

BALANCE HIDRICO DEL AMAZONAS Y SUS PROBABLES CAMBIOS

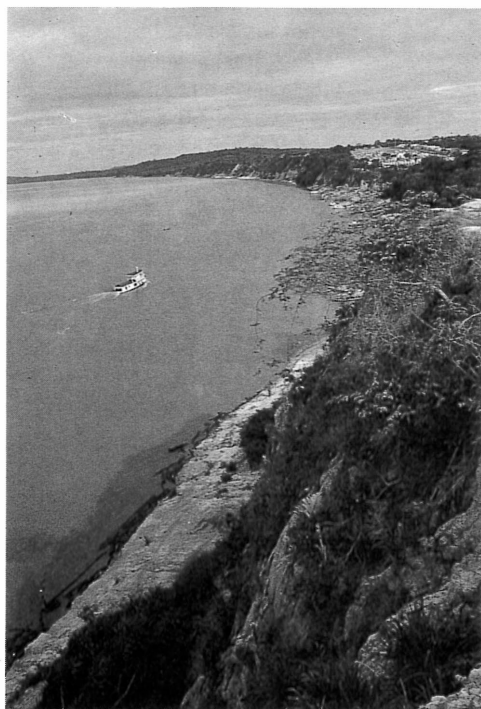
Por Manuel B. DENGÓ*

Aspectos físicos de la cuenca amazónica

Los límites físicos de la cuenca amazónica son las Guayanas y las tierras altas centrales del Brasil en los bordes septentrional y meridional y los Andes, que forman el límite occidental. La cuenca tiene unos $7 \cdot 10^6$ km², incluyendo la cuenca de los ríos Araguaya y Tocantins. La selva amazónica cubre unos $5,5 \cdot 10^6$ km² y cerca de un 60 por ciento está en la parte brasileña de la cuenca, el resto se distribuye entre Bolivia, Colombia, Ecuador, Guayana, Guayana francesa, Perú, Surinam y Venezuela[1].

El mismo informe [1] indica que los suelos están bien drenados, son ácidos, profundos y de poca fertilidad; sus colores típicos son el rojo y el amarillo. La Amazonia tiene dos tipos de suelos los *oxisuelos*, que ocupan un 45 por ciento y los *ultisuelos* que cubren un 30 por ciento. El resto va desde suelos fértiles y bien drenados en un 6 por ciento de la cuenca a tierras aluviales localizadas en las *várzeas* (llanuras inundables). Algunas de éstas son extraordinariamente fértiles, cruzadas por profundos bancos de arena de cuarzo blanco.

En la región se conocen tres tipos de ríos por el color de sus aguas: ríos de *aguas negras* como el Río Negro, ríos de *aguas claras* como el Río Tapajós y los que son conocidos como *ríos blancos* como el Río Solimões y el brazo principal del Amazonas, que tienen aguas cenagosas, cargadas de sedimentos. Los *ríos negros* proceden principalmente del norte de la cuenca y se originan en la selva de la Amazonia. Su color es el resultado de desaguar tierras muy lixiviadas, que se vuelven muy ácidas y libres de minerales. Su color oscuro se debe a los productos de la descomposición del humus de los suelos. Los *ríos claros* se originan principalmente al sur de la cuenca, en las tierras altas del centro de Brasil. Tienen



Obidas, Brasil — Situado a unos 900 km aguas arriba desde el Océano Atlántico, éste es el punto más bajo de la cuenca, en donde las medidas del caudal se hacen de todo el río con la técnica del bote móvil; el caudal medio anual es de 175 000 m³/s.

Foto: Manuel Dengo

pequeñas cantidades de sedimentos en suspensión y mayor cantidad disuelta y sus aguas son transparentes. Los ríos cenagosos —*ríos blancos* en el lenguaje regional— proceden del oeste. Se originan principalmente en los Andes y tienen bastantes sedimentos en suspensión, resultado de los procesos erosivos aguas arriba y están llenos de nutrientes que enriquecen los suelos de las *várzeas* después de cada crecida.

Condiciones del clima

Los vientos alisios del este, procedentes del Atlántico, transportan el vapor de agua hasta las barreras naturales, principalmente los Andes, en donde ocasiona lluvia y nieve.

