

La construcción de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el marco de la cooperación entre el IRD y el Municipio de Quito

Marc Souris

Resumen

Cuando en 1988 el Orstom decide lanzarse en un proyecto de atlas de la ciudad de Quito, en cooperación con el IGM, el IPGH y el Municipio de Quito, pone claramente el acento en la voluntad de desarrollar y de utilizar de manera intensiva las nuevas tecnologías de la información geográfica: SIG, bases de datos localizadas, análisis espacial, teledetección espacial, cartografía automática. Este proyecto será la ocasión de desarrollar una investigación metodológica sobre nuevos métodos de tratamiento de datos geográficos, de crear las herramientas informáticas necesarias para su aplicación concreta y de probar su resultado en el marco de un proyecto operacional en cooperación. En este artículo se describe esta experiencia, desde la concepción de los métodos informáticos hasta la realización del programa.

Palabras clave – Sistema de Información Geográfica – bases de datos geográficas – geomática – *SavGis*

Cuando en 1988 el Orstom decide lanzarse en un proyecto de atlas de la ciudad de Quito, en cooperación con el Instituto Geográfico Militar (IGM), la sección ecuatoriana del Instituto Panamericano de Geografía y de Historia (IPGH) y el Municipio de Quito, puso claramente el acento en la voluntad de desarrollar y de utilizar de manera intensiva las nuevas tecnologías de la información geográfica: Sistema de Información Geográfica (SIG), bases de datos localizadas, análisis espacial, teledetección, cartografía automática. Este ambicioso proyecto va a ser la ocasión ideal para efectuar una investigación metodológica sobre nuevos métodos de tratamiento de datos geográficos, de concebir y desarrollar herramientas informáticas necesarias para su aplicación concreta y de probar su resultado en el marco de un proyecto operacional en cooperación. En este artículo vamos a tratar de analizar esta experiencia.

1. El contexto de los SIG a principios de los años 1980

En 1986, cuando arranca el programa «Atlas Informatizado de Quito» (AIQ), los sistemas de información geográficos todavía no han alcanzado el desarrollo que se les conoce hoy en día y los programas SIG comerciales capaces de manejar y analizar al conjunto de una ciudad, son inexistentes. No obstante, el Orstom trabaja ya desde varios años atrás sobre esta herramienta —1981 para ser precisos— porque la necesidad de manejar bases de datos localizadas existe desde hace mucho tiempo en numerosas aplicaciones del Orstom. Tanto para tratar los inventarios de recursos naturales (que eran muy apreciados en esa época pero de los cuales era difícil obtener el mejor beneficio, a no ser con una producción cartográfica abundante), como también para modernizar la rama de producción cartográfica. La informática acababa de invadir todos los campos y entre otros, aquellos ligados al dibujo y a la concepción gráfica bajo todas sus formas.

Desde luego, cabe recordar que a inicios de los años 1980, la mayoría de los estudios informáticos eran realizados sobre ordenadores centrales —«grandes máquinas» en tamaño y en problemas de mantenimiento— compartidos por el conjunto de los usuarios de la empresa. IBM, VAX y otros como Bull son nombres que suenan todavía vagamente en la mente de todos aquellos que practicaron con entusiasmo una informática que acababa de abandonar la mecanografía y las tarjetas perforadas. Los micro-ordenadores de esa época estaban muy lejos de parecerse a los que ahora se usan. Sin embargo, ¡cuanta expectativa hubo cuando recibimos, en 1984, un micro-ordenador equipado con un disco duro de 20 megaoctets y una pantalla a color! Cabe destacar que «nuestro» Sun sólo disponía de 512 Ko de memoria RAM, que, micro-ordenador u ordenador central, la interactividad gráfica era prácticamente inexistente y que el sistema de explotación era poco agradable, como todos los que existieron hasta la llegada

del primer Macintosh de Apple. El costo de los materiales gráficos (impresoras, mesas de digitalización, pantallas gráficas, scanner) era a menudo prohibitivo, sin hablar de la complejidad de la conexión al ordenador central. Pero el futuro era prometedor porque en aquella época, más que ahora, la evolución del material informático y de sus *performances* era tan rápida que era necesario saber anticipar las aplicaciones del mañana. En efecto, la concepción y la evolución de los programas son mucho menos rápidas que las de los materiales sobre los que se apoyan.

2. La concepción de un sistema de información

La concepción de un programa informático de tipo sistema de información requiere de múltiples pasos y se parece mucho a la de un arquitecto o a la de un investigador de laboratorio. Después de haber circunscrito e intentado describir los objetivos a largo plazo (más de diez años), hay que concebir la arquitectura general de un sistema que permita responder a dichos objetivos, es decir imaginar los órganos que van a ser necesarios desarrollar, describir sus funciones necesarias para responder a las necesidades y describir su organización, tanto entre ellos como con el mundo exterior. En el corazón de esta arquitectura hay que concebir un modelo de datos suficientemente complejo y robusto para poder responder a las necesidades iniciales de descripción y de tratamiento (en nuestro caso, describir la realidad geográfica, manejar inventarios geográficos, hacer cartografía automática y sobre todo garantizar la perennidad de la información científica) y hacer frente a las futuras evoluciones con la finalidad de no estar desprevenido ante la evolución tecnológica y las futuras necesidades de los usuarios. Todos los órganos del sistema se van a sostener sobre este modelo de datos. Luego viene la concepción de cada uno de los órganos (concebidos en general como módulos), búsqueda de los métodos y algoritmos, concepción de la ergonomía y de la comunicación con el mundo exterior.

En cuanto los científicos integraron los principios lógicos de los ordenadores (rápidamente en los años 1950 y 1960), fueron numerosos quienes se internaron en este prometedor espacio y trabajaron sobre las estructuras de datos y algoritmos de resolución de problemas, en todos los campos, y en particular en los que provenían directamente de las matemáticas. Así, se elaboraron y publicaron numerosos algoritmos en los años 1960 y 1970, a pesar de la escasa capacidad de cálculo de las máquinas de la época que hacía casi imposible su aplicación para juegos de datos no triviales, en numerosos campos. Pero la mayoría de las bases algorítmicas de la geometría informática y del tratamiento de imagen, que constituyen el fundamento algorítmico de los SIG, fueron concebidas de esta manera en ese entonces. Concebir y desarrollar un sistema de información geográfica tenía que ver tanto con una cuestión de arquitectura

como de problemas algorítmicos, aun cuando numerosos aspectos tenían todavía que ser objeto de investigación, de mejora y de optimización. También hubo la ambición de querer reunir en un solo conjunto un sistema de manejo de datos (bi o tridimensional, que represente al mundo real) y un sistema de cartografía, de edición gráfica, de tratamiento de imagen, de visualización en tres dimensiones, de cálculos de optimización, etc. Y en el campo del manejo de datos, las técnicas han evolucionado de manera importante a comienzos de los años 1980, con la aparición del modelo relacional para los sistemas de manejo de bases de datos.

Sobre estas bases teóricas —algorítmica gráfica y manejo relacional de las bases de datos— hemos definido los grandes principios y la arquitectura de un sistema de información geográfica.

