendidos, el ciclo del nitrógeno ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ) y del fósforo (orgánico y ortofosfatos) y coliformes. Permitiendo la evaluación del impacto de fuentes puntuales y distribuidas.
- El modelo debe contar con flexibilidad suficiente para introducir la simulación de otros parámetros que el estudio requiera. Esto significa que el modelo se pueda modificar fácilmente para involucrar el algoritmo que se necesite.

Los criterios específicos para realizar la selección del modelo se exponen a continuación.

### ***Estado del conocimiento***

Los modelos que incluyen en sus algoritmos los conocimientos más actualizados con respecto al comportamiento hidráulico y de calidad del agua, se consideran más exactos que los que no los contienen. Es importante mencionar que hay varios modelos disponibles en el mercado colombiano, y que las entidades que los han desarrollado los actualizan constantemente en sus aspectos de informática y de calidad del agua. Este hecho los hace preferibles sobre otros.

### ***Complejidad computacional***

La complejidad de los elementos de computación debe ser considerada junto con la precisión, no debiéndose confundir los términos complejidad - precisión. La complejidad del modelo se refiere a las técnicas de programación (lenguaje de programación, algoritmo para resolver ecuaciones diferenciales, etc.) mientras que la precisión se refiere a la habilidad de representar el comportamiento del recurso hídrico. Un modelo de computador para simular la calidad del

agua, que sea muy complejo, no es necesariamente más preciso. Además, los modelos menos complejos son en algunos casos más convenientes de utilizar, por ejemplo, cuando hay pocos datos disponibles y se requiere de una evaluación inicial.

### ***Accesibilidad***

En el mercado existen modelos comerciales y de dominio público. Obviamente, es preferible seleccionar un modelo de dominio público (distribución gratuita), siempre que tenga la capacidad de resolver el problema planteado.

### ***Experiencias previas con el modelo***

A los modelos que ya han sido utilizados por otras entidades se les conocen sus ventajas y desventajas o las mejoras que les han realizado.

### ***Documentación - Manuales de usuario***

La facilidad con que se pueda aplicar un modelo de computador para simular la calidad del agua, depende del grado de la documentación escrita que lo acompañe. Esta documentación debe incluir las formulaciones matemáticas, las técnicas de solución de las ecuaciones incluidas en el algoritmo (diferencias finitas, etc.), descripción de los datos de entrada, formatos de entrada y salida.

### ***Costos***

Los costos de preparar la información y ejecutar los modelos de simulación son bajos, si se comparan con los costos totales de un programa de control de la contaminación de un recurso hídrico. Sin embargo, es necesario comparar los costos de utilizar las diferentes alternativas de modelos.

Los modelos más conocidos y utilizados en nuestro medio, para simular el comportamiento de la calidad del agua, son los siguientes: QUAL 2E, WASP5, RIOS3, CODOS.

### ***Aplicaciones Preliminares***

Dado que en nuestro medio generalmente no se cuenta con la suficiente información para alimentar un modelo de simulación, las aplicaciones preliminares son supremamente útiles para identificar la información requerida y optimizar el trabajo evaluando los parámetros que más influencia presentan en los resultados.

## Calibración

Después de seleccionar el modelo y haber realizado las corridas preliminares, es necesario calibrar el modelo. Este proceso consiste en lograr que los resultados o predicciones arrojados por el modelo reproduzcan los datos de calidad del agua obtenidos en los muestreos de campo.

Los datos de campo (muestreos) que se utilicen para calibrar el modelo, deben haberse obtenido en condiciones similares a las condiciones bajo las cuales se va a estudiar o se tiene planteado el problema. Por ejemplo, si el modelo se va a utilizar para analizar el efecto de una descarga de aguas residuales sobre una corriente, el análisis debe hacerse bajo las condiciones más desfavorables, es decir, cuando existan caudales bajos en la corriente. Por lo tanto, los muestreos o datos deben referirse a la época de verano.

Después de que se han seleccionado los datos para calibrar el modelo, se detecta que son muchos los parámetros que se pueden variar en búsqueda del modelo calibrado. Sin embargo, existe un procedimiento de calibración recomendado.

Los parámetros que utiliza el modelo se pueden clasificar en dos grupos:

- Funciones directrices y parámetros físicos: parámetros hidráulicos (velocidad, curvas de calibración, etc.), condiciones de frontera y cargas contaminantes, condiciones iniciales y parámetros físicos (volumen, geometría, etc.)
- Parámetros por calibrar: parámetros cinéticos (constantes de reacción, coeficiente de extinción, etc.)

El proceso de calibración se muestra en la Figura 6. A continuación se hace una descripción de las diferentes etapas en que se realiza.

