

Características hidrológicas e hidrogeológicas en el Archipiélago James Ross e Islas Shetland, área norte de la Península Antártica

A. Silva Busso

Instituto Nacional de Agua y Ambiente, Subsecretaría de Recursos Hídricos
Autopista Ezeiza-Cañuelas. Tramo J. Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina (1824)
E-mail: pntsas@ina.gov.ar.

RESUMEN

En el norte de la Península Antártica, las regiones que comprenden a este estudio son: la cuenca del Arroyo Matías que desagua en la Caleta Potter, Isla King George en el archipiélago Shetland del Sur; la cuenca del Arroyo Celia sobre el flanco Este de la meseta de la Isla Seymour; y la cuenca del Arroyo del Diablo en el Cabo del Buen Encuentro sobre la Isla Vega. Estas dos últimas ubicadas en el archipiélago Ross. Las mismas han sido objeto de investigaciones durante el último lustro, y han permitido definir y caracterizar ambientes cuyo comportamiento hidrológico superficial y subterráneo puede tipificarse para las zonas antárticas subpolares. Este estudio presenta tres áreas cuyas características hídricas superficiales y subterráneas locales son diferentes atendiendo a condiciones climáticas, geomorfológicas y criológicas distintas. La relación de la hidrodinámica local con estos factores es determinante del comportamiento e interacción del conjunto del sistema considerado. Se concluye en una propuesta metodológica para regiones subpolares en las que existen áreas de características hidrológicas e hidrogeológicas diversas y cuya diferenciación atiende a la relación de diversos factores ambientales.

Palabras clave: Antártida, Archipiélago Ross, Hidrogeología, Shetland del Sur

Hydrology and hydrogeology characteristics in James Ross Archipelago and Shetland Islands, north area of Antarctic Peninsula

ABSTRACT

The Shetland Islands, Ross Islands region in the north of Antarctic Peninsula has been studied in the last five years. This region includes the Matías basin in the King George Island (Shetland Islands), the Celia basin in Seymour Island and the del Diablo basin in the Vega Island (Ross Islands). The environmental characteristics, hydrology and hydrogeology behavior and local climatology has been evaluated and defined between two zone types in the subpolar Antarctic regions. This paper shows three different study zones, with the relationships among the local hydrodynamics, glaciology, criology and climatic conditions. These factors determine the surface water and groundwater system interactions. This proposed methodology for subpolar regions in Antarctica defines and characterizes different areas with hydrology and hydrogeology and their relationships with several environmental factors.

Key words: Antarctica, Archipelago Ross, Hydrogeology, Shetland Island

Introducción

La región norte de la Península Antártica aproximadamente entre los 60° y 64° de latitud conforma un ambiente hidrológico donde la presencia de áreas descubiertas de hielo propicia el desarrollo de redes fluviales y sistemas lacustres. Además, la región se encuentra en zona de permafrost continuo y discontinuo, por lo que los sistemas hídricos presentan características diversas entre sí.

En esta región se han elegido dos áreas de estudio (ver fig. 1) que, como se verá más adelante, caracterizan un comportamiento hidrológico que puede tipificarse en ambientes particulares y determinar variables regionales.

En el continente antártico las áreas descubiertas de hielo se encuentran principalmente en dos regiones: los Valles Secos (*Dry Valleys*) en Tierra Victoria y el noreste de la Península Antártica (Guglielmin y Dramis, 1999). Los sistemas hídricos superficiales y

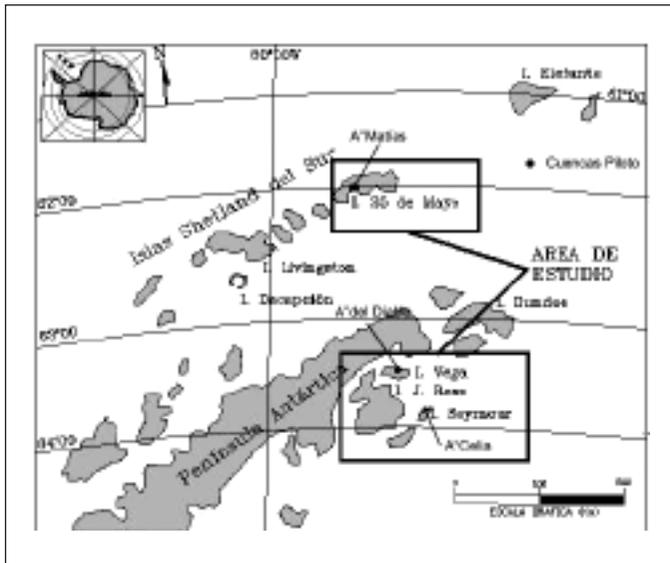


Fig. 1. Mapa de ubicación de las cuencas hídricas y áreas de estudio en el norte de la Península Antártica
 Fig. 1. Location map of the representative basins in Northern Antarctic Peninsula

subsuperficiales que se desarrollan en estas regiones presentan, al igual que en el Ártico, características particulares de aporte, sustrato y régimen que los diferencia claramente de los que existen en regiones más templadas. A diferencia de los sistemas hídricos en regiones polares y subpolares del hemisferio Norte, los estudios hidrológicos en la Antártida son escasos (Chinn, 1981; Eraso *et al.*, 1991; Silva Busso *et al.*, 2000; Silva Busso y De Angelis, 2003).

En el área de estudio los afloramientos rocosos corresponden mayormente a depósitos terciarios (Arroyo Celia) y cuaternarios (Arroyo Matías y Arroyo del Diablo) congelados (permafrost); sólo en algunos sectores restringidos, el Arroyo Matías discurre sobre rocas volcánicas terciarias.