42

3. La concepción del sistema de información geográfica *SavGIS*

Una de las características de este estudio radica en que ha sido efectuado dentro de un marco operacional y no en un clásico y único laboratorio de investigación. El marco general es el del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), antiguamente Orstom, y el marco operacional es el de proyectos de investigación o de desarrollo en diversos países o regiones de la zona intertropical, campo de aplicación histórico del Instituto. Nuestro objetivo ha sido siempre doble: por un lado, conciliar el desarrollo o la aplicación de principios teóricos para el manejo de datos geográficos, y por otro lado, la construcción de un programa operacional en el marco de proyectos de investigación o de desarrollo. El plan de desarrollo funcional ha estado altamente influenciado por este imperativo ya que el sistema por construir debía responder a varios objetivos entre los cuales se puede destacar en particular los siguientes:

- la necesidad de un manejo eficaz y por ende la construcción de un motor de base de datos (BD) relacional interno extendido a los datos localizados (manejo integrado de los atributos descriptivos y de localización), con indexación primaria sobre la localización además de los procedimientos de conexión a motores BD externos,
- la necesidad de un sistema que pueda manejar un número importante de objetos (varios millones) sin que se degrade la *performance*, en un marco operacional,
- la necesidad de conservar la mejor precisión posible en función de la modelización de la realidad en objetos geográficos, algo que implica un sistema de doble estructura interna (vector, raster) que permita en particular el manejo integrado de las imágenes aéreas y satelitales georeferenciadas y de la tercera dimensión,

- la necesidad de un manejo fácil y de funcionalidades evolutivas, por ende la aplicación del enfoque objeto con el manejo de métodos, tanto a nivel del esquema de los datos como del desarrollo y de la implementación,
- la necesidad de asegurar la perennidad de las bases de datos, por ende la reflexión sobre la documentación de la información y el manejo de los metadatos dentro de un enfoque orientado objeto,
- la necesidad de una confiabilidad total a nivel del ingreso de datos, por ende la definición y la aplicación concreta de múltiples exigencias de integridad espacial en el momento del ingreso gráfico,
- una ergonomía que permita el enfoque exploratorio y empírico multi-usuario, por ende el manejo de estados temporales por usuario sin modificación de la base de datos,
- la necesidad de funcionalidades integradas que permitan el análisis, y por consiguiente la definición y la aplicación de operaciones propias de los datos geográficos: análisis espacial, estadística, geoestadística,
- funcionalidades de dibujo y de cartografía automática que permitan obtener productos de edición cartográfica profesionales.

43

El principio fundamental, para la concepción de la ergonomía —que es uno de los aspectos más importantes en la concepción de un sistema de información— era conservar la posibilidad de un tratamiento empírico en la explotación de los datos y la necesaria interactividad, particularmente gráfica, en el proceso de interrogación. Deseábamos conservar así una parte del procedimiento empírico clásico del geógrafo y permitir sintetizar al mismo tiempo también algunos procesos bajo formas de comandos ya listas.

El trabajo era inmenso: después de haber concebido los principios y la arquitectura del sistema, había que desarrollarlo y hacer de él un producto operacional, no solamente reservado al uso de algunos investigadores para una necesidad precisa, sino que permita efectuar proyectos operacionales con importantes volúmenes de datos, a largo plazo. Luego de más de quince años de desarrollo, el sistema *SavGIS*, resultado de este trabajo, comprende más de un millón de líneas de código.

4. El programa «Atlas Informatizado de Quito»

Provistos de una maqueta de programa informático elaborada con gran dificultad en Fortran con un ordenador central —que fácilmente se podía calificar de poco ameno para este tipo de aplicación (Mini 6 Bull)— nos instalamos en Quito a fines de 1987, en los locales del Instituto Geográfico Militar en donde

los geógrafos del proyecto estaban ya trabajando desde hace más de un año atrás. Esta maqueta había requerido ya varios años de desarrollo, efectuado exclusivamente en Francia (centro IRD de Île-de-France). Tenía varios módulos, uno para la digitalización gráfica sobre una mesa de digitalización enlazada a un micro-ordenador, otro para el manejo de las bases de datos y el último para la explotación y la cartografía. Había sido probada con éxito sobre varios proyectos de poca y de mediana envergadura y permitía asegurar un mínimo de funciones para la digitalización, el almacenamiento, la restitución gráfica pero muy poco para el análisis espacial.

44

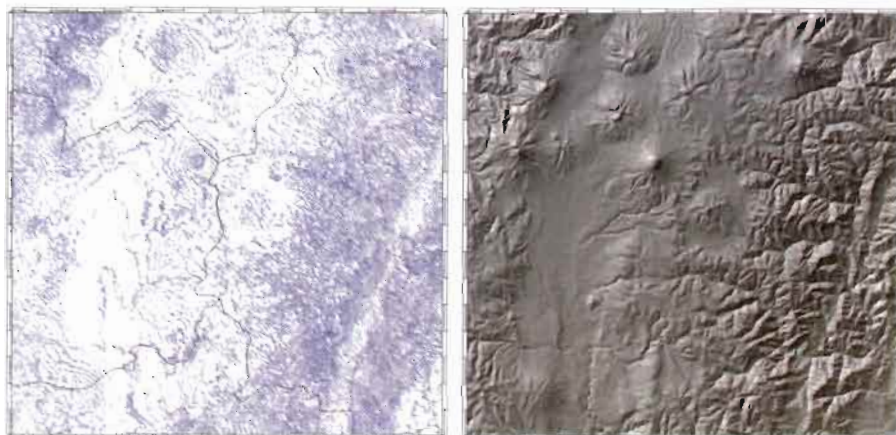
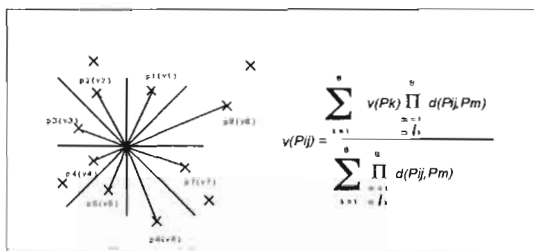
Continuar su desarrollo en Quito iba a permitir enfrentarnos directamente con los imperativos de una producción operacional, con las necesidades de nuestras contrapartes, con las demandas de análisis de datos espaciales de los geógrafos y con los pedidos de los administradores y planificadores de la ciudad. Desde luego, no trajimos un Mini 6 Bull, porque poco tiempo atrás había aparecido un nuevo concepto en el mercado informático, el de estación de trabajo. Este material, que asociaba potencia de cálculo e interactividad gráfica, convenía perfectamente a nuestras necesidades de entonces (los micro-ordenadores no eran todavía tan potentes aun cuando los de Apple presentaban una interfase gráfica adecuada con la llegada de los Macintosh). Estábamos equipados con mucho orgullo con una única estación de trabajo Sun, la primera importada a Ecuador, y una de las primeras adquiridas por el IRD. También habíamos traído un micro-ordenador que funcionaba bajo MS/DOS, una mesa de digitalización y un trazador de plumas. Teníamos tan solo esta máquina para desarrollar a la vez los métodos, los algoritmos, los programas, las bases de datos y para producir un programa operacional y una base de datos, todo esto para que sirva de soporte para la realización y para la edición de un atlas, publicación clásica que sería la primera emanación concreta de esta base de datos y cuyo trabajo cartográfico sería concebido y realizado directamente en un ordenador. El conjunto debía ser realizado dentro de los plazos impartidos que eran bastante cortos (tres años).

