

## **S.A.G.A.R.A.: “SISTEMA DE AYUDA A LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA”**

*Marc Alary \**, *Pierre Pourrut \*\**, *Jérôme Patoux \*\*\**

### **Resumen**

La complejidad de la información colectada a propósito de los recursos hídricos en la región de Antofagasta condujo a la elaboración de un Sistema de Información Geográfica.

Este sistema, trabajado en un potente software, proporciona a quienes se preocupan de la gestión del agua en esta zona extremadamente árida, y con demandas en constante aumento, una base de datos muy completa y a la vez muy fácil de manejar.

Este SIG pretende apoyar técnicamente una gestión racional del magro capital “agua”.

**Palabras claves:** *Aridez, agua, oferta, demanda, SIG, planificación regional.*

### **SAGARA : SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION DE L'EAU DANS LA RÉGION D'ANTOFAGASTA**

### **Résumé**

La complexité de l'information collectée dans le domaine des ressources hydriques de la région d'Antofagasta a conduit à la mise en place d'un Système d'Information Géographique.

Ce système géré par un puissant logiciel, fournit à tous ceux qui se préoccupent de la gestion de l'eau dans cette zone particulièrement aride, et aux besoins toujours croissants, une base de données très complète et à la fois très facile à utiliser.

Ce SIG a pour but d'offrir un appui technique et ainsi permettre la gestion rationnelle d'un capital en eau limité.

**Mots-clés :** *Aridité, eau, offre, demande, SIG, planification régionale.*

### **SAGARA: MANAGEMENT WATER SUPPORT SYSTEM IN THE ANTOFAGASTA DISTRICT**

### **Abstract**

The complexity of the information collected in the area of the hidrical resources in the Antofagasta district led to the settlement of a Geographical Information System.

---

\* IRD (ex-ORSTOM), 227, Rue de la Mouline, 82100 Castelsarrasin - Francia.

\*\* IRD (ex-ORSTOM), Route de Tosse, Le Vieux Claquet - 40 230 Saint Vincent de Tyrosse, Francia. E-Mail: Pierre.Pourrut@wanadoo.fr

\*\*\* IRD (ex-ORSTOM), UCN, Antofagasta, Chile.

This highly powerful software managed system provides a very complete and easy-to-use database to whom involved with all water management matters in such arid and constantly increasing requirements zone.

GIS is aimed at providing a technical support so as to allow a more rational management of the scarce water capital.

**Key words:** *Aridity, water, offer, demand, GIS, regional foresight.*

## INTRODUCCIÓN

### **Problemática general**

Los recursos hídricos han sido siempre objeto de especial preocupación y la escasez de agua sigue constituyendo el mayor de los factores limitantes para llevar a un feliz término los objetivos programados para el desarrollo sustentable de la IIª Región. El proceso ya histórico del aumento de la explotación de este elemento ha tomado desde hace poco tiempo un rumbo acelerado, debido principalmente al constante crecimiento de las demandas de las poblaciones urbanas y de la industria minera. Siendo estos sectores esenciales en los procesos del desarrollo, es evidente que sus requerimientos deben ser satisfechos, aunque sin interferir con el uso agrícola tradicional del agua so pena de asistir a la desaparición de algunas comunidades rurales cuyos rasgos culturales constituyen un patrimonio no sólo regional sino universal.

El Sistema de Información Geográfica SAGARA (Sistema de Ayuda a la Gestión del Agua en la Región de Antofagasta), recientemente implementado, nació de tal problemática general, y el presente artículo pretende exponer su estructura, explicar su funcionamiento y demostrar su utilidad. Por último, con el fin de ilustrar mejor la agilidad y sencillez de dicha herramienta, se presentan algunos ejemplos sencillos para el establecimiento teórico de proyectos vinculados con los recursos hídricos en la IIª Región.

### **Problemática específica**

El agua, si se la considera como un elemento constituyente del medio ambiente, adquiere en el caso presente una importancia relevante debido a que la región estudiada tiene dos características originales: en primer lugar porque se ubica entre las más áridas del mundo, y en segundo lugar porque es el escenario de una explotación desenfadada de sus recursos mineros, traduciéndose todo lo anterior en una serie de conflictos potenciales y en el peligro de producirse procesos irreversibles en el equilibrio de una naturaleza extremadamente frágil.

Frente a este riesgo latente, los objetivos económicos planteados por el Gobierno para el desarrollo de la IIª Región y la calidad de vida de sus habitantes constituyen también argumentos de peso.