El clima en el norte de la Península Antártica entre los 60° y 64° S presenta según Reynolds (1981) una disminución gradual de las medias termométricas anuales desde la región occidental de la Península hacia la región oriental. Esta última zona presenta una anomalía significativa en la zona del archipiélago Ross relacionada con una inversión térmica en función de la altitud, aunque Reynolds (1981) no explica la causa. La evolución del clima y sobre todo de los valores de temperatura en los últimos años ha sido evaluado por Jones (1995) verificando un aumento en los valores termométricos medios máximos en el continente antártico en las latitudes medias y altas. Svarka *et al.* (1998) realizó un estudio comparativo de la evolución termométrica y su relación con el calentamiento de la

región determinando diferencias apreciables entre las regiones oriental y occidental de la Península Antártica. En este sentido, el incremento de la temperatura media anual y sobre todo la temperatura media de verano es mayor en la región oriental de la Península y particularmente en la zona del archipiélago Ross, determinando incrementos del orden de 0.075°C (Estación Marambio, 64° S Lat. aprox.) y 0.083°C (Estación Esperanza, 63° S Lat. aprox.). En la región Occidental, Raymond *et al.* (1996) determinan un incremento de 0.057°C/año (Faraday Station, 65° S lat. aprox.) verificándose el más importante en la media de invierno (0.14°C/año). En la región occidental la extensión del hielo marino pareciera relacionarse con las variaciones termométricas, sobre todo en invierno cuando la nubosidad es mayor que en verano en esas regiones (Raymond, *et al.* 1996; King, 1994). Stark (1994) determina iguales causas que explican el calentamiento e incluye la zona de Bahía Margarita.

Ubicación de las áreas de estudio

Considerando las características climáticas de la región norte de la Península Antártica (entre 62°-64° S de Lat. aprox.) se han tomado tres cuencas hídricas piloto sobre las cuales se han realizado los estudios hidrológicos e hidrogeológicos. Con el objetivo de caracterizarlas y evaluar su relación con las condiciones climáticas en el norte de la península. Se han tomado cuencas hídricas accesibles y que por sus características permitan aplicar las metodologías de estudio tradicionales.

El clima de la región noreste de la Península Antártica es subpolar, semiárido, con temperaturas medias anuales que oscilan entre -5°C y -10°C (Reynolds, 1981). Según la zona, las temperaturas medias de verano suelen hallarse entre 0°C y -2°C, mientras que las medias de invierno se hallan entre -12°C y -17°C, aunque durante las últimas tres décadas se ha registrado un significativo calentamiento atmosférico de 1.5 °C (Skvarca *et al.*, 1998). Los vientos dominantes son del sector S y SO, aunque se registran también fuertes vientos catabáticos, cálidos y secos, provenientes del sector ONO. Las precipitaciones no superan los 250 mm anuales, de las que un máximo del 20% se produce en forma líquida. La presencia de agua en superficie se debe principalmente al deshielo. Dada las características climáticas particulares de los ambientes subpolares es conveniente considerar la propuesta de Tolstij y Kirujin (1978) (en Mijalov, 1989) que consiste en una clasificación de la hidrogeología fundamentalmente hidroclimática.

Los aspectos y procesos criológicos de la región son de importancia en el comportamiento hidrológico superficial y subterráneo. El permafrost, debido a que permanece por debajo del punto de congelación, contiene el agua congelada en los poros de la roca, dificultando el movimiento de agua subterránea. Este constituye un horizonte característico y se comporta como un nivel impermeable (Silva Busso *et al.*, 2000).

En la región oriental de la Península Antártica la distribución del calor se relaciona fundamentalmente con las variaciones de hielo marino y nubosidad, además de los fenómenos de circulación atmosférica de la región (King, 1994). El área de las Islas Shetland tiene un importante control de temperaturas medias relacionado con la latitud de las diferentes islas (Reynolds, 1981). Dicho autor determina las temperaturas medias anuales ajustadas al nivel del mar en la región occidental de la península se encuentran entre -2 y -5 °C, con isotermas paralelas a la línea de costa, determinó también que las temperaturas medias de verano suelen ser mayores que en la región occidental de la península normalmente comprendidas entre 0°C y 2°C, mientras que las medias de invierno varían entre -6°C y -10°C, por otro lado el significativo calentamiento atmosférico permite calcular una tasa de 0.041 °C/año (Skvarca *et al.*, 1998).

La región occidental posee una marcada influencia oceánica y la Península Antártica constituye una barrera a la circulación de los vientos provenientes del noroeste (Raymond *et al.*, 1996). La dirección dominante del viento es ONO de moderada intensidad (en comparación con la región oriental) y las precipitaciones son cercanas a los 400-450 mm/año, tiene lugar durante el verano, siendo fundamentalmente en forma líquida o como agua nieve. Dadas las temperaturas medias de verano, la ablación de la nieve es un proceso constante durante el mismo, de tal forma que el aporte en las cuencas hídricas no sólo es proveniente de los glaciares sino también y en gran medida por aporte directo de las precipitaciones.

Eraso *et al.* (1991), realizaron en el Arroyo Cazadora, Isla Livingston, en las islas Shetland del Sur, estudios hidrológicos de un curso superficial de agua alimentado por fusión glaciar; sin embargo, no se incluye en su análisis la participación de las precipitaciones en la dicha cuenca. En general, las cuencas hídricas de la región reciben aportes mixtos de los glaciares, de las precipitaciones y, eventualmente, del acuífero libre.