Esta estación Sun —para traer a recordación una época no tan lejana— disponía a finales de los años 1980 de 4 Mb de RAM, de un disco duro de 40 Mb y de poco espacio para tratar —es un ejemplo— un censo de la población que tomaba ya en sí más de 80 Mb sobre bandas magnéticas para cuya lectura no estábamos por lo demás equipados. ¡No podía ni imaginar que quince años más tarde tendría en el fondo de mi bolsillo, una pequeña llave informática que dispone de diez veces más de memoria que el disco duro de esta estación de trabajo! No teníamos impresora gráfica sino un trazador de tres plumas, que nos proporcionó numerosos servicios pero que no estaba adaptado para la cartografía temática. ¡Cuántas dificultades técnicas encontramos! Las copias de seguridad se efectuaban sobre bandas magnéticas en formato de cassette que se amontonaban por todo

lado en las oficinas (no habían disquetes en los primeros Sun). La transferencia de datos desde un ordenador personal hacia la estación de trabajo era un ejercicio de acrobacia. La numerización del contorno de las manzanas fue efectuada sobre una sola mesa de digitalización, que también habíamos traído con nuestro equipaje, enlazada a un único micro-ordenador que funcionaba bajo DOS desde luego, pues el sistema de explotación Windows no había sido aún inventado. Finalmente, conectar una mesa de digitalización a un micro-ordenador para utilizarlo con un programa no previsto por el constructor requería de un buen nivel de bricolaje informático. Los tres operadores ecuatorianos se turnaban para terminar con la numerización lo más rápidamente posible al mismo tiempo que aprendían estas nuevas técnicas de la cartografía numérica sobre programas en vías de desarrollo. Más de 6 000 manzanas fueron ingresadas así en algunos meses desde el inicio del proyecto. Sin embargo, a pesar de estos apremios, estábamos satisfechos con esta estación de trabajo: por ejemplo, un cálculo de interpolación que tomaba más de 24 horas sobre el Mini 6 Bull tan sólo requería de una hora o dos sobre el Sun (fig. 1). En el 2005, menos de diez segundos son necesarios sobre una simple PC.

Balance de los estudios urbanos (1985-2005)
La cooperación IRD-Municipio de Quito

Figura 1 – Interpolación y modelos numéricos de terreno: método baricéntrico a partir de curvas de niveles y de puntos de elevación



Más de un año después de haber arrancado con el proyecto informático pudimos completar la configuración de la que disponíamos con otro disco duro destinado a la estación de trabajo y una impresora de transferencia térmica. Para efectuar una impresión A4, eran necesarios tres pasadas para que una película plástica deposite mini partículas de color sobre el papel. ¡Cuántas veces resonó con exasperación esta frase mítica de la informática de entonces: «esto no imprime»!

Recordemos que en esa época, desde luego, no había internet en Ecuador.

46 De una maqueta de programa en Fortran, bajo Multics (el sistema operativo del Mini 6 Bull, ancestro de Unix), y sin interfase gráfica, pasamos a un desarrollo en Fortran C y SunView (lenguaje gráfico) bajo Unix por un lado (para el desarrollo sobre Sun) y MS/DOS por otro lado (para el desarrollo sobre micro-ordenador), y esto hasta 1995, cuando la llegada de una versión 32 bits de Windows permitió finalmente pensar en la migración del conjunto del sistema sobre micro-ordenador. En efecto, los inconvenientes mayores de las estaciones Sun eran desde luego sus precios y la imposibilidad de difundir ampliamente la tecnología y nuestros programas.

De 1988 a 1991, mientras los geógrafos franceses y ecuatorianos recolectaban y analizaban los datos, el programa se enriquecía con numerosas funcionalidades ligadas al análisis espacial, a la digitalización gráfica y a la cartografía temática. Varios pasantes franceses se sucedieron en el transcurso de esta fase de desarrollo que se efectuaba con la participación de otro equipo del Orstom, basado en México (paralelamente al proyecto urbano de Quito, llevábamos a cabo un proyecto de desarrollo de un SIG regional en el estado de Veracruz). Desgraciadamente no teníamos el apoyo de ningún ingeniero de sistemas ecuatoriano: el programa «Atlas Informatizado de Quito» había sido concebido al principio por geógrafos por sus resultados temáticos y no para la investigación informática y el desarrollo de los métodos y programas SIG correspondientes. La contraparte ecuatoriana estaba pues formada por geógrafos o cartógrafos, aunque la mayoría de ellos comprendió rápidamente el interés de tener a su lado al conceptor y a los desarrolladores de los programas.

Al final del programa, en 1992, la base de datos constituida sobre Quito comprendía casi todos los datos geográficos en ese entonces disponibles sobre la ciudad y sus alrededores. El *Atlas infográfico de Quito* fue terminado con tan sólo algunos meses de retraso. Retraso de poca importancia a posteriori si recordamos las incertidumbres y los sinsabores que tuvimos que enfrentar durante todo el proyecto (averías de la pantalla de la estación Sun y de la mesa de digitalización). Proveniente del SIG sobre Sun, la cartografía fue terminada sobre Macintosh bajo Adobe *Illustrator*, para ser enviada directamente a la imprenta luego de la diagramación de los ficheros. En 1991, esta cadena informática e infográfica de constitución de un atlas —de la investigación al libro— fue innovadora (fig. 2).



Figura 2 – El *Atlas infográfico de Quito*, una obra que pesa mucho, en sentido propio y figurado

La cooperación franco-ecuatoriana fue un aspecto fundamental de este programa de «atlas informatizado de Quito». Aunque en el seno del Orstom algunos permanecieron escépticos respecto de nuestra capacidad en llevar a buen término este proyecto, el interés de la contraparte ecuatoriana nunca se perdió. Por el contrario, muy rápidamente se desarrolló un clima de confianza y de amistad entre los miembros de nuestro equipo, franceses o ecuatorianos. Aunque vivimos momentos de tensión, como en todo proyecto de esta envergadura, el clima de confianza y de amistad nunca desapareció, y aún hoy en día sigue perdurando.

5. El proyecto continua en el Municipio de Quito

Luego de la publicación del atlas, el proyecto pasó a manos del Municipio de Quito, a solicitud de esta institución. Los responsables de la planificación de la ciudad se habían dado cuenta de todo el interés, a la vez técnico y político, de desarrollar semejante herramienta en términos de manejo de la información y de la comunicación. Una parte del equipo ecuatoriano del Instituto Geográfico Militar seguirá también el proyecto en el Municipio de Quito, aunque a despecho de este socio fiel que nos acogió durante tantos años y que veía desaparecer una parte de los beneficios de su inversión con la partida de sus expertos. Pero, desde luego, era sensato el traspaso del proyecto a un servicio de planificación que pilotea directamente la investigación urbana en Quito, dentro de una óptica de investigación científica.

En el Municipio de Quito, numerosas aplicaciones han venido a animar la prosecución del desarrollo del programa informático. Bajo la dirección de Fernando Carrión y de Gonzalo Bustamante, la dirección de planificación

mostró claramente su voluntad de efectuar un procedimiento de investigación científica y se dotó de los instrumentos para esta política, en particular en el campo editorial: realización de un atlas del centro histórico, de una colección de análisis estadístico sobre Quito, proyecto de escenario sísmico, proyecto sobre el medio ambiente urbano, proyecto de hidrología urbana, proyecto sobre riesgos naturales. De un proyecto informal, el SIG y su base de datos han pasado a ser el centro de un nuevo servicio, el Sistema Urbano de Información Municipal (SUIM). El equipo ecuatoriano creció, las estaciones Sun se multiplicaron y quien realizó las inversiones esta vez fue el Municipio de Quito. La utilización ya no estaba reservada a algunos investigadores, más bien todos los servicios del Municipio se interesaban en la base de datos a través del SUIM. En función de las demandas de los usuarios prosiguió el desarrollo del sistema *Savane*. Y, gracias a la presencia de este servicio, a partir de 1994, Quito ha sido escogida por el IRD para desarrollar allí varios proyectos nuevos de investigación, particularmente sobre los riesgos naturales y el medio ambiente urbano, los mismos que han desembocado en numerosas publicaciones (fig. 3).