Una de las formas para responder a una problemática regional tan aguda pasa por la implementación de políticas de gestión racional del recurso agua, con estrategias que satisfagan las demandas de todos los sectores, pero sin perjuicio para el medio natural.

Ahora bien, implementar este paquete de estrategias con visión a futuro significa, en primer lugar, conocer la integridad de los parámetros que intervienen como factores principales del manejo del recurso agua, entre los cuales destacan todos los innumerables datos relativos al binomio oferta-demanda a distintos plazos.

## 1. PARTE ANALÍTICA

Un examen detenido mostró que la información disponible, a pesar de ser muy abundante, era muy heterogénea tanto cuantitativa como cualitativamente. Era la mayoría del tiempo obsoleta frente a la aceleración del proceso de explotación del agua. Podía ser extremadamente densa en algunas zonas y totalmente ausente, en otras, a veces de buena calidad y otras veces de confiabilidad muy dudosa, hasta contradictoria. Sobre todo, carecía totalmente de organización y se encontraba esparcida en una gran cantidad de informes generados por numerosas instituciones, públicas o privadas, siendo en algunos casos de acceso difícil o prohibido por ser información confidencial generada a petición de algunas empresas con capitales privados.

Dado la importancia del problema, la tarea prioritaria era juntar toda esta información, analizarla, criticarla, seleccionarla, definir las carencias por ser completadas gracias a la implementación de nuevas estaciones de observación, en fin transformarla en grupos de datos organizados de manera coherente para permitir una utilización óptima.

Este trabajo analítico lo hizo el grupo de investigación chileno francés UNIRHI (Unidad de Investigación de los Recursos Hídricos) en el marco de un convenio suscrito entre la Universidad Católica del Norte y el Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération ORSTOM (véase la comunicación presentada por Pierre Pourrut respecto de los logros de este convenio).

### 1. 1. Descripción de las etapas

La tarea delicada de análisis de los datos se dividió en cuatro etapas distintas:

1/ recolección de la mayor cantidad de información desde las fuentes más diversas, entre las cuales cabe mencionar la Dirección General de Aguas (DGA);

2/ generación de nueva información, mediante el inicio de estudios en las nuevas estaciones de medición instaladas en las zonas definidas como muy carentes de datos (debe señalarse la participación muy positiva de ESSAN S.A.), a través de distintos proyectos de investigación definidos y llevados a cabo por los ingenieros y académicos de la UCN y, por último, gracias a la realización de un gran número de memorias de grado o licenciatura por parte de estudiantes dirigidos (profesores guías) por los integrantes de UNIRHI;

3/ selección de los datos en cuanto a su confiabilidad y precisión, y crítica de los mismos con el fin de estimar su interés relativo para la constitución de una base de información aprovechable;

4/ organización racional de estos datos para permitir su consulta rápida.

## **1. 2. Factores limitantes**

Una vez realizada la primera parte de la fase analítica se vislumbró que la densidad y la complejidad de la información así obtenida no permitía todavía una utilización óptima, a menos que fuese dirigida, exclusivamente, a los pocos especialistas que podían manejarla.

Tomando en consideración que, con miras a una gestión armónica del potencial regional de aguas, los usuarios privilegiados debían ser los responsables de la planificación regional (ellos están al tanto de las grandes proyecciones políticas, pero no siempre son especialistas en hidrología o hidrogeología, lo que dificultaba sustancialmente el provecho que podían sacar del trabajo anterior), se hizo sentir la necesidad de encontrar otra fórmula que permitiera darles un acceso íntegro a la información de manera más ágil y más sencilla.

## **2. SÍNTESIS - CREACIÓN DE UN SIG**

En el sentido expuesto en el capítulo anterior, se llevó a cabo una reflexión para encontrar el medio de sintetizar mejor la información, la que desembocó en la decisión de crear un sistema dinámico que permitiera visualizar, en forma rápida y sencilla, una gran variedad de parámetros susceptibles de ayudar en la toma de decisiones a distintos plazos. Con tal propósito, desde 1995, se está implementando un Sistema de Información Geográfica (SIG), alimentado a partir de grupos de datos monotemáticos.

### **2. 1. Objetivos de SAGARA**

El papel fundamental del sistema SAGARA es proporcionar una herramienta de ayuda multifacética, que apoye tanto a quienes intervienen directamente en las labores de planificación a nivel regional, como a los usuarios preocupados en las más diversas utilidades del agua, para la realización de proyectos de investigación, suministro de agua potable, actividades agropecuarias, explotación minera, etcétera.