En la Isla Decepción se han estudiado las cuencas de los Arroyos Fumarola y Skúa (Inbar, 1992). En ellas se ha verificado también la relación entre las temperaturas medias y los caudales de descarga de ambos

arroyos, aunque debe considerarse que en este caso también reciben alimentación desde los glaciares. Aunque Inbar (1992) propone una posible correlación con la intensidad de la radiación solar, esta ha sido también propuesta por Mc Conchie (1990) en el área del Valle Miers, en la Antártida Occidental. En Isla Decepción, el aporte subterráneo podría ser más importante que en otras regiones a causa del elevado gradiente geotérmico (es una isla con vulcanismo activo), aunque aún no se ha estudiado la influencia de dicho gradiente en el sistema hidrológico superficial. Inbar (1992) no encuentra relación de los caudales con las precipitaciones locales en la Isla Decepción.

Las áreas elegidas han sido tres; dos de ellas en la zona oriental de la Península Antártica y una tercera en la región noroccidental. La primera ubicada en Isla Seymour (Base Argentina Marambio) en la latitud 64°14' S y en la longitud 56°43' O. Comprende la cuenca del Arroyo Celia y parte de la Meseta Marambio. La segunda está ubicada en Isla Vega, en la latitud 63°49' S y en la longitud 57°20' O. Comprende la cuenca del Arroyo del Diablo, inmediatamente al sudoeste del Cabo del Buen Encuentro. La tercera, ubicada en las Islas Shetland del Sur, Isla King George, en la latitud 62°17' S y en la longitud 58°40' O. Comprende la cuenca del Arroyo Matías en el área de la Caleta Potter (cerca de la Base Argentina Jubany).

Metodología

El estudio de un medio ambiente tan particular como este, ha permitido adecuar metodologías y técnicas de cara a abordar los estudios hidrogeológicos en cada cuenca piloto. En líneas generales las etapas sucesivas han sido:

- recopilación de bibliografía existente vinculada al ámbito y tema del estudio y cartografía base.
- relevamiento previo de la zona con apoyo de geología y técnicas geofísicas.
- fotointerpretación y mapeo de hidrología, hidrogeología y geomorfología.
- elección de los lugares para el muestreo de agua superficial y subterránea.
- elaboración de una red de muestreo de piezómetros y aforos.
- medición de caudales, niveles, conductividad eléctrica, pH y temperatura en los cursos fluviales y piezómetros en las cuencas piloto elegidas.

El procedimiento de elección de las cuencas piloto consistió en seleccionar aquellas cuencas en donde se identificaran claramente la relación entre las aguas

superficiales, subterráneas y la variable intervención de los procesos glaciológicos y criológicos de ablación. Para ello se consideraron, en general, los siguientes criterios:

- ubicación geográfica y clima.
- conocimiento de las características geológicas locales.
- conocimientos hidrológico previo: cuencas, orientación, etc.
- distinguir tipos de suelos (si los hubiere).
- distinguir tipo de cuencas y cuerpos de agua.
- distinguir los tipos de acuíferos de la zona o comportamiento del agua subterránea en períodos estivales.
- considerar las características criológicas del suelo lo más homogéneas posible dentro de la zona de estudio, atendiendo las particularidades de cada una.
- relación con la ablación glaciaria o tipología glaciaria local.

Esta metodología permite identificar las principales características hidrogeológicas locales y considerarlas como modelos de interpretación de otros sectores o cuencas dentro de su contexto glaciológico y criológico. Eventualmente esto permite definir mejor las acciones que permitan recuperar, prevenir y solucionar los posibles casos de contaminación del recurso hídrico y suelos en las cercanías de las bases antárticas.

Características hidrológicas superficiales y subterráneas de las cuencas en la región oriental de la Península

Sistemas hidrológicos efluentes del permafrost. Área de la Isla Seymour

El sistema hídrico superficial está dado por una serie de pequeños cursos de agua con régimen temporario estacional, activos sólo durante la época estival, que fluyen con drenaje hacia el mar de Weddell. La actividad de los cursos de agua es variable aún dentro de una misma estación, dependiendo fuertemente de las condiciones meteorológicas. No existen en la cuenca sistemas lacustres naturales.

Los estudios se han efectuado durante cuatro períodos estivales consecutivos (1996-2000) fundamentalmente sobre el área de la Meseta de la Isla Seymour. En particular, durante el verano austral de 1998-99, se ha medido diariamente la descarga en la desembocadura y el cauce medio del Arroyo Celia (Isla Seymour), con el empleo de un micromolinete (OTTI-AOL) y la freatimetría estival de la cuenca sobre una red de 14 piezómetros (ver mapa de la fig. 3).

Sobre la base de estos estudios se ha podido determinar que la presencia de agua en los cursos fluviales estacionales se relaciona en parte con la ablación de nieve en la cuenca hídrica y en parte con la descarga del acuífero libre estival en la medida en que este es cortado por la topografía de los cauces (Silva Busso *et al.*, 2000).

Por esta razón, los cursos, durante el período estival, reciben su principal aporte de la descarga del acuífero libre y los caudales son bajos, con gran dispersión en su intensidad diaria e incluso horaria (Sánchez y Silva Busso, 1999). El aporte de la ablación sobre los mismos cauces debe considerarse de características esporádicas e incluso marginales durante el verano. La ablación de las precipitaciones nivales invernales constituyen un evento hídrico que suele ocurrir durante la primavera en un lapso relativamente breve de tiempo. Durante gran parte del período estival el principal aporte es la descarga del acuífero libre a consecuencia del descenso de la capa activa. De esta forma el acuífero libre tiene un comportamiento influente sobre la red de drenaje. Estos valores varían a lo largo del día en relación estrecha con los parámetros meteorológicos de temperatura, insolación y en menor medida las precipitaciones nivales (Sánchez y Silva Busso, 1999). La figura 2 muestra la variación diaria durante el verano de la temperatura del suelo (entre 0-1 m) y la variación de caudales diarios medidos en el Arroyo Celia durante el verano austral de 1998-99.