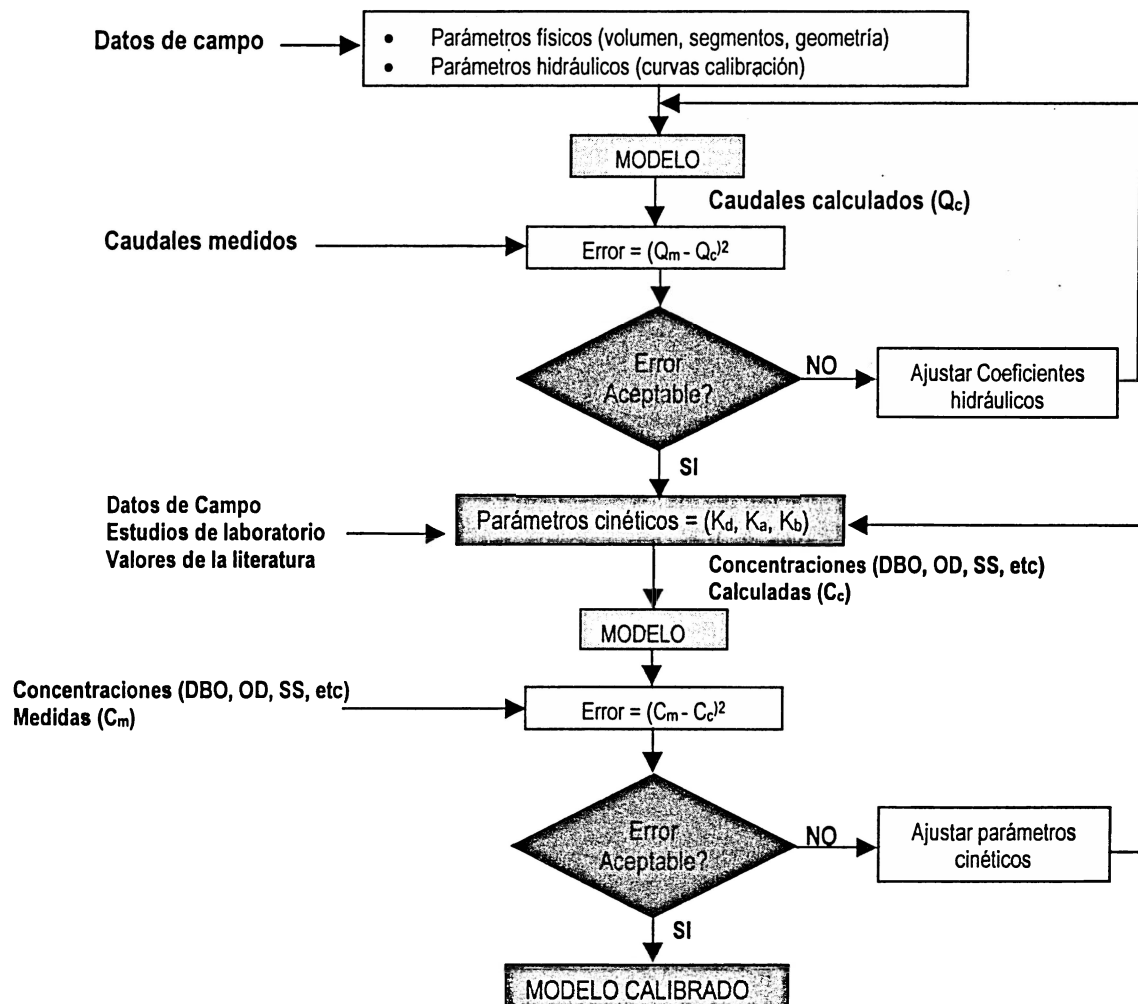


Figura 6. Proceso de calibración de un modelo de calidad del agua



### ***Balance hidráulico***

El primer paso consiste en calibrar el balance hidráulico; cuando los caudales predichos por el modelo tienen una diferencia aceptable con los caudales reales del cuerpo de agua, se procede a calibrar los parámetros de calidad del agua, de lo contrario es necesario ajustar los coeficientes hidráulicos hasta obtener una diferencia aceptable.

### ***Parámetros de calidad***

Para calibrar los parámetros de calidad del agua como SS, OD y DBO, se requiere que se midan en el laboratorio las constantes de reacción y demás constantes cinéticas, o que se obtengan de la literatura. Estas constantes son la constante de oxidación de la materia orgánica, la constante de remoción de DBO por sedimentación, la constante de reaeración, etc. Los valores de las concentraciones calculadas con el modelo se comparan con los valores de las concentraciones medidas en el campo. Si la diferencia entre estas concentraciones no es aceptable, se deben ajustar los valores y volver a correr el modelo (nótese que no es necesario nuevamente calibrar hidráulicamente el modelo). Cuando se logre que el modelo reproduzca aceptablemente los valores de las concentraciones medidas en el campo, se considera que el modelo está calibrado.

### ***Confirmación***

Cuando el modelo se encuentra calibrado, se está seguro que el modelo es capaz de reproducir los datos de un muestreo o estudio de campo. Sin embargo, para que el modelo sea confiable y se pueda utilizar bajo diferentes eventos, es necesario confirmarlo. El proceso de confirmación consiste en correr el modelo ya calibrado, dejando fijos las constantes y parámetros cinéticos y variando lo que se conoce como variables direccionadoras. Es decir, correr el modelo cambiando las condiciones extremas; por ejemplo, si el modelo se calibró utilizando caudales mínimos, confirmar el modelo utilizando caudales altos.

Cuando el modelo es capaz de reproducir las condiciones de calidad del agua bajo eventos extremos, se considera que el modelo está confirmado. Cuando el modelo calibrado no se logra confirmar, es necesario profundizar en el análisis e investigar las razones por las cuales el modelo no es capaz de reproducir las condiciones extremas. Hay

casos en los cuales es necesario cuestionar los datos de campo, o realizar estudios adicionales en el laboratorio.

Al proceso de confirmación originalmente se le conocía como verificación, pero el concepto ha cambiado. Anteriormente, se consideraba que, cuando un modelo estaba verificado era capaz de reproducir todos los fenómenos de calidad del agua que se presentaban en el recurso hídrico. Con el tiempo se ha demostrado que esto no es absolutamente cierto. Dado que un modelo no puede representar en un 100% un sistema real, es necesario confirmar periódicamente el modelo.

### ***Aplicaciones de Manejo***

Muchos de los estudios de modelación de calidad del agua concluyen recomendando acciones remediales. Por ejemplo, proponen la construcción o mejora de una planta de tratamiento de aguas residuales o sugieren la restricción en ciertos usos del suelo. La efectividad de estas acciones se puede evaluar modificando las funciones principales (Cargas contaminantes, aguas de dilución, etc.) y corriendo el modelo para analizar los cambios en las variables de estado (DBO, OD, SS, etc.)

### ***Auditoría Posterior***

El modelo confirmado se utiliza frecuentemente para predecir la calidad del agua que se espera bajo una variedad de escenarios potenciales. Sin embargo, es raro que, después de una predicción y la subsiguiente implementación de un programa de control ambiental, se haga un análisis de la capacidad real del modelo para predecir la contaminación del agua. Esto puede definirse como una "post-auditoría" del modelo. Por lo tanto, se sugiere una etapa para determinar la credibilidad del modelo.

### ***EJEMPLO***

A continuación, se ilustra la aplicación de los sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo en la modelación y la simulación de la calidad del agua, a través de un ejemplo que involucra una porción del Valle del Aburrá y un tramo de 81 kilómetros del río Medellín.