(*) Asesor Técnico Jefe del proyecto "Apoyo agrometeorológico e hidrológico al regadío" Brasil, del PNUD/OMM/SENIR. (Secretaría Nacional de Regadío).

Debido a las características geomorfológicas de la cuenca y su situación a lo largo del cinturón ecuatorial de América del Sur los vientos cálidos y húmedos de la circulación atmosférica general y de la zona de convergencia intertropical son captados y determinan así el clima tropical cálido y húmedo de la región. La selva húmeda repite las lluvias traídas por los alisios. La transpiración y la evaporación superficiales causan la mitad de la lluvia de la región.

La lluvia anual varía entre 1 000 y 4 000 mm y en promedio, el flujo de la energía solar diaria es de 1 764 J/cm². Considerar la Amazonia como una vasta región con un clima uniforme cálido y lluvioso es un gran error. Los estudios han demostrado que hay más de 35 unidades macroecológicas en la región y, de acuerdo con los estudios emprendidos por el proyecto "Hidrología y Climatología de la Amazonia" del PNUMA/OMM/SUDAM(*) hay al menos siete regiones hidrometeorológicas[2].

Vigilancia

Redes hidrometeorológicas

La mayoría de las estaciones hidrometeorológicas de la cuenca amazónica están en las laderas más altas de los Andes o a lo largo de las orillas de los principales brazos del río. Esto es debido a que es difícil acceder a los sitios de medida: las orillas de los ríos y las carreteras son los lugares más accesibles. Las estaciones de medida están muy dispersas, probablemente por creer que las condiciones en la región son bastante homogéneas y también por las dificultades del acceso que complican el funcionamiento diario de cualquier sistema no automático de vigilancia del medio ambiente. Actualmente hay más de 1 200 estaciones meteorológicas en la parte brasileña de la cuenca (instaladas y operadas por varias instituciones): el 82 % son pluviométricas; el 15 % son climatológicas completas y el 4 % son evaporimétricas[3]. El Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET) mantiene 80 estaciones en la región, de las cuales 44 están en funcionamiento. El Departamento Nacional de Aguas e Energia Eletrica (DNAEE) tiene instaladas 476 estaciones pluviométricas en la cuenca, incluyendo la cuenca del Tocantins-Araguaya,

de las cuales 163 están fuera de servicio. En la cuenca principal del Amazonas hay 45 estaciones de medida de sedimentos y 10 en la cuenca del Tocantins-Araguaya. El DNAEE tiene también en servicio 10 estaciones de calidad de agua en la región. Los números son autoexplicativos: hay aproximadamente una estación meteorológica cada 5 000 km² y una estación hidrológica cada 12 000 km².

La telemedida

Son variados los trabajos de telemedida para vigilar diversos aspectos en la cuenca del Amazonas. Uno de los más útiles ha sido el proyecto RADAM, un análisis de los recursos naturales de la Amazônia Legal, realizado en los años 70 con radares a bordo de aviones y cuyo mayor interés eran los recursos minerales.

Otros estudios emplearon detectores muy variados instalados en satélites, incluido el AVHRR (radiómetro perfeccionado de muy alta resolución) de la NOAA, el LANDSAT MSS (scanner multispectral) y el TM (cartógrafo temático) y el SPOT (*Satellite probatoire d'observation de la Terre*). El principal inconveniente para aplicar este instrumental en la región es la frecuente y extensa capa nubosa que impide obtener buenas imágenes. Sin embargo, las imágenes de la telemedida son una de las mejores herramientas disponibles hoy para recopilar datos superficiales y vigilar las diferentes clases de alteraciones antropogénicas de la cuenca (p. ej. los científicos del *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE) han desarrollado un sistema para localizar y rastrear incendios forestales empleando las imágenes de la NOAA. Otras instituciones como el SUDAM y ELETRONORTE, realizan estudios de los ritmos anuales de deforestación, la vigilancia limnológica de los lagos artificiales y la vigilancia de los proyectos de desarrollo, de modo continuo (véase en la figura de la página 77).

Efectos del desarrollo

El desarrollo económico y social de la región amazónica empezó con la colonización portuguesa a principios del siglo XVI. Desde entonces ha experimentado explotaciones mineras y comerciales, como la famosa *Fiebre del Caucho* (1840-1910). Los cambios en la estructura agrícola en el sur del Brasil durante los últimos 20 años han tenido un efecto marcado en la ocupación de la Amazonia. La

(*) Superintendencia para o Desenvolvimento da Amazônia.