El permafrost llega hasta la superficie en los meses de invierno, pero en períodos estivales ablaiona su capa activa. Esta capa activa en la cuenca y área de la meseta de la Isla Seymour puede tener valores que han oscilado entre 0,5 m hasta 2,1 metros de profundidad determinado a partir de las perforaciones que permitieron instalar la red freatimétrica (Silva Busso *et al.*, 2000).

En la zona de estudio se ha verificado localmente que existen tres tipos de ocurrencia o comportamiento del acuífero. La primera de estas corresponde a zonas donde no ha habido desarrollo del acuífero libre y la zona no saturada se halla sobre el suelo congelado permanente. La segunda corresponde a zonas que tienen un régimen variable durante el período estival. Durante períodos de mayor insolación o clima menos riguroso contienen al acuífero libre, como muestra la fig. 3, que corresponde a la freatimetría estival de verano austral de 1998-1999. Un tercer tipo son zonas que tienen un régimen constante durante el período estival; que suelen corresponder a las áreas donde el suelo congelado está a mayor profundidad, cercano a pequeños cuerpos de agua. Es en

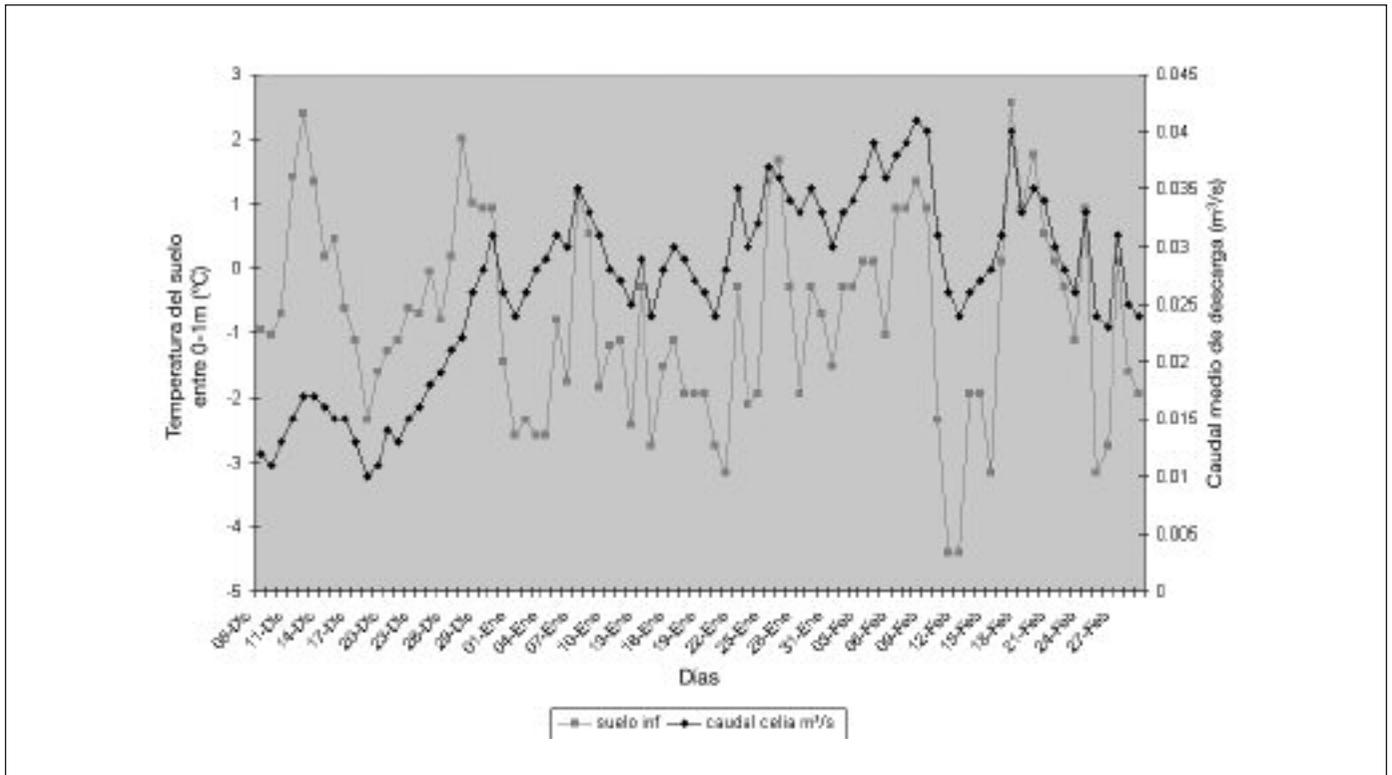


Fig. 2. Variación diaria de caudales y temperaturas del suelo en el verano de 1998-1999, Arroyo Celia, Isla Seymour
 Fig. 2. Flow rate and soil temperatures daily variation, Celia Brook, Seymour Island