En la construcción de este ejemplo, se utilizaron softwares de amplio uso en nuestra región, de tal

forma que experiencias similares pueden ser replicadas sin la necesidad de contar con plataformas demasiado complejas y costosas.

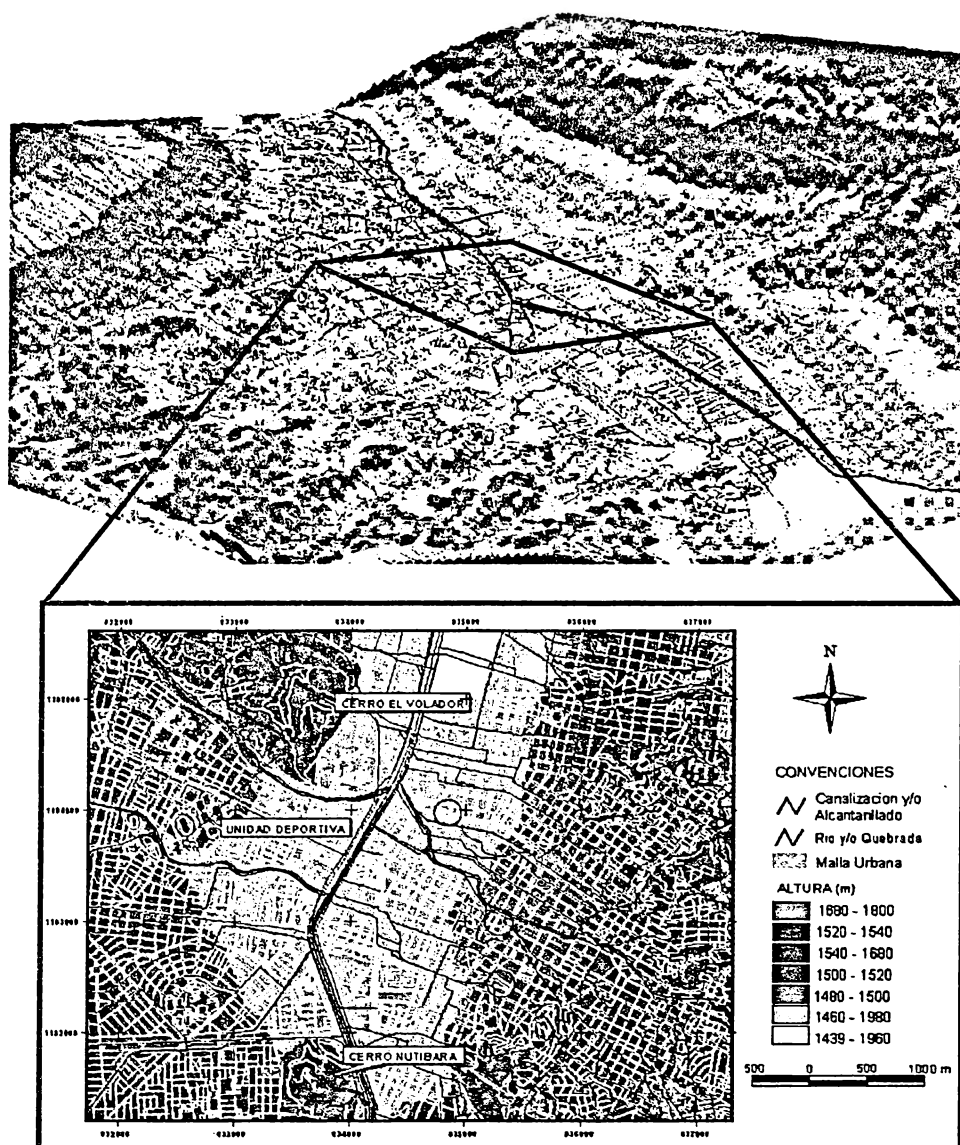
Los softwares utilizados fueron:

- ArcView modulo básico, ArcView 3D Analyst y ArcView Spatial Analyst, para los procesos relacionados con visualización, modelación y simulación espacial.
- QUAL2E, para la simulación del comportamiento de la calidad del agua.
- Excel, para la transformación de los datos tabulares

(arrojados por el software QUAL 2E) en bases de datos.

El análisis se desarrolló por medio del siguiente procedimiento:

1. Obtención de una perspectiva espacial del sistema que se analiza e identificación de los elementos relevantes que permitirán estructurar y calibrar el modelo, como por ejemplo: red de drenajes (natural y artificial), usos del suelo y ubicación de elementos puntuales relevantes (como, por ejemplo, una planta de tratamiento de aguas), ver Figura 7.