Los materiales informáticos han cambiado mucho desde 1987. Ya en 1995, los ordenadores personales correspondían a lo que deseábamos desde el momento en que empezamos a concebir métodos y programas: potencia, bajo costo, alta interactividad, capacidades gráficas adaptadas a nuestras necesidades. A partir de



Figura 3 - Algunas publicaciones realizadas dentro del marco del SUIM entre 1992 y 1997

1995 abandonamos el desarrollo del programa informático sobre estación gráfica para tornarnos hacia los micro-ordenadores, máquinas que fácilmente podían ser compradas por nuestras contrapartes. Las herramientas de desarrollo de programa, lenguajes y compiladores, permiten garantizar una buena confiabilidad de los programas y reducen el número de *bogs* que desesperan a los usuarios. El material informático no es más un freno para el desarrollo y finalmente la tecnología puede ser ampliamente difundida, pues el acento se pone sobre la metodología y el análisis. La migración del sistema a VisualC++ bajo Windows (95, 98, Me, 2000, Xp) que, a pesar de todo demandó importantes esfuerzos, ha permitido obtener una muy sólida arquitectura de programa sobre la que se ha proseguido el desarrollo del programa informático, en particular con la concepción y el desarrollo del módulo de georeferenciación y mosaicado de imagen. Con esta migración se reforzó la facilidad del sistema (fig. 4).

6. La descripción técnica del sistema *SavGIS*

En el origen de la construcción del SIG se encuentran dos objetivos mayores: manejar objetos geográficos, garantizando la perennidad y la compartición de la información; tener la posibilidad de poner en relación estos objetos, unos con

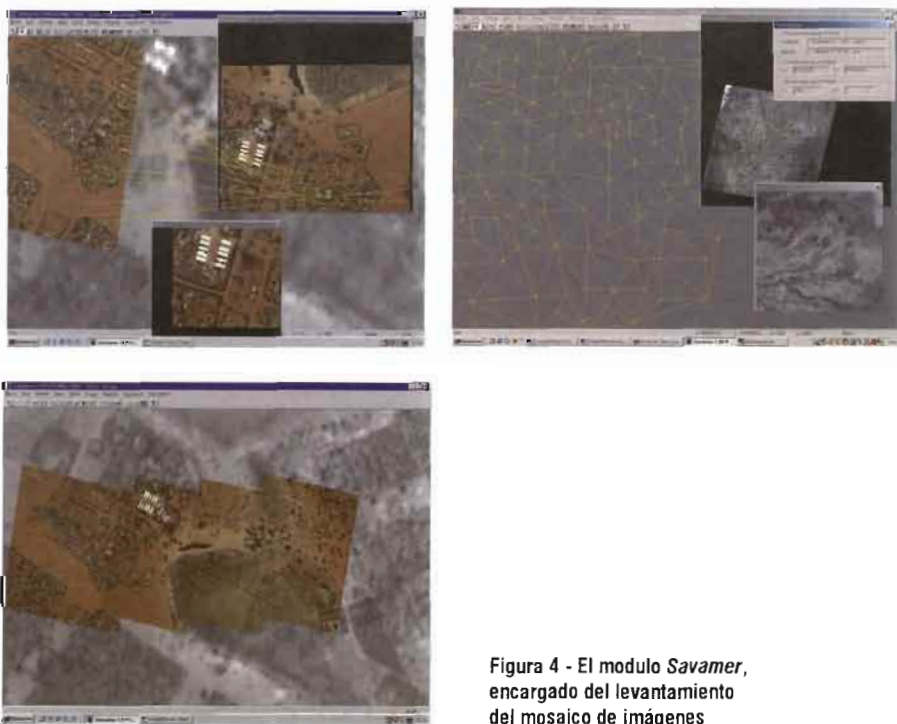


Figura 4 - El módulo *Savamer*, encargado del levantamiento del mosaico de imágenes

otros, utilizando su localización —como podía hacerlo simplemente el geógrafo cuando superponía dos mapas temáticos, para verificar o poner en evidencia correlaciones espaciales—. Se trata pues, por un lado, de manejar objetos tal como aparecen en los mapas, por tema, independientemente unos de otros y por otro lado, utilizar esta localización, considerada como universal entre todos los objetos localizados, para unirlos unos con otros. Es indispensable desde luego conservar esta universalidad durante la medición de la localización (*datum* y proyecciones cartográficas). Para evitar cualquier problema ligado al referencial, hemos optado, en la construcción del SIG, por conservar las coordenadas independientemente de la proyección cartográfica e imponer un mismo *datum* para el conjunto de los objetos de una base de datos. Aunque esta solución es la más sencilla a nivel del sistema de gestión, requiere sin embargo tener la capacidad de transformar cualquier coordenada para traerla a este referencial: tuvimos pues que desarrollar cambios de proyección y cambios de *datum*.

Manejar objetos en función de las colecciones temáticas y poder ponerlos en relación gracias a un atributo nos recuerda el manejo relacional de las bases de datos clásicas. En este caso los objetos se manejan por colecciones de objetos del mismo tipo y son puestos en relación en base a un atributo común mediante una calificación de unión en base a este atributo. El modelo relacional permite asegurar de la mejor forma la coherencia e integridad de una base de datos, dejando que las operaciones de restricción o de unión respondan a una búsqueda. La idea básica de construcción del sistema es extender el modo de manejo relacional de los objetos a los objetos localizados, con la posibilidad de una unión en base al atributo que da la localización de los objetos, para ponerlos en relación, entre objetos de colecciones diferentes. Primero hay que analizar el problema de la representación de los objetos geográficos en una base de datos con la finalidad de manejarlos en colecciones de elementos descritos por los mismos atributos. En efecto, un mapa representa efectivamente a un conjunto de objetos, a la inversa de la descripción de un paisaje o de un barrio, que en general no representa sino a un objeto y no tiene por objetivo un estudio comparativo con otros objetos del mismo tipo. La idea de la colección está pues omnipresente en nuestro enfoque: si se busca agrupar objetos —descritos con los mismos atributos— en colecciones, es para poder manejarlos correctamente, compararlos entre sí y compararlos con objetos de otras colecciones. La localización en el espacio es un elemento fundamental de esta comparación.

Partir del modelo relacional de manejo de base de datos permite utilizar un modelo que da entera satisfacción en el manejo de objetos descritos con atributos simples (nominales o numéricos de dimensión uno). Pero tomar en cuenta el atributo de localización resulta más complejo porque se plantean interrogantes inéditas para atributos de dimensión superior a uno: ¿cómo describir y representar

sub-conjuntos de dimensión uno o dos? ¿Cómo conservar la estructura métrica del espacio? ¿Es posible hacer uso de los sistemas existentes o hay que construir un nuevo motor de manejo de datos? ¿Hay que almacenar mapas o regresar a la esquematización y a la modelización que ya ha sido efectuada por el geógrafo o el cartógrafo?