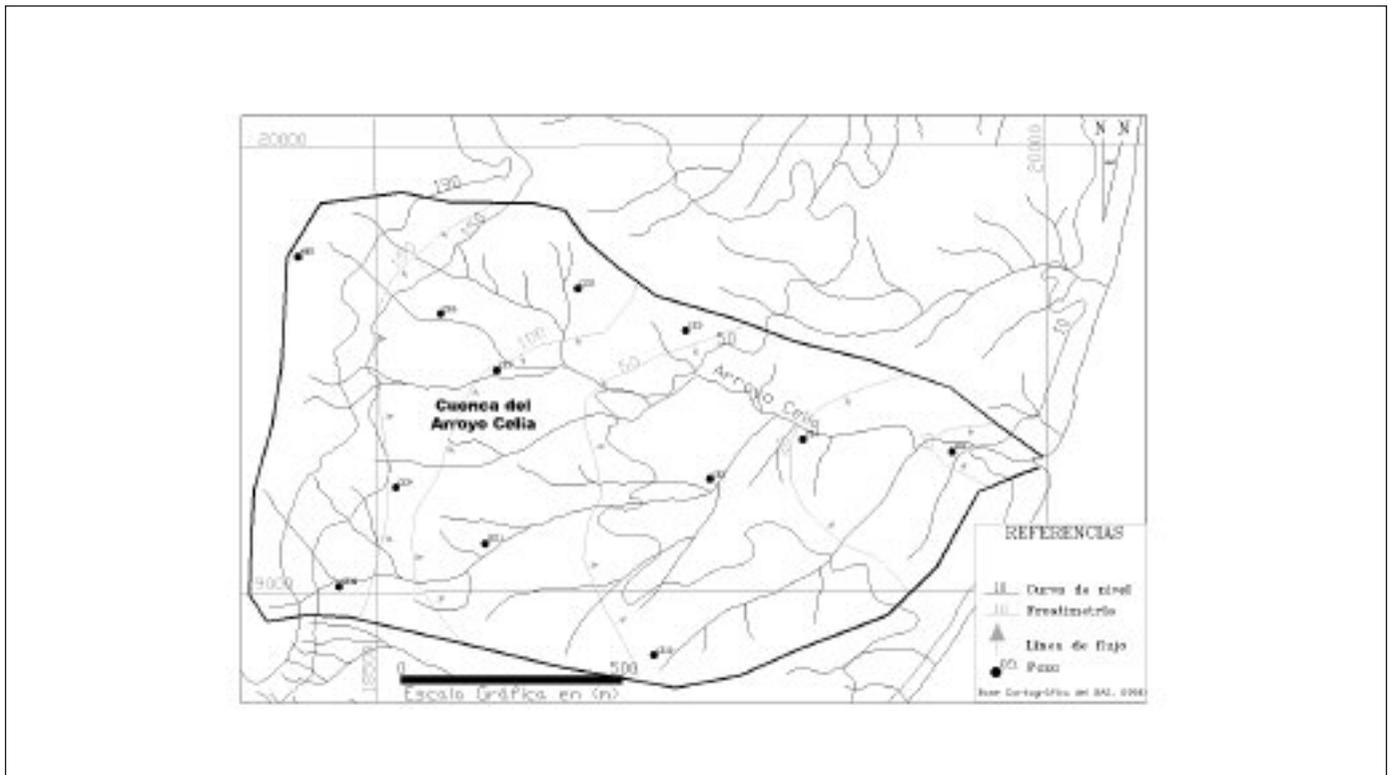


Fig. 3. Mapa freaticométrico de la cuenca del Arroyo Celia en la Isla Seymour
 Fig. 3. Phreatimetric Map of the Celia Brook basin in Seymour Island

estas últimas zonas donde se desarrolla el acuífero libre estival (Silva Busso *et al.*, 2000).

El control climático sobre el acuífero libre y su influencia sobre su comportamiento hidrológico ha sido determinado previamente (Silva Busso *et al.*, 2000). En la figura 4 se presenta la relación ($r=0,85$) entre la temperatura del suelo y los caudales de descarga en el Arroyo Celia.

Durante el período estival, el descenso de la capa activa del permafrost permite el alojamiento de agua en estado líquido en el sedimento. Una característica propia del acuífero en zonas subpolares es la discontinuidad en la ocurrencia del agua (Lawson *et al.*, 1994). El aumento de la temperatura del suelo incrementa, por ablación de la capa activa, el caudal de descarga en el cauce. Si durante el período estival la temperatura del suelo alcanza una media más alta que la de otros años, entonces la capa activa se profundiza hasta quedar hidrológicamente desconectada de los cauces y estos quedan casi sin aporte. Esta situación se verificó en el terreno durante el verano de 1999-2000.

Sistemas hidrológicos relacionados con la descarga de glaciares politermales. Área de la Isla Vega

La cuenca hídrica del Glaciar Bahía del Diablo ocupa

una superficie aproximada de 1.12 km², de los cuales 0.46 km² corresponden al conjunto de palecauces que forma una red de drenaje inactiva dentro de la misma área (ver fig. 5). El sistema hídrico se encuentra, durante el verano, alimentado casi exclusivamente por el aporte de la ablación superficial del glaciar (Silva Busso y De Angelis, 2003).

Los glaciares que se encuentran en el área corresponden al tipo politermal (Paterson, 1994), caracterizados por zonas distales y marginales en condiciones de base seca y sectores centrales en condiciones de base húmeda. Según Silva Busso y De Angelis (2003) la temporada de ablación se extiende desde fines de octubre hasta mediados de abril, la cual alimenta una compleja red hidrológica supraglacial y proglacial. Por lo tanto, la descarga del Arroyo del Diablo se desarrolla en forma estacional, acorde a la duración de la temporada de ablación anual que controla la fusión superficial de los glaciares, como así también en parte de la capa activa del permafrost. Todos los glaciares de la región presentan casi invariablemente un comportamiento recesivo sostenido, acelerado en las últimas dos décadas a causa de un consistente aumento de la temperatura en la región (Skvarca *et al.*, 1995 y 1998).