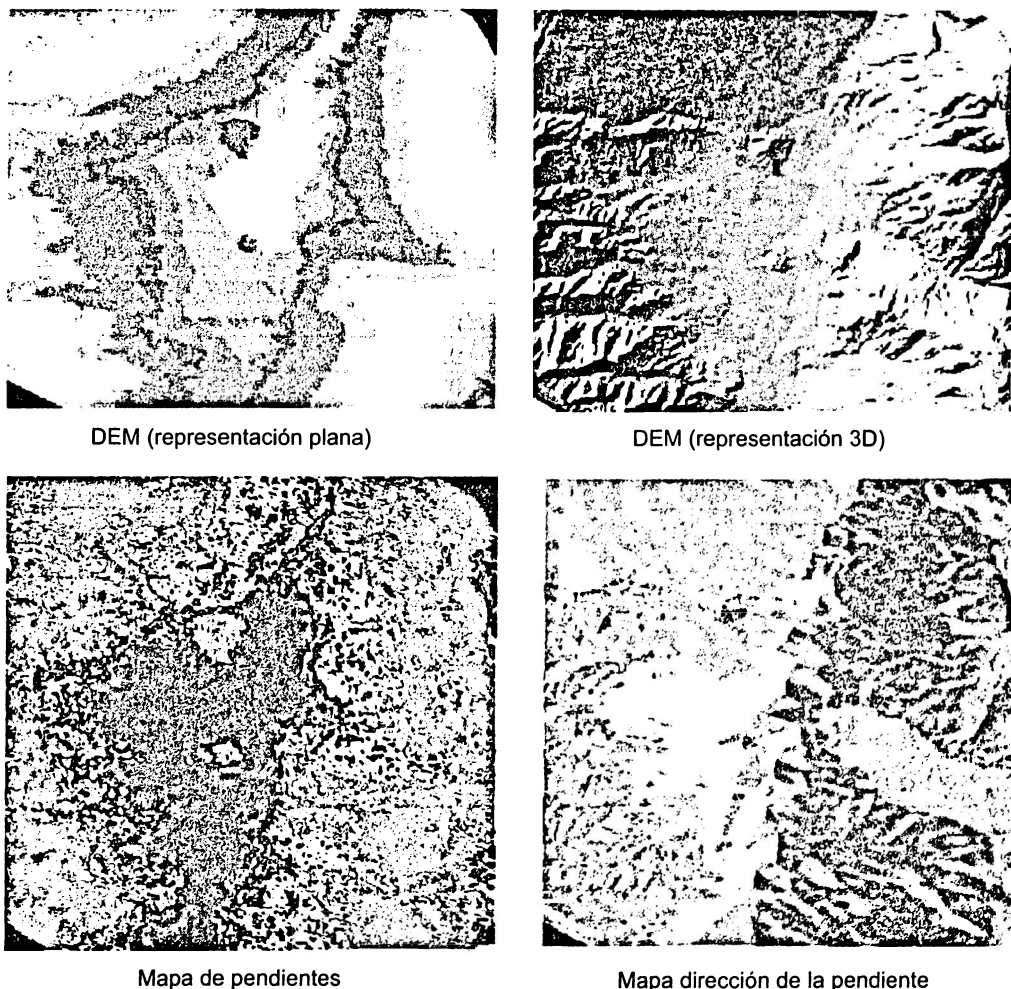
**Figura 7.** Modelo tridimensional del Valle del Aburrá con red hídrica e infraestructura principal.

*Detalle: capas temáticas involucradas en el análisis espacial (infraestructura, altimetría, red de drenajes y alcantarillado).*

2. Obtención de una ponderación del comportamiento de las cargas distribuidas en el área de análisis.

En este objetivo es de gran valor la modelación del comportamiento de la escorrentía superficial,

la cual se obtiene a partir del modelo de elevación digital (DEM: Digital Elevation Model), el cual a su vez permite el cálculo de pendientes y direcciones de la pendiente (Ver Figura 8).



**Figura 8.** Mapas utilizados en el cálculo de la escorrentía superficial y aportes por cargas distribuidas.

Las cargas distribuidas se determinan mediante la ecuación racional:

$$W = 24.192 * C * i * A * [C_s]$$

Donde:

$W$ : Carga [kg/día]

$C$ : Factor que es función del tipo de suelo, cobertura y uso, principalmente [adimensional]

$i$ : Factor que depende de la intensidad de las lluvias [mm/hr]

$A$ : Área de la zona aportante [km<sup>2</sup>]

$[C_s]$ : Concentración de la sustancia contaminante [mg/L]

El modelo de unidades de escorrentía superficial puede determinarse de acuerdo con las características topográficas de la zona de estudio, a través de un procedimiento que puede resumirse en los siguientes pasos:

- Obtención de un modelo digital de elevaciones (DEM) a partir de las curvas de nivel.
- Obtención de un modelo de pendientes a partir del DEM:
- Obtención de un modelo de tendencias (dirección de la pendiente) a partir del DEM

- Identificación de las áreas de aporte y acumulación a partir de los tres modelos anteriores.

El resultado de esta modelación coincidirá con las microcuencas existentes en el área de estudio, con un grado de aproximación que dependerá de las reglas de decisión con las cuales se alimente el proceso, como por ejemplo, el tamaño mínimo de la unidad.

Cada una de estas unidades constituirá un área de recolección de aguas lluvias, es decir el parámetro  $A$  de la ecuación anterior (ver Figura 9).

El coeficiente  $i$ , que es obtenido de curvas de intensidad

- frecuencia - duración, puede ser espacializado, en cada una de las unidades identificadas, a partir de datos puntuales los cuales se interpolan para obtener una superficie continua de distribución del coeficiente.

De igual forma puede construirse un mapa de distribución del coeficiente  $C$ , por medio de operaciones algebraicas realizadas con mapas de coberturas, suelos, y usos, distribución del coeficiente  $i$ . Al mapa resultante se le asocia una base de datos, extractada de la bibliografía, con los coeficientes  $C$  (distribuidos por uso y condiciones hidrológicas). La siguiente tabla ilustra un ejemplo de este tipo de base de datos:

| <i>Coeficiente C para suelo del grupo B en cuencas de uso agrícola</i> |   |           |           |
|--|---|-----------|-----------|
| Practica agrícola y condiciones hidrológicas                           | <i>Coeficiente C para precipitaciones de:</i> |           |           |
|  | 25 mm/hr                                      | 100 mm/hr | 200 mm/hr |
| Cultivos en surcos, pobre práctica                                     | 0.63  | 0.65      | 0.66      |
| Cultivos en surcos, buena práctica                                     | 0.47  | 0.56      | 0.62      |
| Grano pequeño, pobre práctica  | 0.38  | 0.38      | 0.38      |
| Grano pequeño, buena práctica  | 0.18  | 0.21      | 0.22      |
| Pastizales, permanente, buena práctica                                 | 0.29  | 0.36      | 0.39      |
| Pastizales, rotación, buena practica                                   | 0.02  | 0.17      | 0.23      |
| Bosques, maduros, buena práctica                                       | 0.02  | 0.10      | 0.15      |

Fuente: ITC. Ilwis 1.1: Applications Guide.

La concentración de la sustancia contaminante  $[C_S]$  puede obtenerse, al igual que el coeficiente  $i$ , a partir de interpolaciones bilineales de datos puntuales.