En la concepción del sistema *SavGIS*, el punto de partida de la información sigue siendo el mapa o la medida directa del terreno, como por cierto en la gran mayoría de los SIG. Sin embargo, el mapa sólo interviene en tanto que soporte de un conjunto de objetos correspondientes a una misma entidad del mundo real, ya no cartográfica sino geográfica, libre de toda representación semiológica. La modelización sólo conserva la esquematización geométrica utilizada para dar cuenta de los fenómenos en el espacio, con, como exigencia fuerte, la unicidad de un fenómeno en el espacio y el tiempo: en una colección no se puede tener dos objetos en un mismo lugar y en un mismo momento (si se toma en cuenta el tiempo). Respetar esta exigencia es fundamental para garantizar la validez conceptual de la modelización de la realidad. A partir de esta opción —una representación geométrica de los objetos basada en una descripción cartográfica— existen varias posibilidades para conservar la descripción de esta representación geométrica en un sistema informático. Es necesario definir tipos diferentes según el tipo de localización, puntual o conjuntista, de dimensión uno o de dimensión dos. Se presiente ya que un sistema clásico de manejo de base de datos no puede convenir para almacenar eficazmente esta descripción, salvo que se quiera utilizarlo en su estructura de espacio métrico. Nada impide utilizar tablas clásicas para almacenar puntos (x, y), pero un sistema clásico será incapaz de reconstituir un contorno, de efectuar pruebas de pertenencia o de interrogar sobre la distancia entre los objetos: es obvia la incapacidad de los sistemas de manejo de bases de datos clásicos para manejar el atributo de localización en su estructura. Se puede entonces separar lo gráfico y lo descriptivo, utilizando un sistema particular para manejar el atributo de localización, y un sistema clásico para manejar el conjunto de los atributos descriptivos, estableciendo un vínculo entre los dos sistemas mediante una llave de unión para reconstituir los objetos. Esta solución no es satisfactoria, principalmente por dos razones: por un lado, es imposible indexar los objetos sobre su localización, cuando este criterio es de lejos el más discriminante, y por otro lado, el manejo separado de dos conjuntos de atributos correspondientes a un mismo objeto es fuente de incoherencia en las bases de datos y de pérdida de *performance* a partir del momento en que el número de objetos es grande. Cuando los objetos están localizados, el atributo de localización deviene en efecto el más eficaz en términos de indexación: deseábamos implementar una indexación de tipo secuencial indexado basada en la localización, lo que impone que los valores descriptivos sean almacenados en el orden de los objetos si se quiere tener el beneficio de las *performances* de la

indexación sin tener que mantener índices densos. Esto no se puede hacer sino en un sistema que maneje a la vez lo descriptivo y lo gráfico.

52 El otro objetivo principal del sistema *SavGIS* es perennizar la información, de manera centralizada, y permitir su consulta y explotación descentralizada, con un procedimiento exploratorio. En efecto, si la interrogación de un SGBD clásico utiliza habitualmente un lenguaje de búsqueda que permite expresar en una «frase» la solicitud hecha a la base de datos, el proceso de interrogación de datos geográficos y el procedimiento del geógrafo tienen que ver a menudo con un enfoque exploratorio, sin la definición formal del proceso de las operaciones que permiten responder a una pregunta, que puede variar en función del proceso. Es esencial conservar este aspecto interactivo en el proceso de búsqueda, lo que implica concretamente la creación temporal, durante la interrogación, de nuevos atributos o relaciones. El sistema debe pues mantener estados temporales, por usuario: no se podía permitir que la base de datos sea modificada por un usuario so pena de cuestionar el objetivo fundamental de perennizar y de centralizar de la información.

Por todas estas razones, optamos por construir un sistema que posea su propio motor BD, que permita la indexación primaria sobre la localización, el almacenamiento y el manejo de la geometría que representa la localización de los objetos, agrupados en relaciones, en función de una modelización del espacio que respete el principio de unicidad de llave para la localización. Esta modelización debe tomar en cuenta los diferentes tipos de implantación espacial: zona, línea, puntos, pixels. También optamos por separar la administración de la explotación: el módulo de interrogación debe permitir el enfoque exploratorio y el manejo de estados temporales durante una búsqueda, pero no puede modificar la base de datos, derecho reservado al módulo de explotación. Escogimos igualmente separar la explotación, el ingreso gráfico y la verificación de las exigencias de integridad. Para la selección de las estructuras internas de representación de la localización, hemos privilegiado sistemáticamente la simplicidad de las estructuras sobre la simplicidad de los algoritmos de tratamiento: así, escogimos conservar arcos fronteras, aunque se tenga que reconstituir el contorno de las zonas, en vez de conservar un contorno cerrado que impone un sentido en el almacenamiento de los arcos. Para la representación de la localización las estructuras más simples permiten reducir las exigencias de integridad sobre este atributo.

A partir de la modelización en colecciones temáticas, se vuelve natural la extensión del modelo relacional a los datos localizados. Las operaciones del álgebra relacional (restricción, proyección, unión) se extienden a la localización utilizando criterios de distancia o de pertenencia en vez de una relación de orden o de igualdad. Desgraciadamente, nos dimos cuenta rápidamente que este atributo de localización, que habíamos calificado como universal, no lo

era verdaderamente. Varía considerablemente, tanto en su concepción y en la manera de representarlo como en la precisión de su medida. La unión espacial, extensión de la unión clásica y operación formal correspondiente a la puesta en relación por superposición, no toma en cuenta la validez o la escala de la descripción. En numerosos casos esta resulta inutilizable tal cual: hubo pues que manejar transferencias de escala para poner efectivamente en relación objetos de validez o de implantación espacial diferente. Siendo su principal objetivo poner en relación objetos localizados gracias a su localización, ¿es aún válida la concepción de nuestro sistema sabiendo que este objetivo no puede ser alcanzado eficazmente? ¿Es posible o deseable, manejar conjuntamente colecciones de objetos manteniendo la ambigüedad sobre la validez del atributo de localización? Para responder afirmativamente a esta pregunta, es necesario introducir nuevos métodos de administración y de explotación, más allá de una unión cuyo objetivo inicial —encontrar los valores de un punto en el espacio a partir de distintas colecciones— debe ser analizado en función de la modelización del mundo real. La primera respuesta consiste en introducir procedimientos que permitan manejar las transferencias de escala, mediante a la vez procedimientos de agregación, procedimientos de cambio de tipo de implantación espacial, procedimientos de interpolación y procedimientos de extrapolación. La otra respuesta, complementaria de la primera, consiste en documentar las bases de datos mediante la introducción sistemática de metadatos que permitan al usuario regresar a la génesis de la información y evitar los escollos de un uso errado. Consiste también en introducir en el esquema de la base de datos métodos de utilización de estos datos, proponiendo de esta manera al usuario un conjunto de métodos de explotación que dependen no solo del tipo de los objetos sino también de su contenido semántico y de su precisión geográfica.

53

Finalmente, tal como ya lo hemos señalado, es importante la ergonomía del programa: esta debe permitir a la vez el enfoque exploratorio y la representación cartográfica de los resultados, en cada etapa de la búsqueda. Estos dos objetivos subtienden la concepción de la ergonomía del módulo de explotación.

El sistema *SavGIS* se caracteriza por una estricta aplicación de la lógica y de los conceptos de las bases de datos —en particular relacionales y objetos— a los objetos geográficos localizados. El concepto de objeto, entidad de base manejada por el sistema, recubre por ejemplo: una zona en un mapa, un individuo en un censo, un tramo de red, etc. Cada objeto es descrito por un cierto número de atributos: nombre, coordenadas, valores numéricos, por ejemplo. El sistema maneja objetos y los valores de los atributos que los describen. Los objetos, descritos por los mismos atributos en las colecciones, que se denominan relaciones o tablas, están agrupados: el esquema de una relación comprende a todos los atributos que permiten describir los objetos de la relación y los métodos que

pueden ser aplicados a estos objetos. El conjunto de los esquemas de las relaciones produce el modelo de la base de datos, la que está constituida por los objetos de todas las relaciones. El sistema almacena y maneja los objetos basándose en esta estructura de relación —colecciones de objetos del mismo tipo— y trata a los objetos gracias a su descripción por atributos —variables cuyos valores describen al objeto: el sistema *SavGIS* está construido en base al principio de los sistemas de manejo de datos relacionales—.