Los cuerpos de agua de la zona de estudio se pueden dividir en tres grupos: a) los relacionados con el sistema hídrico actual, como las lagunas marginales

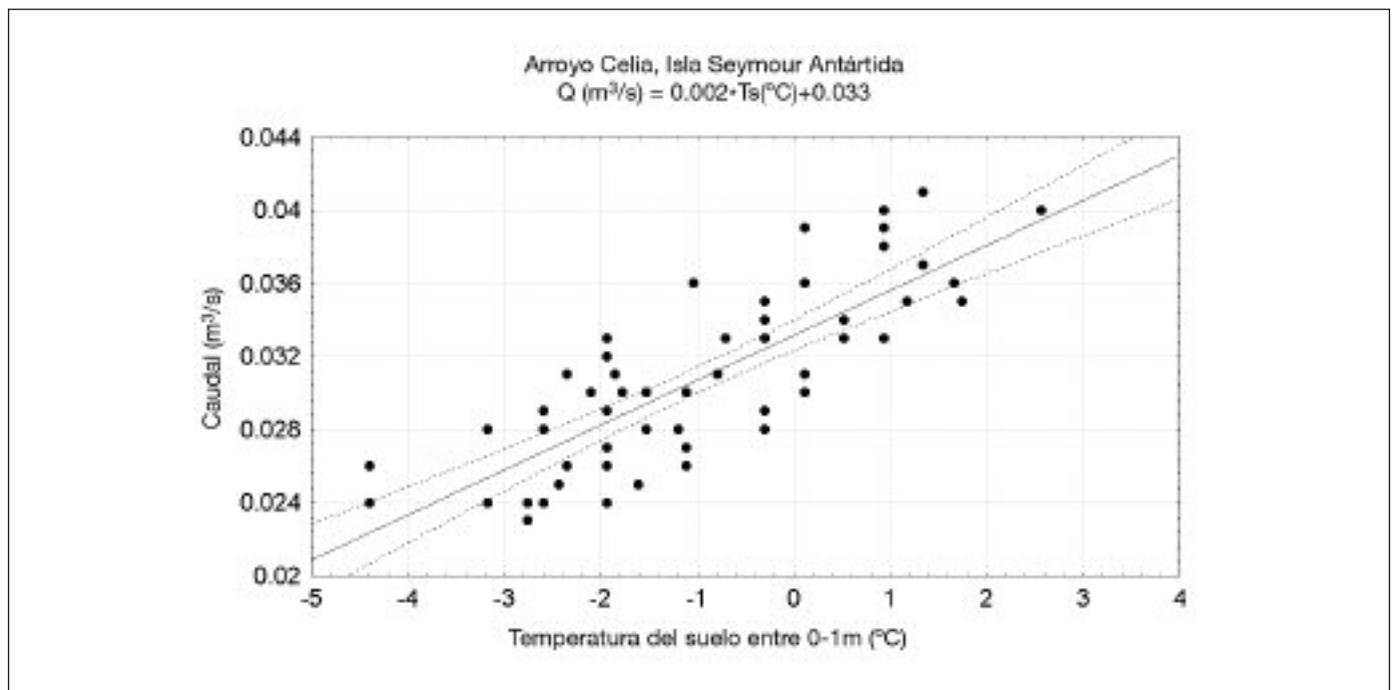


Fig. 4. Relación entre temperatura del suelo (0-1m) y descarga en el Arroyo Celia, Isla Seymour
Fig. 4. Relationship between soil temperature (0-1m) and discharge, Celia Brook, Seymour Island