Ya conocidas todas las variables, el cálculo final de  $W$  será una multiplicación de los atributos en cada una de las celdas del terreno.

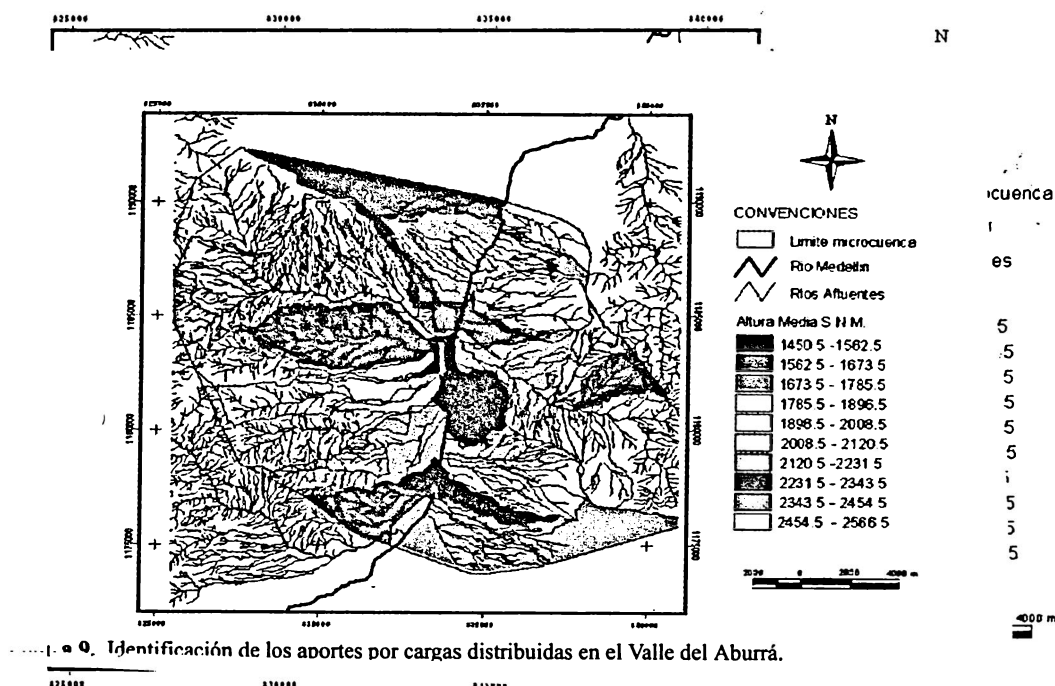
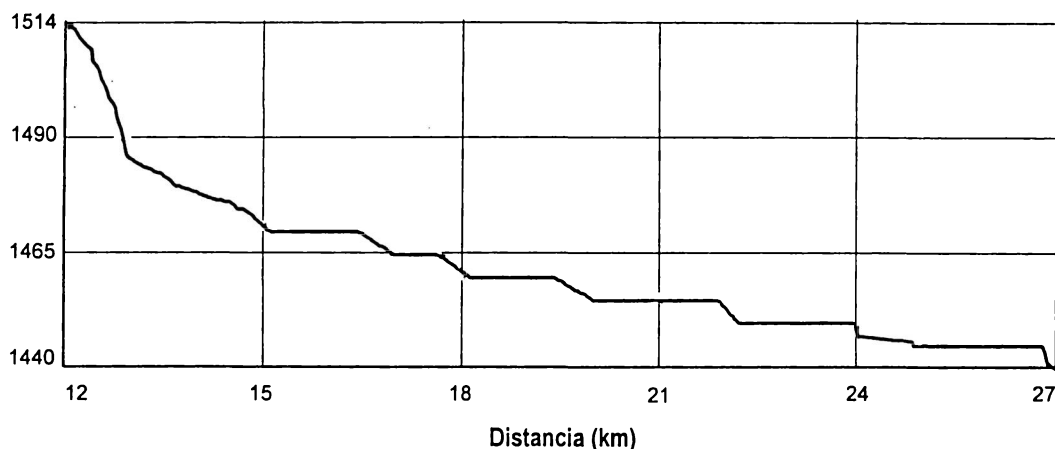


Figura 9. Identificación de los aportes por cargas distribuidas en el Valle del Aburrá.

3. Obtención de todos los parámetros morfométricos de la cuenca. Los mapas calculados en el paso 2, analizados en conjunto con la red de drenajes, permiten obtener en forma simple y rápida los

datos acerca de áreas de la cuenca y subcuencas, orden de las corrientes y subcuencas, y perfil altitudinal de las corrientes, entre muchos otros parámetros calculados