Obviamente, SAGARA no pretende solucionar todos los problemas relacionados con los recursos de agua y tampoco ser la única fuente de información válida para llevar a cabo un proyecto entero. Sin embargo, siendo usado racionalmente junto con la información conseguida por otras fuentes, en particular la observación directa en el terreno por personas vinculadas al tema, SAGARA es una herramienta poderosa y eficiente para proporcionar, rápidamente, todos los elementos necesarios con miras a la toma de decisiones o solución de conflictos potenciales.

### **2. 2. Principales características computacionales y algunas ventajas de SAGARA**

La ventaja del sistema es que permite superponer y cruzar entre sí los diferentes tipos de información, restituyéndolos bajo la forma de mapas pluritemáticos acompañados con tablas o listas que detallan los atributos correspondientes. El SIG ha sido realizado utilizando un programa del software *ArCInfo 7.0* instalado en una potente estación de trabajo **Silicon Graphics**. La gran capacidad de almacenamiento de esta computadora

(más de 2 000 Mbytes), que trabaja con el sistema operativo UNIX, permite el procesamiento, la organización y la operación simultánea de una gran cantidad de información.

Este programa lo manejan los que se dedican a la parte computacional del trabajo pero, para los que quieren consultar los datos procesados en SAGARA, ha sido diseñada una interface gráfica, llamada *Arcview*, cuyo fácil manejo permite a todos el acceso a la información, mapas o valores numéricos, a la escala deseada. Los temas que se puede consultar mediante dicha aplicación son de dos tipos:

- **los vectores**: objetos geométricos tales como puntos, líneas y polígonos, que representan elementos geográficos significativos. Las ciudades pueden ser, por ejemplo, representadas como puntos, los ríos como líneas, los salares como polígonos. Cada elemento recibe luego una serie de datos alfanuméricos que describen sus características (nombre del lugar, altitud, valor del caudal...), presentadas en forma de listas o tablas que pueden consultarse mediante *Arcview* (Fig. 4).

- **los "rasters"**: representaciones en dos o tres dimensiones de superficies digitalizadas en forma de redes con mallas geométricas regulares. Cada celda recibe el valor medio de la variable considerada (caso del "grid") o su valor en el centro de la celda (caso del "lattice"), de tal modo que, en su conjunto, la red de mallas permita visualizar las variaciones en el espacio. Las más conocidas son los Modelos Numéricos de Terreno (MNT) que van discretizando la topografía llegando hasta la resolución (respetable para tal escala) de un kilómetro para continentes enteros (Fig. 1). Los "rasters" contienen también las imágenes satelitales cuya representación en pixels o bandas otorga una resolución mucho más precisa.

### 3. ESTRUCTURA DE SAGARA

El SIG se compone de tres directorios principales, dentro de los cuales se encuentran subdirectorios, refiriéndose cada uno a un tema diferente:

► Directorio "**Sudamérica**": contiene un cierto número de elementos generales relacionados con el subcontinente:

- el *Modelo Numérico de Terreno (MNT)*, que muestra las variaciones de la topografía, con una resolución de 1 km;

- las *grandes ciudades* del continente.

► Directorio "**IIª Región**": contiene la mayor cantidad posible de parámetros cualitativos, cuantitativos, y, eventualmente, la evolución de ciertas variables. Contiene:

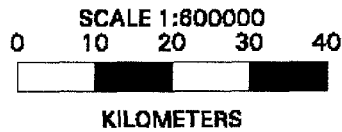
- *mapa básico regional de referencia*, para la colocación de la información requerida por el usuario;

- elementos geográficos:

■ MNT de la IIª Región,

■ Topografía: curvas de nivel cada 100, 500 y 1 000 metros,

■ Límites administrativos: región, provincias, comunas, con su población respectiva,



**Fig. 1 - Ejemplo de Modelo Numérico de Terreno: cuenca del río Toconce.**

- Zonas pobladas: ciudades y pueblos con su número de habitantes respectivo,
  - elementos geológicos y morfológicos:
- Red de fracturas: da la ubicación de las numerosas fallas y fracturas que compartimentan la zona en distintas unidades fisiográficas,
  - Volcanes,
  - Yacimientos: cobre y otros minerales,
- Industria: abarca todas las actividades de extracción minera (cobre, bórax, litio, salitre, etcétera) así como las demás actividades industriales clásicas; otorga algunos datos como el número de empleados, la producción anual, el primer año de funcionamiento del sitio, etcétera.
  - elementos hidrográficos:
    - Redes de drenajes permanentes y temporales