Brasil — Una tala en el bosque durante la construcción de la Presa de Tucuruí.

Foto: Manuel Dengo

ampliación de las plantaciones de soja dejó sin empleo a 11 de cada 12 obreros agrícolas. El crecimiento de las plantaciones de caña de azúcar en apoyo del programa nacional de producción de alcohol arruinó a muchos pequeños agricultores. Además, la sustitución de plantaciones de café, que son de cultivo intensivo, por plantaciones de otras cosechas como el trigo, cuyo cultivo está muy mecanizado, aumentó mucho el número de inmigrantes en la región Amazónica [4].

El Informe Preliminar Brasileño para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Río de Janeiro, 1992) [1] indica que, desde la disminución en la producción de caucho, las actividades socioeconómicas en la región se han desarrollado de muchas maneras: castañas de Pará, maderas preciosas, pieles de animales, y oro y otros metales, se convirtieron en materias de exportación. La demanda internacional convirtió a la región Amazónica en una fuente de recursos raros tales como maderas duras, energía eléctrica y metales, como el hierro y el aluminio, necesarios para la industria. Poco a poco, la economía tradicional de la región, que había estado bien adaptada al medio amazónico durante siglos, cambió; el

constante movimiento de la población y las actividades mineras en los territorios indios y comarcas deshabitadas, han contribuido mucho a estas modificaciones. El informe señala también que la falta de éxito de la agricultura, el descubrimiento de reservas minerales inmensas y la minería del oro y la casiterita produjeron transformaciones de enorme impacto. Uno de los impactos más grandes en el medio ambiente fue el causado por la minería del hierro y otros minerales en el proyecto Grande Carajás, así como por la extracción de bauxita en la cuenca del Río Trombetas. Las centrales hidroeléctricas de Tucuruí en el Río Tocantins y Balbina, cerca de Manaus han creado graves problemas regionales y han contribuido a los cambios en la estructura ecosocial de la Amazonia.

El mismo informe reconoce que durante esta evolución, los intereses económicos predominaron sobre los valores ecológicos, biológicos y culturales, causando efectos negativos sobre los ecosistemas y los pueblos de la región. Dice también que las incesantes alteraciones de la capa forestal, causadas por la deforestación y los incendios, son una fuente de preocupación en relación con el efecto invernadero y el cambio del clima. También



Torre de observación de la temperatura del bosque en la cuenca Tarumá-Açú, cerca de Manaus, Brasil.

Foto: Manuel Dengo

indica que las actividades de la minería del oro en ríos como el Madeira y el Tapajós han producido contaminación y daños estructurales y culturales a las poblaciones locales y dañado gravemente a la calidad del medio ambiente.

Cambios probables

Todos los procesos mencionados producen alteraciones que afectan al contenido de agua en la Amazonia. El texto siguiente es traducción libre de un extracto del escrito presentado por el Dr. Elías Salati [5] en el Congreso Brasileño en septiembre de 1979:

“La principal alteración prevista en el balance hídrico, en caso de continuar la deforestación a gran escala sin replantar, es la disminución de la precipitación en forma de lluvia.

Como consecuencia inmediata se producirán cambios rápidos en la composición de las estructuras biológicas del ecosistema, desde los microorganismos hasta los grandes mamíferos; otras poblaciones, en número y calidad, deberán ocupar los nuevos nichos ecológicos. A consecuencia de las alteraciones en el régimen de lluvias habrá modificaciones

en los niveles de los ríos, lo cual introducirá desequilibrios en los sistemas actuales de reproducción, alimentación y crecimiento de los peces. Son difíciles de predecir las consecuencias para la actual fauna piscícola, ya que las cadenas de los sistemas de alimentación y reproducción de muchas especies no son bien conocidas... Es pertinente recordar que la deforestación no vendrá sola: habrá complementos como la contaminación de los suelos, el agua y el aire, como ha demostrado la historia en otras partes del mundo...”

Hacia la parcelación económico-ecológica: el balance hídrico

Por la nueva Constitución, el Gobierno Brasileño [1] ha reconocido la necesidad de la ordenación territorial como parte del proceso de planificación del desarrollo.