Altura (m.s.m). Exageración vertical 27 X



**Figura 10.** Perfil altitudinal del Río Medellín, a su paso por el municipio (kms 12-27)

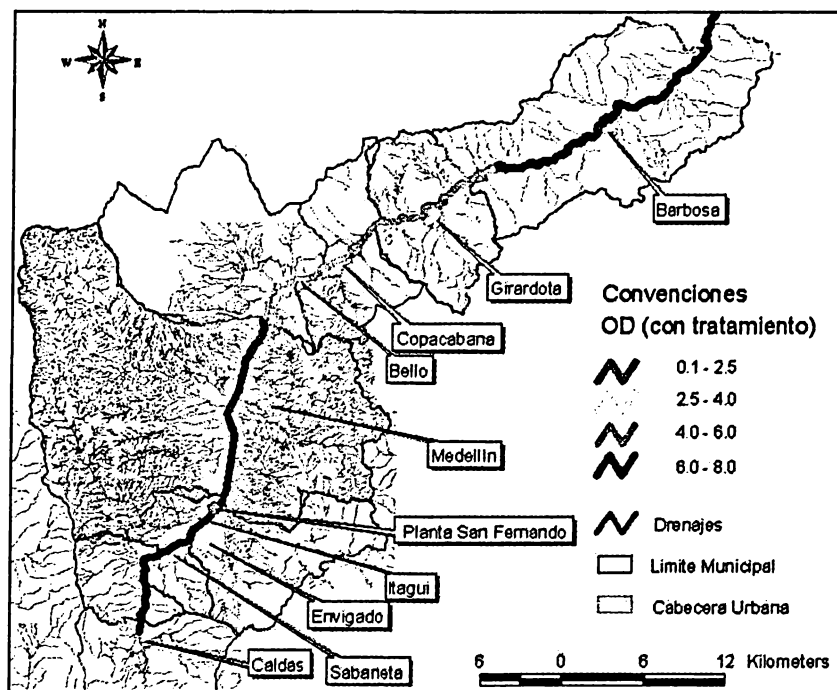
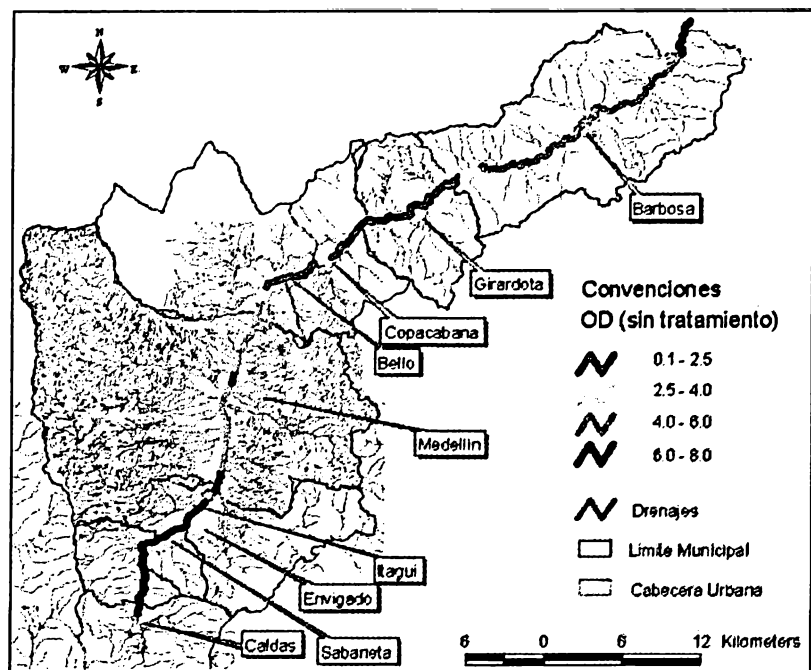
4. Con la información obtenida en los pasos anteriores, el (o los) analista(s) proceden a una discretización de la corriente en tramos y secciones, los cuales pueden ser alimentados al SIG, ya sea a través de una operación matemática que divida el vector que identifica la corriente principal, o por una sobre-digitalización de un nuevo elemento espacial; de tal forma que cada elemento discreto contenga un identificador (ID) que permita relacionar el elemento gráfico con la información que se obtendrá del modelo de calidad de aguas.
5. Posteriormente, se hacen las corridas pertinentes en el software de simulación de calidad de aguas, y se exportan los resultados en un formato de base de datos.
6. En el sistema de información geográfica, se relaciona la información en la base de datos obtenida de la simulación de la calidad de las aguas, con la base de datos del elemento espacial que se está analizando (Río Medellín).
7. Se presentan los resultados usando una simbología pertinente con el caso de estudio, y se

construyen gráficas del comportamiento de la(s) variable(s), de tal forma que el usuario reciba toda la información requerida. Ver Figuras 11 a 16.

El avance en la utilización de estas herramientas permitirá, hacia el futuro, el desarrollo de programas y algoritmos que realicen automáticamente el enlace de información entre los modelos de calidad de agua y los sistemas de información geográfica. De igual forma, muchos sistemas de información geográfica cuentan con módulos de programación, los cuales pueden ser alimentados con los algoritmos y rutinas utilizados en la modelación de la calidad del agua, lo que permitiría obtener un sistema integrado de análisis y apoyo a la toma de decisiones.

Es de resaltar que el uso cotidiano e integrado de estas herramientas en el estudio y resolución de problemas relacionados con la calidad hídrica indicarán la necesidad de actualizar, corregir o completar la información geográfica, especialmente la de carácter digital.

**Figura 11.** Oxígeno Disuelto (mg/L). Sin tratamiento



**Figura 12.** Oxígeno Disuelto (mg/L). Con tratamiento.

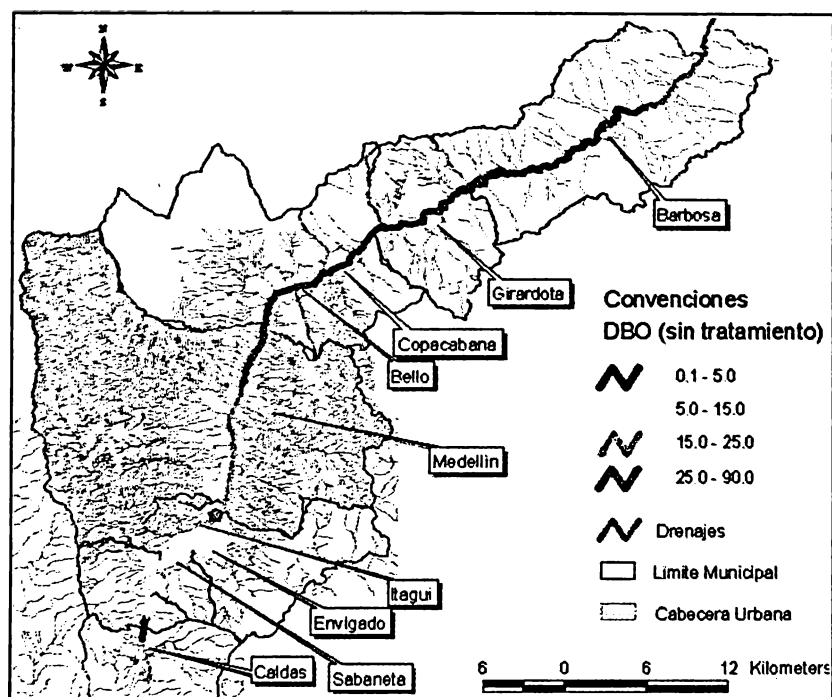


Figura 13. Demanda Biológica de Oxígeno (mg/L). Sin tratamiento.