- Ríos de donde se extrae el agua
- Salares y lagunas
- Cuencas
- Vegas y bofedales
- elementos hidrológicos e hidroquímicos:
- Caudales mensuales y anuales medios medidos por la DGA y el grupo UNIRHI en varios puntos de los ríos de la zona, con su estadística cuando el registro lo permite (valores de las frecuencias y períodos de retorno),
- Cantidades de sales disueltas presentes en el agua de los ríos en varios puntos (en la tabla de los atributos figuran solamente los valores correspondientes al año de medición más reciente) y elementos nocivos como boro, arsénico, etc.
- elementos meteorológicos:
- Temperaturas mensuales y anuales medias medidas por la DGA en distintas estaciones meteorológicas dispuestas a lo largo de toda la región, sobre todo en las partes precordillerana y altiplánica,
- Precipitaciones mensuales y anuales medias medidas por la DGA en las mismas estaciones; la tabla de valores contiene, además, un estudio estadístico que destaca los tiempos de retorno de los años secos y húmedos,
- oferta-demanda:

La consulta de este subdirectorío puede ser de gran utilidad para la gestión racional de los recursos hídricos ya que permite conocer precisamente la ubicación y las características de todos los puntos de captación, tanto superficiales como subterráneos, inclusive de los que aún no están explotados.

- Oferta: captaciones efectivas o potenciales, ubicación en coordenadas geográficas de la fuente, origen del agua, caudal disponible en el momento,
- Demanda: tipo de captación (pozo, toma en río, manantial), tipo de uso (minero, agrícola, consumo público...), nombre o razón social del dueño, caudal requerido, caudal otorgado por derechos de agua,
- Red de distribución: muestra el esquema de la red de suministro de agua potable y de los lugares de tratamiento y almacenamiento (plantas, estanques).

➔ Directorio “**Imagsat**”: presenta una serie de imágenes satelitales *SPOT* y *LANDSAT* que, después de haber sido tratadas con el software **ERDAS**, destacan algunas características geográficas, geomorfológicas u otras, que se consideran como índices de existencia de agua (Fig. 2).

#### 4. SAGARA, SISTEMA DINÁMICO

Cabe subrayar el carácter dinámico que tiene tal sistema. No se trata de una base de datos fija sino de algo en constante evolución, que requiere de alguien capaz de manejar el programa y que lo actualice cada vez que sea necesario. Es así como los

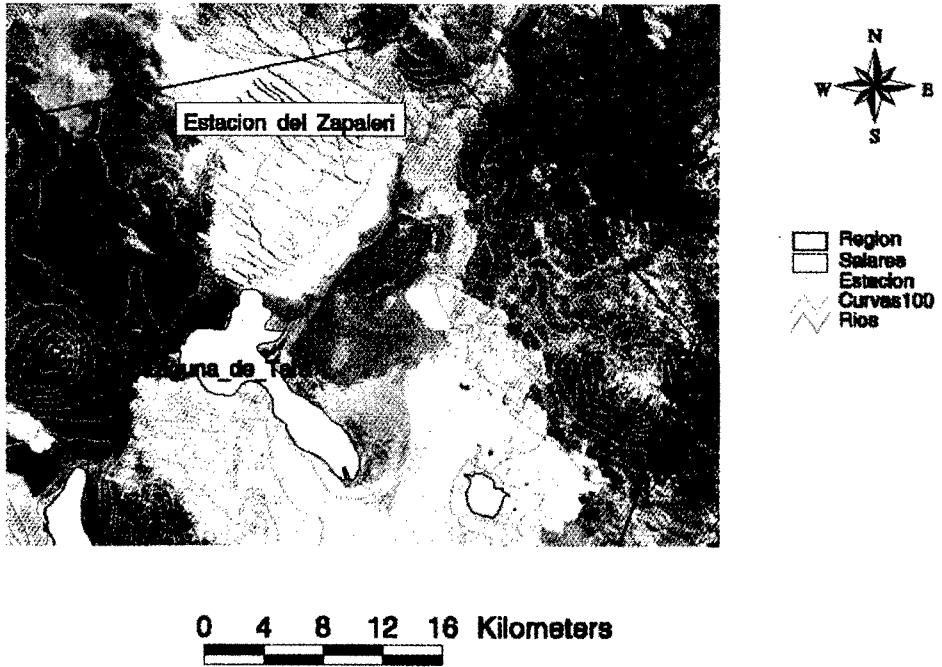


Fig. 2 - Uso de imagen satelital Landsat (sector Tara-Zapaleri) como soporte.

archivos antes descritos pueden sufrir todo tipo de rectificaciones o ser complementados de acuerdo con la obtención de nuevos datos.