Se ha decidido que la Amazonia Legal, que tiene el 60 por ciento del país (unos 5 000 000 km²) y comprende los estados de Amapá, Amazonas, Mato Grosso, la parte occidental de Maranhão, Pará, Rondônia, Roraima y Tocantins, tiene máxima prioridad de parcelación económica-ecológica. Esta región presenta, en sus espacios regionales, un gran predominio de las condiciones naturales sobre los efectos de las actividades socioeconómicas. A pesar de agresiones recientes, la Amazonia conserva la mayoría de las características naturales que hacen de ella una región para un desarrollo mantenible.

El balance hídrico es un elemento en el proceso de parcelación en cualquier región del mundo, pero es especialmente importante en la cuenca del Amazonas, donde el agua es uno de los recursos más importantes y donde pueden tener múltiples efectos los cambios en los componentes del ciclo hidrológico, debidos a cambios en otros componentes del entorno natural de la cuenca.

EL DNAEE evalúa actualmente el balance hídrico en varias subcuencas de la parte brasileña de la cuenca amazónica. Este esfuerzo tiene un significado especial, ya que será la base para una futura parcelación y cálculos más precisos del balance hídrico. La cuenca del Alto Purús (150 000 km²) ya ha sido valorada y actualmente se trabaja en la cuenca del Río Madeira y el resto de la cuenca del Purús. SUDAM y el DNMET serán responsables de la cuenca del Tapajús y la *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*

y el DNAEE lo serán del Río Negro y lo será del resto de la cuenca un equipo mixto de todas estas instituciones. El proyecto necesitará para terminarse unos cuatro años. Actualmente, por el PNUD, OMM y UNESCO hacen un esfuerzo complementario para ejecutar un proyecto en el cual participen todos los países de la Amazonia a fin de obtener los parámetros del balance hídrico para toda la cuenca.

Debe verse el balance hídrico no sólo en función de la masa o cantidad de agua, sino también como un balance de las masas de sólidos disueltos o en suspensión que determinan la calidad del agua. Los hidrólogos deben poder evaluar los cambios en la cantidad de agua y su composición en cualquier momento para poder determinar si un proceso de desarrollo puede o no deteriorar el recurso.

Para poder valorar los procesos que controlan el ciclo del agua, incluyendo las cargas suspendidas y disueltas, el analista debe tener acceso a diversas herramientas, unas básicas, otras más elaboradas, pero que combinadas, facilitarán la adquisición de la información necesaria sobre la que basar decisiones referentes a la evolución del recurso, a la luz de los diferentes desarrollos —naturales o artificiales— en la cuenca.

La idea del balance hídrico como la hemos explicado, implica que debe ser actual. Debe estar basado en, y deducido de las relaciones que representan una base histórica de cálculo, pero para que se use en la toma de decisiones, debe referirse a las condiciones actuales. De otro modo, ni la planificación ni las medidas de control o correctivas lograrían sus propósitos.

Esto impone condiciones muy especiales a los sistemas de recopilación de datos y a los sistemas de gestión de datos del medio ambiente, que deben ser bastante grandes para representar bien la realidad y bastante rápidos para dar pronto resultados. Debe hacerse una valoración cuidadosa de los sistemas existentes y tomar las decisiones para incorporar lo que ofrece la mejor tecnología.

Recopilación de datos

Redes e instrumentos

Es fundamental mejorar los sistemas de recopilación de datos del medio ambiente en la región para poder detectar y valorar los

cambios del balance hídrico y de otras condiciones del medio ambiente en toda la cuenca. La instrumentación de la red hidrometeorológica en todo el mundo está cambiando lentamente de sistemas principalmente mecánicos a una combinación de instrumentos mecánicos y electrónicos. La mayoría de los registros de datos en bruto están pasando de las hojas de papel tradicionales a diferentes tipos de soportes electromagnéticos. Estos cambios tienen importantes ventajas para los servicios hidrometeorológicos, ya que permiten un flujo más rápido de datos desde el punto en que se recogen al lugar en que se analizan. Los diferentes servicios que operan en la región deben empezar a ampliar y modernizar sus redes para ser técnicamente capaces de valorar los procesos del medio ambiente que ocurren en sus zonas de responsabilidad.