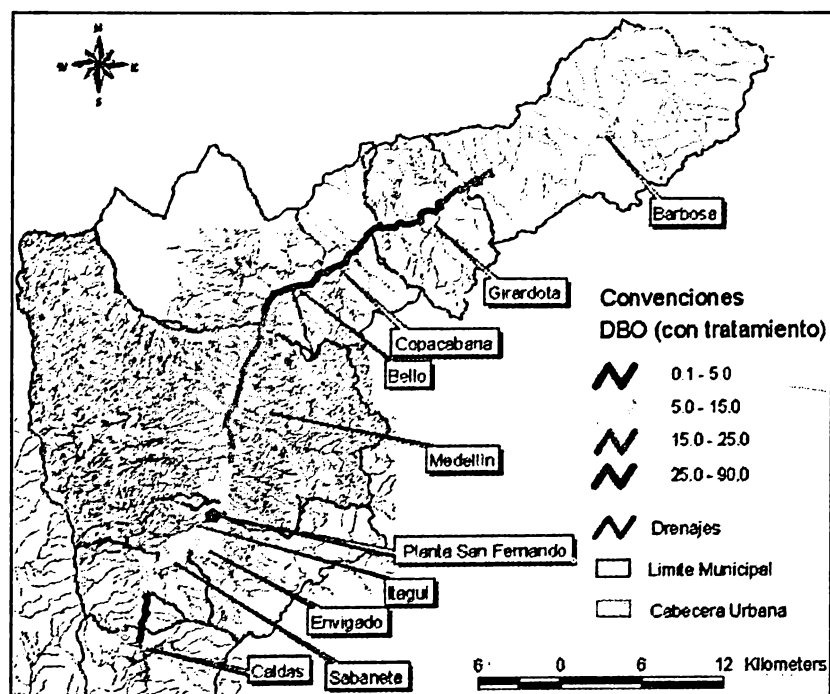
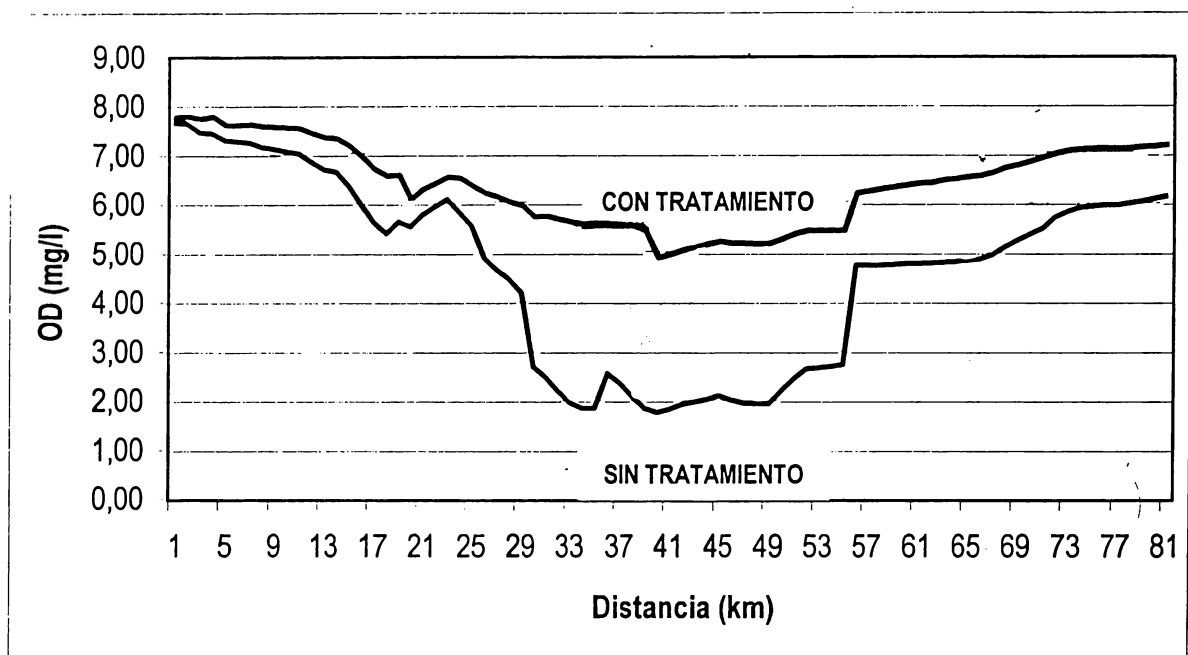
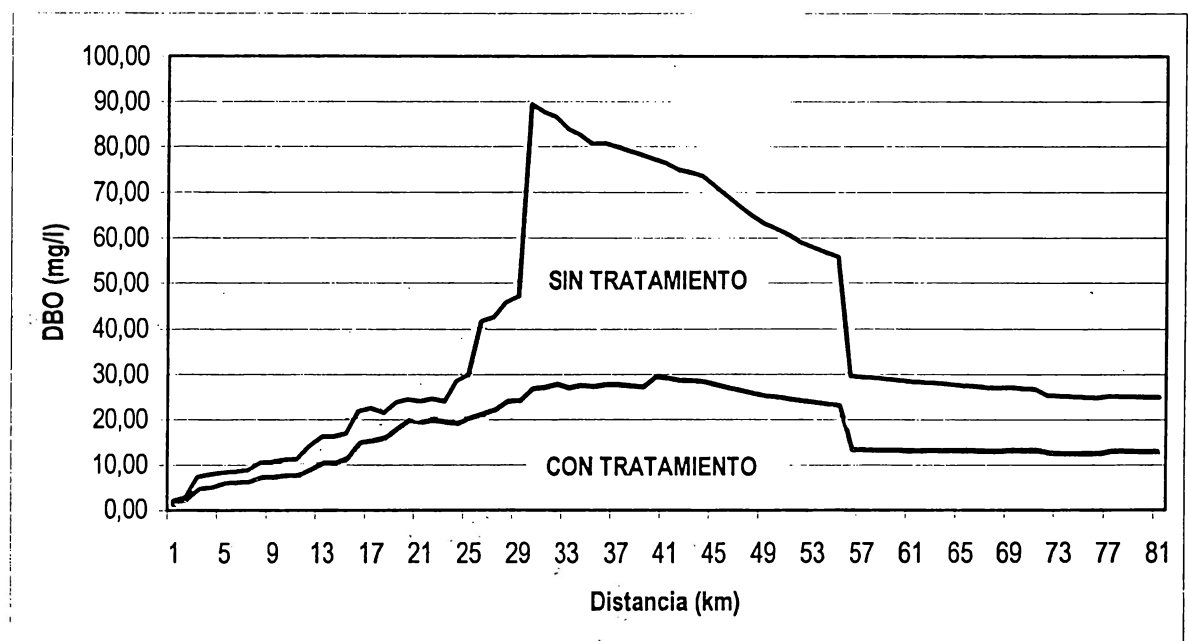