De este modo, sin ser experto y usando siempre una información actualizada al día, es posible proceder a efectuar todo tipo de combinaciones a la escala deseada, superposición de mapas o comparación de datos, hasta obtener una información confiable y coherente.

A partir de tres ejemplos prácticos (especulaciones teóricas), es posible demostrar la eficiencia de SAGARA como herramienta de ayuda *ad hoc* en la toma de decisión para la planificación de proyectos de aprovechamiento del territorio, ya sea a corto, mediano o largo plazo.

#### 4. 1. Ejemplo n° 1: mantención de los espacios verdes en la comuna San Pedro de Atacama

Estamos en el año 2010. La municipalidad necesita implementar un nuevo sistema de riego para la mantención y ampliación de sus áreas verdes. Se estima el caudal necesario en unos 5 l/s/día.

Al consultar SAGARA, el encargado del proyecto municipal podrá en primer lugar enterarse del emplazamiento de las fuentes que podrían abastecer el sistema en aguas superficiales, que son evidentemente los ríos San Pedro y Vilama, y podrá



también conocer los caudales disponibles de aquellos ríos en los puntos de mediciones más cercanos.

Sin embargo, esta información en sí misma no es suficiente ya que no toma en cuenta la utilización actual que reduce substancialmente el caudal del río agua abajo. Por lo tanto, tendrá que cruzarla con los datos relativos a la oferta-demanda, que proporcionan la información sobre los caudales disponibles y los que ya son utilizados.

Obtendrá así un mapa en el que aparecen el pueblo de San Pedro, los ríos, sus desagües al salar, los puntos representando las cantidades de agua presentes en las estaciones de medición y las captaciones de dicha agua, tanto explotadas como potenciales.

Podrá de esta manera considerar algunos puntos de oferta hasta elegir el que sería más susceptible de satisfacer las necesidades del regadío contemplado.

#### **4. 2. Ejemplo n° 2: suministro en agua potable a una aglomeración de 500 habitantes, población flotante de trabajadores de una explotación minera**

El problema al que se enfrenta el encargado del proyecto es tanto cuantitativo como cualitativo. Tiene en primer lugar que encontrar una fuente de agua susceptible de suministrar la cantidad requerida, basándose en un consumo *per capita* de alrededor de 80 l/hab/día,

Pero, por otra parte, esta cantidad de agua debe además ser de buena calidad química, ya que para una población tan reducida no se considera económicamente rentable prever otro tratamiento que una simple cloración.

En este caso SAGARA puede suministrar, rápidamente, una información sumamente útil. Así como en el **ejemplo n° 1**, se puede hacer una combinación de datos de tal manera que se obtenga, simultáneamente, la ubicación de las fuentes de agua que en el área considerada pueden ofrecer el caudal suficiente, la calidad química de dichas aguas, su variación con el tiempo y sus vínculos con las demás fuentes utilizadas para la actividad minera cercana, con el fin de escoger las que no ofrezcan ningún riesgo de contaminarse.

#### **4. 3. Ejemplo n° 3: combinación de variables para la optimización del conocimiento**

Es importante reiterar que una de las ventajas que ofrece el SIG es poder proporcionar una información coherente y completa a través de la combinación de distintas variables, consideradas simultáneamente.

La figura 3 ilustra el caso de un punto de oferta ubicado en la parte cordillerana de la IIª Región. Este punto, destacado en color amarillo (cabe decir que la figura 4 se muestra exactamente tal como se la visualiza en la aplicación *Arcview*), está rodeado con toda la información en cuanto a las características geográficas y ambientales del área, además de las otras ofertas del sector y del uso que del agua se da en la cercanía. De este modo, además de la información básica, se puede establecer otros tipos de relaciones,