Los modernos sistemas de telemedida desde los satélites, geoestacionarios o de órbita polar, deben usarse ampliamente. Deben renovarse las redes existentes y las estaciones



Río Tocantins, cerca de Marabá, Brasil — Plataforma para recoger datos del GOES, instalada en 1982 por el proyecto “Hidrología y climatología de la Amazonia” del PNUD/OMM/SUDAM y aún en funcionamiento.

Foto: Manuel Dengo

que pararon deben funcionar de nuevo. Deben hacerse esfuerzos especiales para integrar las medidas de la calidad del agua en las redes de medida de la cantidad de agua, con el fin de vigilar los parámetros químicos clave en toda la cuenca.

Teledetección

En los primeros años del próximo decenio habrá nuevos satélites y detectores que producirán imágenes aún más valiosas para el hidrólogo y el especialista en recursos hídricos. Serán especialmente importantes las imágenes del radar (no instalado en ningún satélite operativo hasta el lanzamiento del ERS-1 en agosto de 1991) para la cuenca del Amazonas, donde la capa nubosa es un elemento constante, para detectar el relieve del terreno y la textura de los bosques y del agua.

Se dispondrá más fácilmente en un futuro próximo de información digital de la radiación solar, el vapor de agua en la atmósfera y las estimaciones de la precipitación sobre grandes superficies y los científicos del medio ambiente en la Amazonia se beneficiarán así de estos parámetros con distribución espacial implícita.

Nuevas técnicas en desarrollo para las imágenes videográficas, como cámaras de video montadas en diversos tipos de plataformas tales como aviones tripulados y sin piloto, autos, canoas, etc., proporcionarán imágenes a un coste relativamente bajo. Se están desarrollando los programas para procesar estas imágenes y se podrán usar en pocos años. Estos desarrollos permitirán a los hidrólogos tener bancos de datos digitales de imágenes de video de diferentes regiones y temas y con varios grados de resolución y de cobertura espacial, un suplemento muy importante a los datos de campo del agua. Permitirá también vigilar los procesos antropogénicos en comarcas críticas y ayudará a valorar y controlar los incendios forestales o cualquier otro proceso de degradación (o de mejora) del medio ambiente.

Sistemas de información del medio ambiente

El aumento de las instalaciones para tomar datos en toda la cuenca, sea en la forma de medida directa o de teledetección, implica reforzar la capacidad de procesar datos de las diferentes instituciones que actúan en la Amazonia. Este reforzamiento de las instalaciones de proceso de datos debe

hacerse en forma de sistemas integrados de información del medio ambiente, lo que incluye múltiples parámetros que residen en bases de datos interrelacionadas.

La gestión integrada de los recursos naturales requiere enormes cantidades de información para fines muy variados: generación de hipótesis, valoración de la política y de sus resultados, valoración del estado de diferentes recursos naturales, valoración de los riesgos naturales, estimación de impactos sobre el medio ambiente, cálculos del balance hídrico, y otros [6].

Los sistemas de información del medio ambiente, sistemas digitales de proceso de imágenes y sistemas de información geográfica, acoplados a modernos ordenadores son las herramientas actualmente disponibles para que los especialistas en recursos naturales puedan realizar tipos diferentes de estudios y análisis. En el caso específico del balance hídrico en la cuenca amazónica es imperativo que haya sistemas de información seguros y compatibles en las diferentes instituciones, que puedan manejar la enorme cantidad de datos necesarios.

Bases de datos tradicionales

El tipo tradicional de las bases de datos es cada día más frecuente y más completo en los diferentes campos técnicos de las ciencias del medio ambiente. La mayoría de las instituciones que trabajan en este sector han instalado o están en el proceso de instalar sistemas de bases de datos capaces de manejar los datos de diferentes parámetros medioambientales. Debe reconocerse que, para poder manejar toda la información requerida para los cálculos del balance hídrico en una región de las dimensiones de la cuenca del Amazonas es absolutamente esencial el proceso por ordenador de los datos; de otro modo la gran cantidad de datos abrumaría al especialista más calificado.