Figura 14. Demanda Biológica de Oxígeno (mg/L). Con tratamiento.



**Figura 15.** Comportamiento de la variable Oxígeno Disuelto, con tratamiento y sin tratamiento.



**Figura 16.** Comportamiento de la variable Demanda Biológica de Oxígeno con tratamiento y sin tratamiento.



## FUTURO DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUAS APOYADOS EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

En algunos países (que cuentan con bancos de datos con información abundante y que son actualizados continuamente, incluso en tiempo real) el uso de los SIG para el análisis, modelación y simulación de la calidad del agua, y como herramienta para el monitoreo, control y toma de decisiones, es una práctica habitual.

Con respecto a lo anterior, cabe resaltar ejemplos como el software BASINS, el cual ha sido diseñado y parametrizado para operar en un amplio rango de localizaciones geográficas en los Estados Unidos de América, de tal forma que se cumpla la reglamentación ambiental y se utilice la información de diversas agencias gubernamentales.

De otro lado, existen modelos locales, principalmente en grandes regiones industriales, en las cuales los parámetros de vertimiento y calidad del agua se controlan en tiempo real, y de hecho son sus resultados los que administran la operación de las plantas de depuración y tratamiento.

No obstante que aplicaciones de este tipo parezcan un poco lejanas para las posibilidades de países que, como el nuestro, tienen dificultades en cuanto a la información espacial, es posible desarrollar aplicaciones localizadas y avanzar hacia la construcción de herramientas que apoyen los procesos de administración de recursos, la planeación del manejo del territorio y la toma de decisiones.

De otro lado, cabe mencionar que la captura y actualización de información, utilizando técnicas modernas, como sensores remotos satelitales, sistemas de posicionamiento global y analizadores en línea, pueden contribuir a mitigar las deficiencias de información espacial confiable.

En la actualidad, los métodos utilizados dependen de la descripción del fenómeno o elemento del mundo real con base en sus atributos. Sin embargo, los seres humanos reconocen los "objetos" inmediatamente, en términos "globales".

Por lo tanto, se alcanzaría una mayor interactividad entre el usuario y la herramienta, si se pudiese organizar la información (grupos de atributos) en términos "globales", que el usuario pueda reconocer en función de su nombre (o concepto) natural. Este

argumento nos aproxima al concepto denominado *base de datos orientada a objetos*, en el cual el usuario se relaciona con la información en forma "intuitiva".

Independientemente de que modelos de calidad de aguas apoyados en SIG se desarrollen en torno a las bases de datos orientadas a objetos, un gran paso en el uso de esta herramienta estaría representado por el desarrollo de *Sistemas Expertos*, los cuales requieren al menos del cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Que estén conformados por bases de datos espaciales diseñadas para almacenar información acerca de relaciones espaciales, funcionales y lógicas.
- Que sea un sistema programable con la capacidad de realizar análisis complejos y cumplir con un conjunto de reglas en el procesamiento de los datos.
- Que involucre reglas y métodos (algoritmos) que constituyan un "espejo" de lo que un usuario experimentado podría comparar o juzgar.

Esto permitiría que usuarios diversos manejaran, en forma transparente y accesible, asuntos complejos que involucran conceptos como: la zonificación, ordenamiento territorial, el uso de la tierra y de los recursos, mediante procedimientos que puedan ser expresados a través de reglas de decisión.

Un poco más alejado (en el tiempo) puede ser el desarrollo y adopción de la inteligencia artificial para administrar la cantidad y calidad del agua en un sistema hídrico, no obstante que ya estén disponibles las tecnologías que permiten hacerlo.

## BIBLIOGRAFIA.

- Environmental System Research Institute. 1.996  
ArcView Gis. New York, Estados Unidos de América.
- Environmental System Research Institute. 1.996  
ArcView Spatial Analyst. New York, Estados Unidos de América.
- Environmental System Research Institute. . 1.996  
ArcView 3D Analyst. New York, Estados Unidos de América.
- International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences. Ilwis 1.1: Applications Guide.

- Esnchede, The Nwetherlans. 1.997.
- M. Lahlou, L. Shoemaker, et al. 2000. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources-BASINS, User's. United States Environmental Protection Agency. Fairfax, Virginia - EUA.
- Kenneth E. Foote and Donald J. Huebner. 1996. The Geographer's Craft Project, Department of Geography, The University of Colorado at Boulder.
- Thomann, R, V and Mueller, J, A, 1987. "Principles of Surface Water Quality Modeling and Control". Harper & Row, New York.
- Brown, L. C. and Barnwell, T. O., Jr. 1987. The enhanced Stream Water Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and Users Manual, U. S. Environmental Protection Agency, Athenas, GA, Report EPA/600/3-87/007
- Chapra, S. C. 1997. "Surface Water Quality Modeling". McGraw-Hill, New York

## AGRADECIMIENTOS

- A la empresa GEOSAT por facilitar parte de la cartografía digital y bases de datos espaciales utilizadas en el desarrollo del ejemplo.
- Al profesor Carlos José Saldarriaga (Facultad de Ingeniería Ambiental - Universidad de Medellín) por la revisión y corrección de estilo del documento.