54 Cuando un objeto es geográfico, se lo localiza frecuentemente, es decir que se toma en cuenta su posición en el espacio en dos o tres dimensiones, sabiendo que esta posición sirve también para describir al objeto. Se habla de atributo de localización como se habla de atributo de descripción. El esquema de una relación cuyos objetos están localizados —la relación está entonces localizada— conlleva siempre un atributo de localización: el manejo de este atributo es el que hace la diferencia entre un SIG y un simple sistema de manejo de base de datos. El sistema *SavGIS* extiende el manejo relacional al atributo de localización: utiliza la localización para poner en relación a los objetos de una colección con los objetos de otra colección.

La localización de objetos geográficos puede ser zonal (el objeto es una zona: una colección de zonas da una relación zonal o de tipo zona), lineal (el objeto es un segmento de línea: la relación correspondiente es entonces llamada lineal), puntual (el objeto es un punto: la relación es llamada puntual) o también puede estar dada bajo forma de imagen numérica georeferenciada (los objetos son entonces los pixels que forman la imagen). La localización puede estar dada bajo forma vectorial (contornos, arcos) o bajo forma matricial (pixels): en ambos casos, el sistema *SavGIS* crea, a partir de los vectores, una representación matricial, en caso de necesidad, durante la explotación de los datos. También puede crear vectores a partir de los pixels de una imagen. Estos diferentes tipos de localización corresponden a tipos básicos para los objetos: zona, línea, punto, píxel. A cada tipo le corresponden métodos específicos (por ejemplo, la superficie para las zonas), métodos accesibles directamente en los menús de *SavGIS*. Este modelo de datos retoma pues la esquematización cartográfica de la realidad geográfica.

El ingreso y el almacenamiento de la localización de los objetos geográficos implican procedimientos totalmente específicos de estos objetos y la administración de una base de datos geográficos requiere también conocimientos en cartografía (proyecciones, levantamientos, escalas, precisión geográfica, generalización, etc.) (fig. 5).

La estructuración de los datos corresponde al modelo relacional de los sistemas de gestión de base de datos extendido a los datos geográficos localizados. Se orienta igualmente hacia el modelo objeto mediante la introducción de clases de objetos



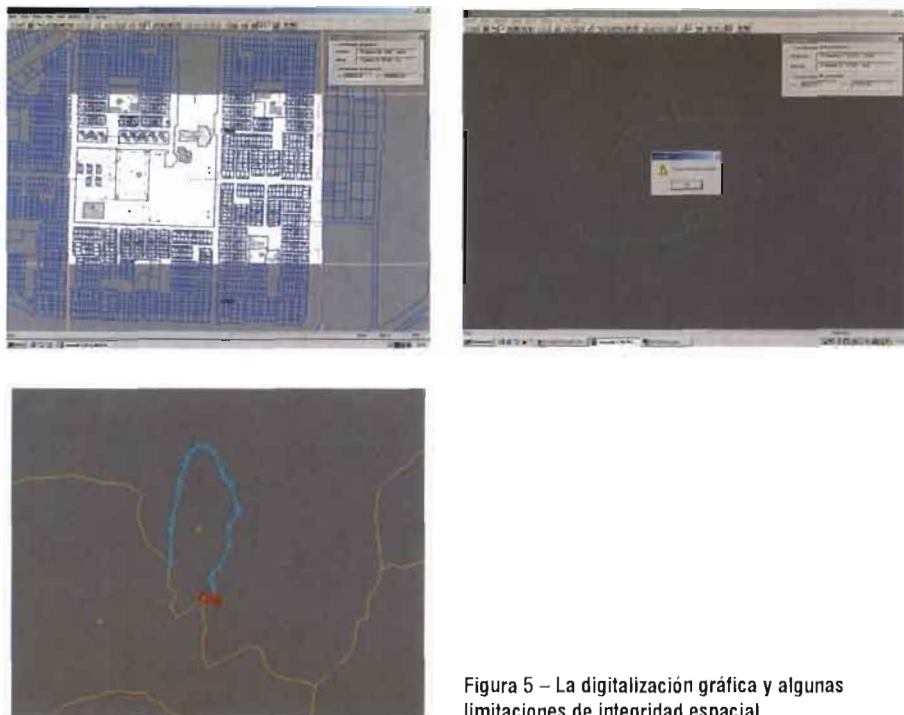
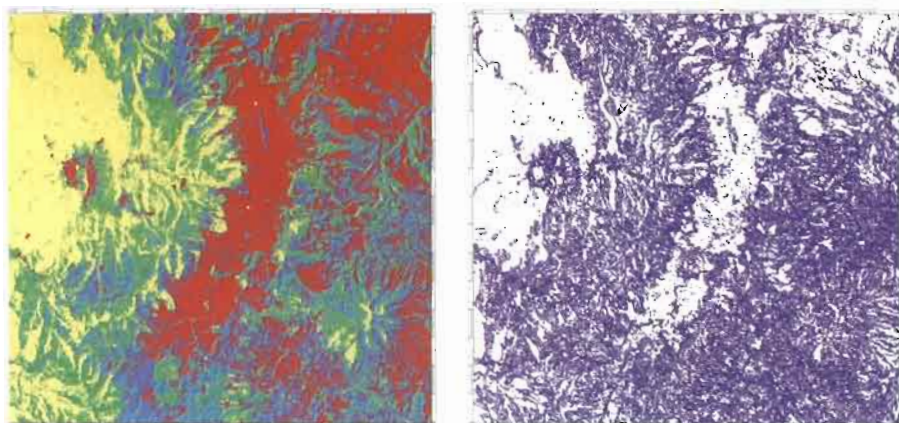


Figura 5 – La digitalización gráfica y algunas limitaciones de integridad espacial

y de métodos sobre estas clases. La arquitectura general es la de un calculador de tipo base de datos, pero simplificado: posee un diccionario de los datos que indica las relaciones, los atributos, los métodos, así como sus características (tipos, definición del esquema interno asociado), un diccionario de los accesos que permite manejar los niveles externos —a través de la asignación de derechos y la definición del acceso a los datos— y un lenguaje de mando que permite interrogar y manipular los datos siguiendo una estructura cliente/servidor. Toda operación utiliza estas tres estructuras para acceder al nivel interno y al sistema para manejo del fichero.

El sistema *SavGIS* crea y administra sus propias bases de datos, integrando en un mismo conjunto la información descriptiva y la información de localización, contrariamente a la mayoría de los SIG que utilizan un sistema de gestión de base de datos clásico para los datos descriptivos y crean el vínculo entre descriptivo y gráfico en el momento de la explotación de los datos. La información de localización es conservada en su forma original, vectorial o píxel, según la modelización de origen. El sistema, que privilegia siempre el aspecto funcional en relación al aspecto técnico, se encarga del conjunto de las operaciones de cambio de tipo (vector-*raster* o *raster*-vector en particular) en función de las necesidades del usuario. Todos los puntos son descritos a través de sus coordenadas geográficas

en un *datum* único y la proyección geográfica de restitución puede ser escogida por el usuario durante la interrogación de los datos (fig. 6).