Durante los diez años últimos en Brasil ha habido una marcada tendencia a crear bases de datos hidrometeorológicos, un ejemplo de lo cual es el Centro de Hidroclimatología y Teledetección de Amazonia (CHTA) de SUDAM. Las observaciones hidrometeorológicas han sido muestras de los parámetros del medio ambiente a partir de una base más frecuente y consistente en esta parte del mundo, y así se siente la necesidad de gestionar estos datos por la mayoría de las instituciones que actúan

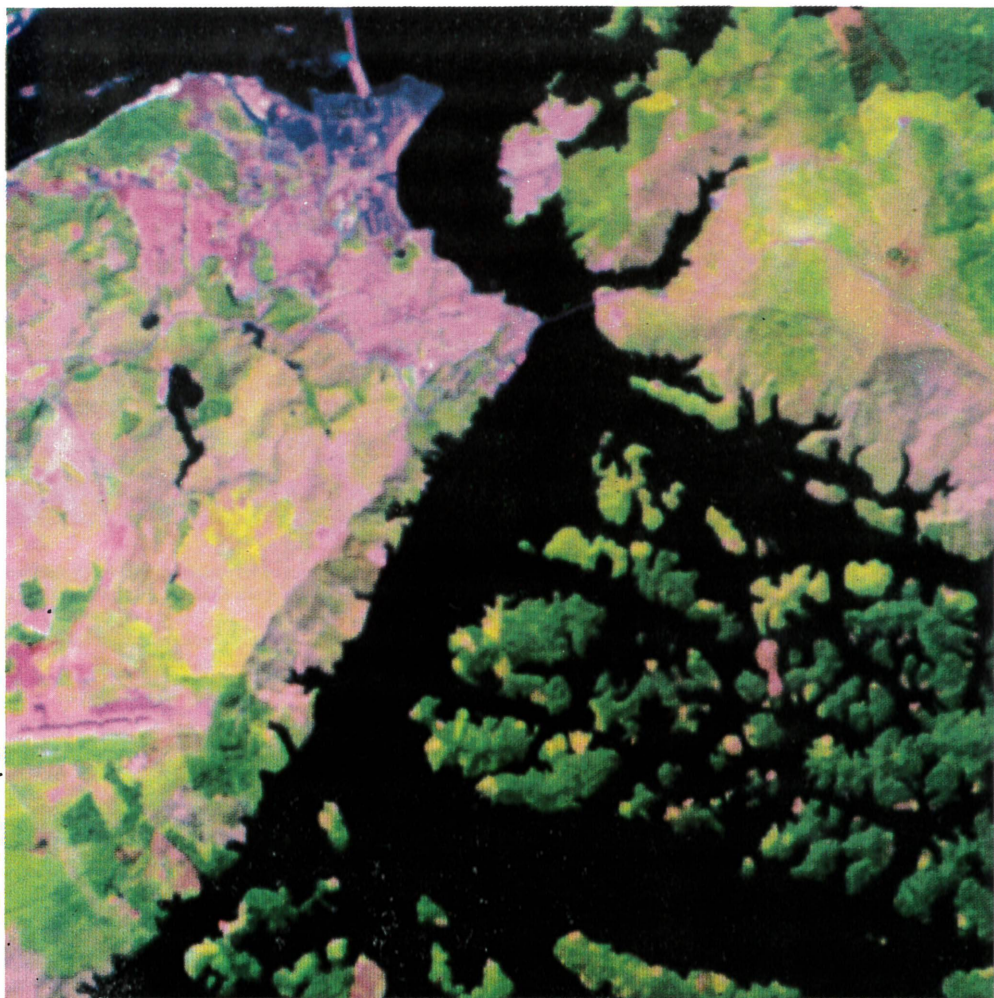


Imagen del embalse de Tucuruí cerca de la presa, por el LANDSAT TM. Se usa un código de colores artificiales en los canales 5, 4 y 3 para detectar los cambios en la cubierta del terreno.

Foto: SUDAM/CHTA



Cataratas del Iguazú, Brasil — El caudal del río Iguazú se estima en unos 1700 m³/s. El agua en las cataratas cae por 275 precipicios de hasta 70 m de altura distribuidos en un arco de 2,7 km de longitud. Aguas arriba el río corre a una altitud de más de 900 m y se une al río Paraná a menos de 100 m sobre el nivel del mar.