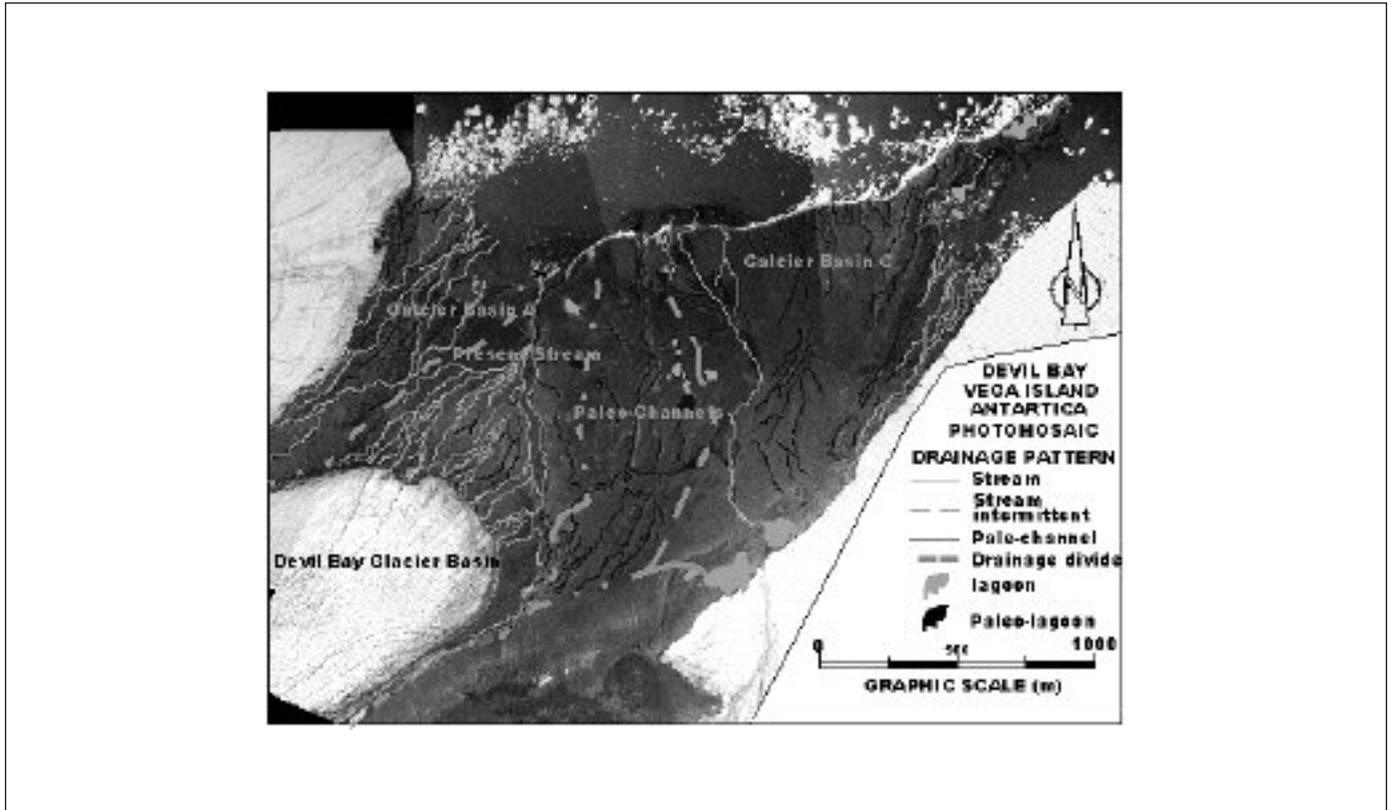


Fig. 5. Red de drenaje de la cuenca del Arroyo del Diablo, en Isla Vega (Silva Busso y De Angelis, 2003)
Fig. 5. Drainage network of the Del Diablo basin in Vega Island (Silva Busso y De Angelis, 2003)

ubicadas hacia el este de la morrena parabólica frontal del Glaciar Bahía del Diablo, b) los que no se relacionan con la red de drenaje actual y c) las paleolagunas. Estas últimas pueden relacionarse con la red de paleocauces, y recibir por ende un drenaje subsuperficial o bien pueden haberse originado como depresiones de termokarst, por fusión del permafrost (Silva Busso y De Angelis, 2003).

Con el objeto de evaluar la descarga del sistema fluvial, su relación con los posibles aportes desde el glaciar y las variables climáticas de verano, se procedió al reconocimiento de los cauces en busca del perfil más adecuado en la cuenca para las mediciones de caudal. Las figuras 6 y 7 muestran la variación diaria de la primera y horaria de la segunda (integrando valores medidos a la misma hora durante una semana) con la descarga y ablación del Glaciar del Diablo. La evolución de los valores medidos muestra una buena correspondencia.

Durante los veranos australes del último lustro se registraron escasas precipitaciones en la zona de estudio. En particular durante el verano 1999-2000 las precipitaciones fueron muy escasas (no más de 5 mm) lo que permitió evaluar la relación entre la des-

carga desde el glaciar y las restantes variables meteorológicas. La relación entre la temperatura media diaria y los caudales de descarga poseen una correlación lineal y positiva ($r=0.95$) como se muestra en la fig. 8.

La relación entre estas variables ha sido estudiada en el Arroyo Cazadora, Isla Livingston, en la región occidental de la Península Antártica (Eraso *et al.*, 1991). Dichos autores proponen esta relación aunque encuentran cierto grado de desfase en la respuesta y proponen más trabajo de campo para determinar la participación de las precipitaciones. Estos autores expresan la necesidad de realizar observaciones hidrológicas en conexión con el balance de masa glaciar y analizar el posible aporte del permafrost. En la región oriental de la Península las precipitaciones son más escasas en verano, lo que nos ha permitido despreciarlas en este análisis.

Criológicamente, el área de estudio se halla en zona de permafrost continuo (De Angelis, 2002). En años favorables, la capa activa del mismo alcanza un espesor máximo de aproximadamente 1,5 m. En la cuenca del Arroyo del Diablo en Isla Vega se han identificado formas criogénicas que sólo tienen una