56

Figura 6 – Vectorización de la clasificación de una imagen satelital en *SavGIS*

Las relaciones localizadas son indexadas sobre la localización mediante la noción natural de hoja, cada hoja corresponde a un recorte de mapa. En una relación localizada toda investigación pasa por la investigación de las hojas referidas al territorio de estudio. Cada relación localizada posee su propio conjunto de hojas, pues esta indexación depende esencialmente de la densidad de los objetos propia de una relación dada. Esta indexación se parece pues a un recorte en marco adaptativo.

La explotación de las bases de datos es multiusuarios. La interrogación se hace bajo la forma de búsquedas, dentro de un procedimiento exploratorio. El sistema maneja las búsquedas de cada usuario creando estados temporales, propios del usuario, sin modificar la base de datos (fig. 7).

La extensión del modelo relacional sobre la localización permite unir los objetos de la base sobre la localización, durante una búsqueda, a partir de un manejo en relación. Pero el manejo solo es insuficiente para responder a las necesidades de análisis que están omnipresentes durante la explotación de datos geográficos. El sistema comprende entonces numerosas funcionalidades de análisis. Además, las diferencias de precisión en la localización, debidas a las diferencias de escala de descripción de los objetos, reducen el carácter universal de la localización en tanto que atributo de unión. Por consiguiente, hemos desarrollado numerosos procedimientos en el sistema *SavGIS* para responder a las necesidades de uniones espaciales cuando la simple puesta en relación sobre la localización no puede ser utilizada. La extensión del modelo relacional se hace pues en varios niveles;

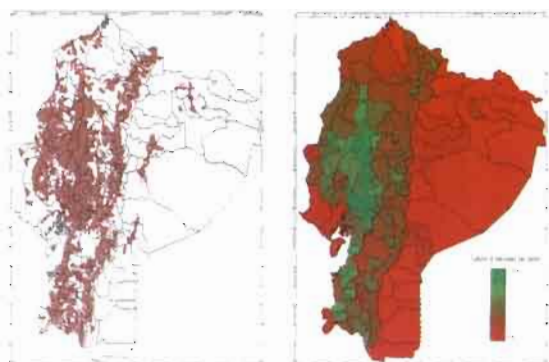


Figura 7 – Algunos ejemplos de unión y de geoagregaciones



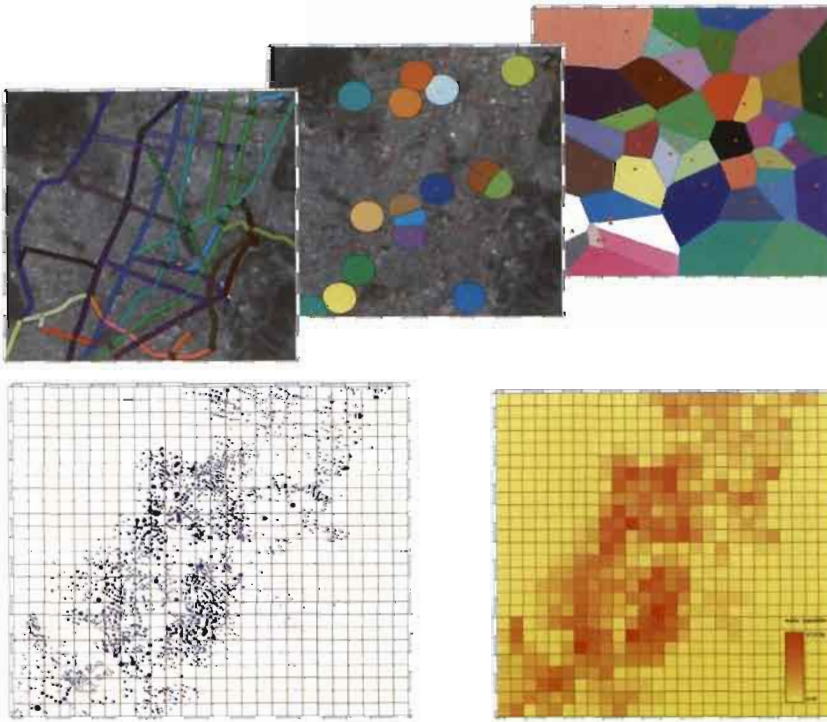
mediante la extensión de las operaciones clásicas del álgebra relacional al atributo de localización, por un lado, mediante la introducción de funcionalidades que permiten resolver los problemas de transferencia de escala, por otro lado (fig. 8).

7. El desarrollo de un programa SIG: ¿valía la pena el juego?

Esta pregunta tiene que ser planteada pero tal vez no en estos términos. En efecto, como ya lo hemos subrayado, en 1987 no existía un programa comercial que

Figura 8 – Operaciones de cambio de tipo de objeto

58



permitiese responder a las necesidades del proyecto. Sin desarrollo de programa informático hubiésemos tenido que realizar otro proyecto —sin informática de investigación— centrado exclusivamente en la automatización de la cartografía. En este caso, la cooperación entre el Municipio de Quito y el IRD no habría sido renovada después del término del atlas, y nuestro conocimiento no se habría reforzado en el campo de la geomática. Si mostramos una voluntad de desarrollo metodológico en el campo de las ciencias de la información, esta voluntad no podía justificarse —en el marco de la investigación para el desarrollo— sino a través de la realización concreta de esta investigación bajo la forma de desarrollo de programa informático, en paralelo a la evolución de los conceptos y de los métodos. Frente a este doble objetivo, mal entendido por muchos, los medios no han sido suficientes seguramente en vista de la amplitud de la tarea: en efecto, el desarrollo del programa informático es un trabajo que demanda mucho tiempo y esfuerzos desde el momento en que se desea superar el nivel «artesanal» y obtener resultados profesionales.

El desarrollo del programa informático se ha basado en conceptos teóricos rigurosos y originales, emanación de la investigación en informática sobre el manejo de las bases de datos, la geometría algorítmica, el tratamiento de imagen

—todo lo que hoy se llama geomática—. Ha dado lugar a la realización de un sistema construido sobre bases sólidas, lo que garantiza su perennidad y justifica la inversión intelectual y financiera que representa. Producto directo de las necesidades de proyectos ambiciosos (el Atlas Informatizado de Quito [AIQ] y los proyectos que le siguieron, además de los proyectos desarrollados en México-SIG Veracruz y SIG Tijuana-San Diego), el desarrollo del programa informático ha sido realizado en el marco de una estrecha cooperación interinstitucional franco-ecuatoriana. Sin embargo, hemos tropezado con serias dificultades ligadas a un desencuentro de agendas y de cronogramas y de objetivos que podían parecer a veces contradictorios. Por un lado, el inicio del proyecto SUIM estaba ligado al término del programa AIQ: ahora bien, era difícil ajustar los cronogramas por razones ligadas a la organización de la investigación. Por otro lado, durante la realización del programa AIQ y del *Atlas infográfico de Quito*, se enfrentaron a menudo dos visiones: una, a corto plazo, más académica, que buscaba la producción de conocimiento sobre la ciudad y la publicación de la obra; otra, a largo plazo, más bien operacional, que tenía por objetivo la concepción y la producción de herramientas informativas que permitan garantizar una mejor información y un mejor manejo de la ciudad. Si este proyecto ha sido un éxito, es porque logramos finalmente conciliar estas aparentes contradicciones y hacer coherentes objetivos que no se inscribían en la misma duración: la publicación de un atlas urbano, fuente de información que sigue siendo todavía una referencia inevitable para todos aquellos que desean trabajar sobre la capital ecuatoriana; la realización de una base de datos localizados y de un servicio de información, elementos de una dinámica que ha permitido al Municipio de Quito —que hizo suyo rápidamente el proyecto— mejorar el conjunto de sus tomas de decisión, ya sean políticas o técnicas, reforzar sus órganos de comunicación, de planificación, de investigación y apoyar la formación de sus ingenieros y técnicos. Así, numerosos proyectos han tomado la posta del proyecto inicial: estudio del centro histórico, realización de un escenario sísmico, estudio de los riesgos hidrológicos, manejo del medio ambiente, y, muy recientemente, análisis de intereses y vulnerabilidades. Proyectos que garantizan la perennidad y la estabilidad del servicio y que han demostrado la perspicacia de aquellos que, en el Municipio de Quito, creyeron en el proyecto inicial y trabajaron a favor de su desarrollo (fig. 9).