Las cataratas las descubrió a fines de 1541 el español Alvar Núñez Cabeza de Vaca en una expedición desde Santa Catalina en la costa atlántica brasileña hasta Asunción. Iguazú significa “grandes aguas” en el idioma guaraní.

Foto: Tania Tang



en esta zona. Varias de ellas han adquirido considerable pericia en crear bases de datos, mientras otras están aún en las fases iniciales de automatizar el manejo de datos.

El método recomendado para la política regional de bases de datos en la cuenca del Amazonas, teniendo en cuenta su carácter internacional, así como sus complejidades nacionales, es el de reforzar la capacidad de gestión de las bases de datos de las instituciones de cada país, y adoptar formatos homogéneos para los diferentes tipos de datos, de modo que se consiga, en un tiempo relativamente breve, un grado de uniformidad que facilite el intercambio de datos entre diferentes instituciones regionales y locales que trabajen en un mismo campo. Así se espera formar una base de datos regional distribuida no centralizada y cuyos elementos están controlados por las instituciones responsables de la recopilación de datos en cada región o país. Esto es importante porque permite proporcionar un mejor servicio a los usuarios por las instituciones y se eliminan los problemas asociados con una base de datos regional única y muy grande, a saber:

- Exigencia de *software* y *hardware* muy grandes y mucho personal;
- Problemas relacionados con la información puntual para mantener la base de datos al día;
- Problemas que nacen del extremado celo institucional referente a los derechos y propiedad de los datos;
- Problemas debidos a tener que aceptar la responsabilidad sobre la calidad de los datos sin controlar la recopilación y proceso de los datos en bruto.

Sistemas de información geográfica

El analista de sistemas del medio ambiente siempre necesita exponer y analizar la información disponible, incluyendo su aspecto espacial, y esto es particularmente cierto en el caso del balance hídrico. Es habitual resumir la información disponible para su estudio sobre diferentes tipos de mapas. Así el mapa se convierte en el marco geográfico para interpretar y analizar los datos. Hacer manualmente este trabajo exige a la vez mucho tiempo y personal y lo que aún lo limita más, la mayor parte del trabajo realizado es específico para un estudio y no es aplicable a otros.

Los sistemas diseñados para archivar, gestionar y exponer la información geográfica o espacial son conocidos como sistemas de información geográfica (SIG). Con la revolución actual de los ordenadores estos sistemas están disponibles para un gran número de usuarios y se están convirtiendo rápidamente en una herramienta generalizada para analizar el medio ambiente y los recursos naturales. Permite la integración de la información acumulada en la base de datos tradicional con la información clasificada obtenida por medio de sistemas de proceso de imágenes y con otra información gráfica tal como los mapas corrientes. Son de la máxima importancia para calcular el balance hídrico de la Amazonia el cual, a su tiempo, será empleado para crear un modelo dinámico distribuido de los procesos hidrometeorológicos en toda la cuenca y podrá calcular el balance hídrico en cualquier punto dado de la cuenca de un modo dinámico.

Comentarios finales

Deben mejorarse las condiciones para la vigilancia de los cambios del medio ambiente en la cuenca amazónica que afectan al balance hídrico si debe alcanzarse sensibilidad para detectar tendencias del cambio. Hoy día las observaciones siguen siendo insuficientes y aparte la información respecto a la contaminación por el mercurio, no hay aún pruebas seguras de que se produzca ningún cambio como los mencionados en [5].

Referencias

- [1] Comissão Interministerial para a Preparação da CNUMAD, 1991: *Subsidios Técnicos para Elaboração do Relatório Nacional do Brasil* para a CNUMAD, Brasília.
- [2] Shawinigan Eng. and Co. 1983: *A Square Grid Hydrological Study of the Amazon*, final report.
- [3] Noe Dobrea, I., 1989: *Climatology and Agrometeorology of the Brazilian Amazon Region*, UNDP Internal Technical Report, Brasília.
- [4] Fearnside, P. M., 1990: *Estradas que levam à devastação*, Ciencia Hoje, 11 (61), 47-52.
- [5] Salati, E., 1981: *Floresta e Clima da Amazônia*, B. FBCN, Rio de Janeiro, 16, 120-135.
- [6] Dengo, M. B., 1988: *Geographic Information Systems in Watershed Management*, Workshop on Data Base Management in Forestry Research, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 20-25 June 1988, 79-85.