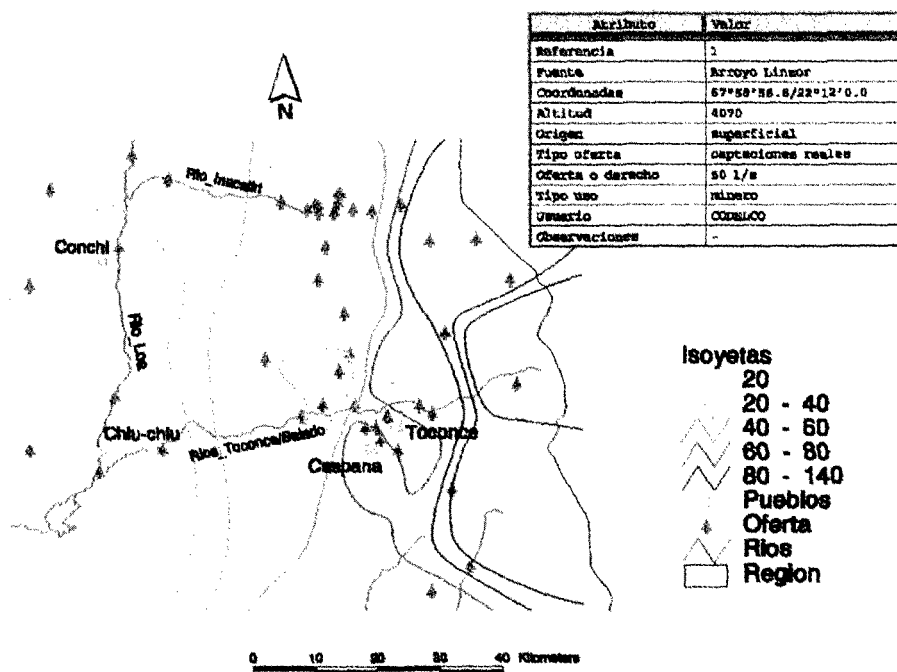


Fig. 3 - Oferta vs precipitaciones anuales en la cuenca del Río Toconce (punto seleccionando en amarillo).

por ejemplo la relación existente entre las precipitaciones (isoyetas) y el caudal específico del río en un punto escogido.

Inclusive si SAGARA no contiene todavía la información necesaria respecto de la calidad y grado de contaminación potencial de los recursos hídricos en la región, la actual implementación del directorio "Imagsat", con una gran cantidad de imágenes satelitales de alta resolución, permitirá, muy próximamente, tener un apoyo de importancia (ubicación de los relaves, hidrogeología de los efluentes, rasgos geomorfológicos, estratos susceptibles de procurar una conducción subterránea de los flujos, acumulación de sedimentos en los cauces de inundación, etc.) como para poder analizar los casos comprobados de polución, e, inclusive, para llamar la atención sobre algunos puntos críticos con el fin de intervenir con la anticipación suficiente y prevenir los procesos de contaminación.

## 5. CONCLUSIÓN

La implementación del SIG SAGARA nació de una voluntad común de disponer, en un solo sistema, de la mayor cantidad de información confiable y actualizada respecto de los recursos de agua en la IIª Región, y, sobre todo, de poder consultarla fácil y rápidamente.

Una de las ventajas de SAGARA, con respecto a cualquier otra base de datos computarizados, es que permite visualizar los distintos parámetros de un problema determinado en una zona cualquiera de la región, a través de mapas y tablas. Otro beneficio es que el sistema permite cruzar informaciones monotemáticas, de tal forma que la gama de combinaciones escogida quede en una sola pantalla, teniéndose una visión sintética clara de todos los parámetros vigentes en un área predeterminada.

Por último, es de resaltar la simplicidad de la aplicación que conlleva el SIG, autorizando su uso sin dificultad alguna. Por todo lo dicho, SAGARA constituye sin duda una herramienta útil para suministrar los elementos necesarios para una planificación racional del uso de los recursos de agua en la IIª Región, al igual que puede ayudar para tomar decisiones pertinentes y rápidas en caso de conflicto.

Ahora bien, se debe subrayar que ser útil no es sinónimo de panacea universal y que, en ningún caso, SAGARA resolverá la integridad de los problemas vinculados con el uso, legítimo o indebido, del agua en una zona árida cuya demanda está en constante crecimiento. En efecto se requiere algo más, ya que ¿puede el sistema más sofisticado del mundo reemplazar la sabiduría del hombre de campo?

1998

# BULLETIN

de l'INSTITUT FRANÇAIS  
d'ÉTUDES ANDINES

Tome 27  
N° 3



*Variations climatiques et ressources en eau  
en Amérique du Sud: Importance et  
conséquences des événements  
El Niño*



COLOMBIE  
ÉQUATEUR  
PÉROU  
BOLIVIE

IRD

Institut de recherche  
pour le développement

CINQUANTENAIRE  
1948  
1998

IFEA