Finalmente, el desarrollo del programa *SavGIS* (ex *Savane*) es un éxito. Ahora es reconocido como uno de los mejores de su categoría, aun cuando desgraciadamente, su notoriedad es todavía insuficiente: en efecto, el IRD no es verdaderamente la institución adecuada para tomar a cargo la industrialización y la valorización de un programa de este tipo. *SavGIS* ha permitido el desarrollo de numerosos proyectos a través del mundo: permite disponer de un amplio conjunto de programas informáticos y proseguir la investigación, la innovación y el desarrollo en geomática; permite organizar formaciones originales, tratando

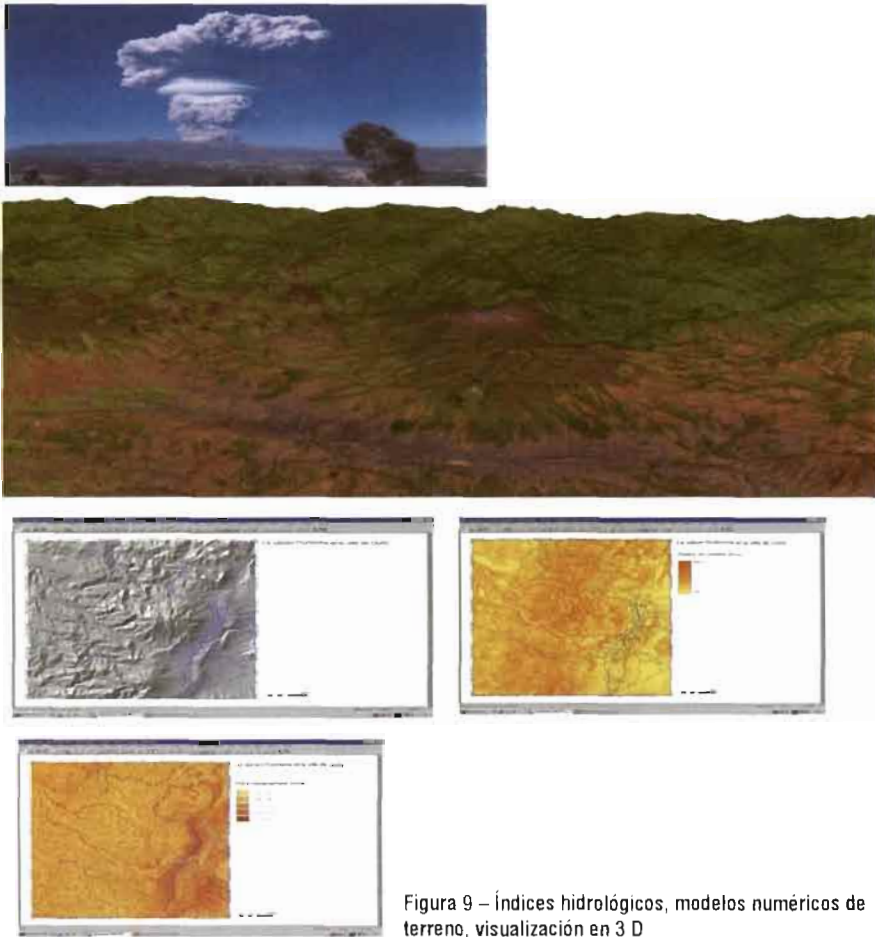


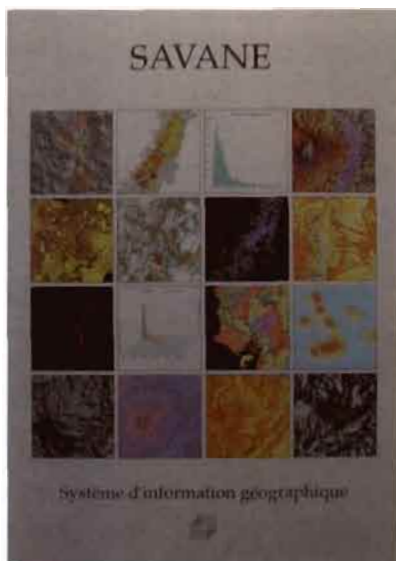
Figura 9 – Índices hidrológicos, modelos numéricos de terreno, visualización en 3 D

tanto de su concepción, de su desarrollo (principios y algoritmos) como de su utilización en disciplinas y campos tan variados como los estudios urbanos, las relaciones entre la salud y el medio ambiente, la arqueología o el estudio de las albuferas tropicales. Finalmente, permite resueltamente inscribirse en la corriente de los programas informáticos libres de derechos y ofrece una alternativa gratuita frente a la oferta comercial.

Conclusión: la prosecución de la cooperación IRD-Municipio de Quito en geomática

La prosecución de la cooperación entre el Municipio de Quito y el IRD no puede ser sino fructífera, particularmente en el campo de la geomática. Si los proyectos de investigación clásicos están siempre limitados en el tiempo desde su

concepción, esta cooperación en el campo de las ciencias de la información debe ser vista a más largo plazo. Aunque la mayoría de los intercambios se hacen ahora a distancia, es necesario inventar y organizar una nueva forma de cooperación, perenne, de manera que cada contraparte aproveche plenamente las inversiones y los adelantos del conjunto de las otras contrapartes, en un campo que sigue evolucionando fuertemente pero en el que las inversiones tecnológicas y humanas se hacen a largo plazo.



Referencias citadas

62

- CAMBREZY, L., SOURIS, M., 1993 – Une recherche appliquée à l'aménagement du territoire : le SIG de l'état de Veracruz, Mexique.. *Mappemonde*, n° 4: 36-37; Montpellier.
- CAMBREZY, L., DELAUNAY, D., LEPAGE, M. & SOURIS, M., 1991 – *Atlas Ejidal del Estado de Veracruz : encuesta nacional agropecuaria ejidal, 1988*; Mexico: INEGI.
- CHATELAIN, J.-L. , YEPES, H., GUILLER, B., FERNÁNDEZ, J. *et alii*, 1994 – Les scénarios sismiques comme outils d'aide à la décision pour la réduction des risques : projet pilote à Quito, Équateur. *Revue de Géographie Alpine*, tomo LXXXII, n° 4: 131-150; Grenoble.
- SOURIS, M., 1990 – Les méthodes informatiques pour l'Atlas de Quito. In: . Semifor 3, Système d'information pour l'environnement (Sechet P., ed.): 253-260; Paris: Éditions de l'ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, volumen 1.
- SOURIS, M., 1990 à 2005 – *Le système SAVANE, Manuels de référence*, IRD.
- SOURIS, M., BUSTAMANTE, G., TUPIZA, V. & ONA, D., 1996 – Quito sur le Web. *ORSTOM Actualités*, n° 50; Paris: IRD.
- SOURIS, M., 2002 – *La construction d'un système d'information géographique, principes et algorithmes du système SAVANE*, tesis de doctorado, Universidad de La Rochelle, 505 p.