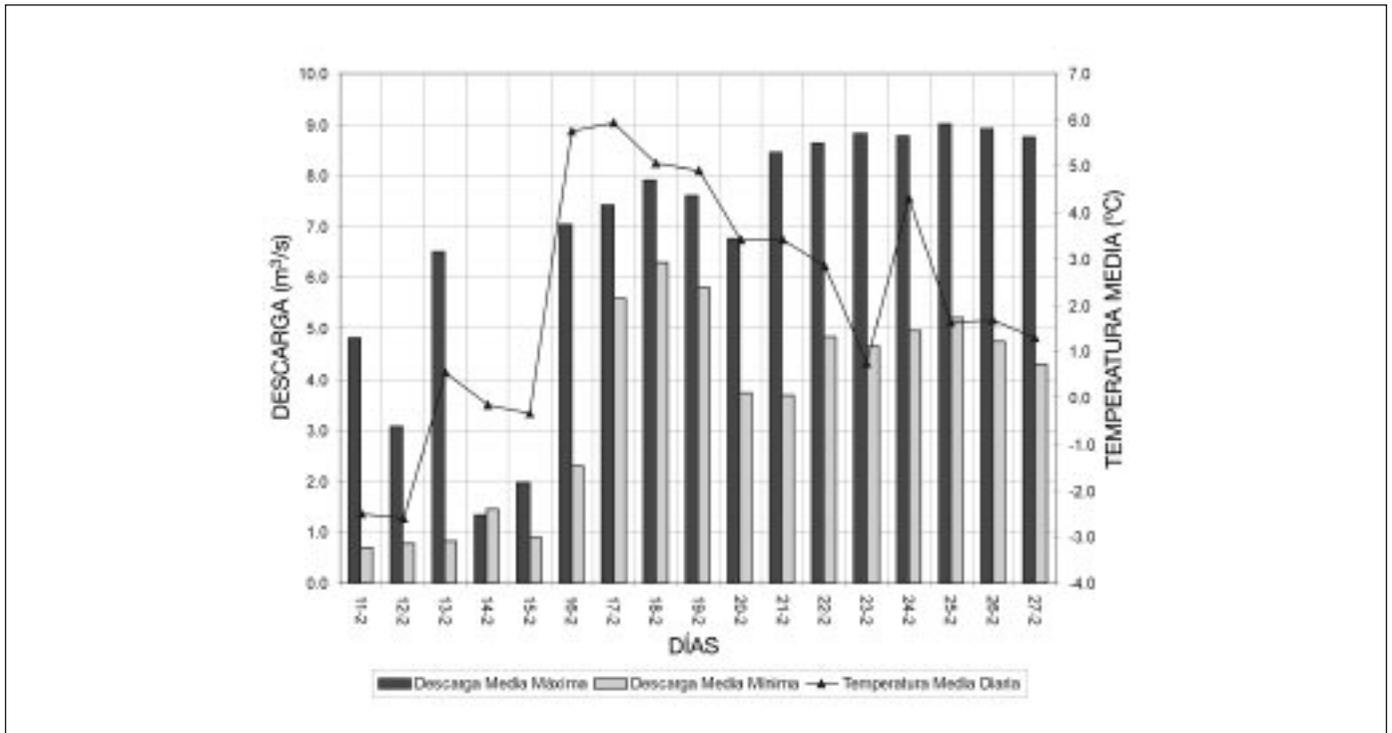


Fig. 6. Variación diaria del caudal y de la temperatura del aire, Arroyo del Diablo, Isla Vega
 Fig. 6. Flow rate and air temperatures daily variation, del Diablo Brook, Vega Island

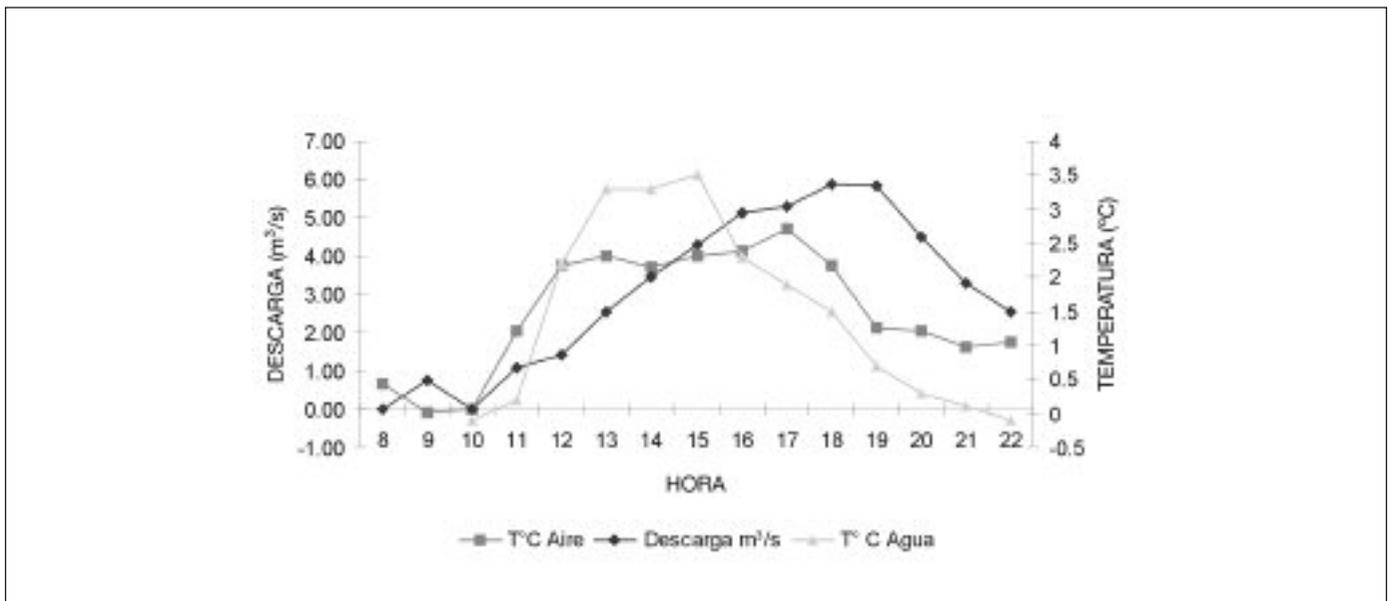


Fig. 7. Variación horaria del caudal y temperatura del aire, Arroyo del Diablo, Isla Vega
 Fig. 7. Flow rate and air temperatures hourly variation, del Diablo Brook, Vega Island

influencia localizada en la hidrología de la cuenca. El *icing* glaciar (áreas donde aflora el agua freática y se congela) está normalmente situado cerca de los bordes glaciares, en lugares donde existe descarga de aguas de fusión glaciar y sobre la superficie de la pla-

nieve fluvioglacial (fig. 5). La dinámica del proceso de *icing* determina localmente las áreas donde se desarrolla la formación de la zona no saturada y el acuífero libre durante el verano y el grado de conexión con el curso fluvial (Silva Busso y De Angelis, 2003).

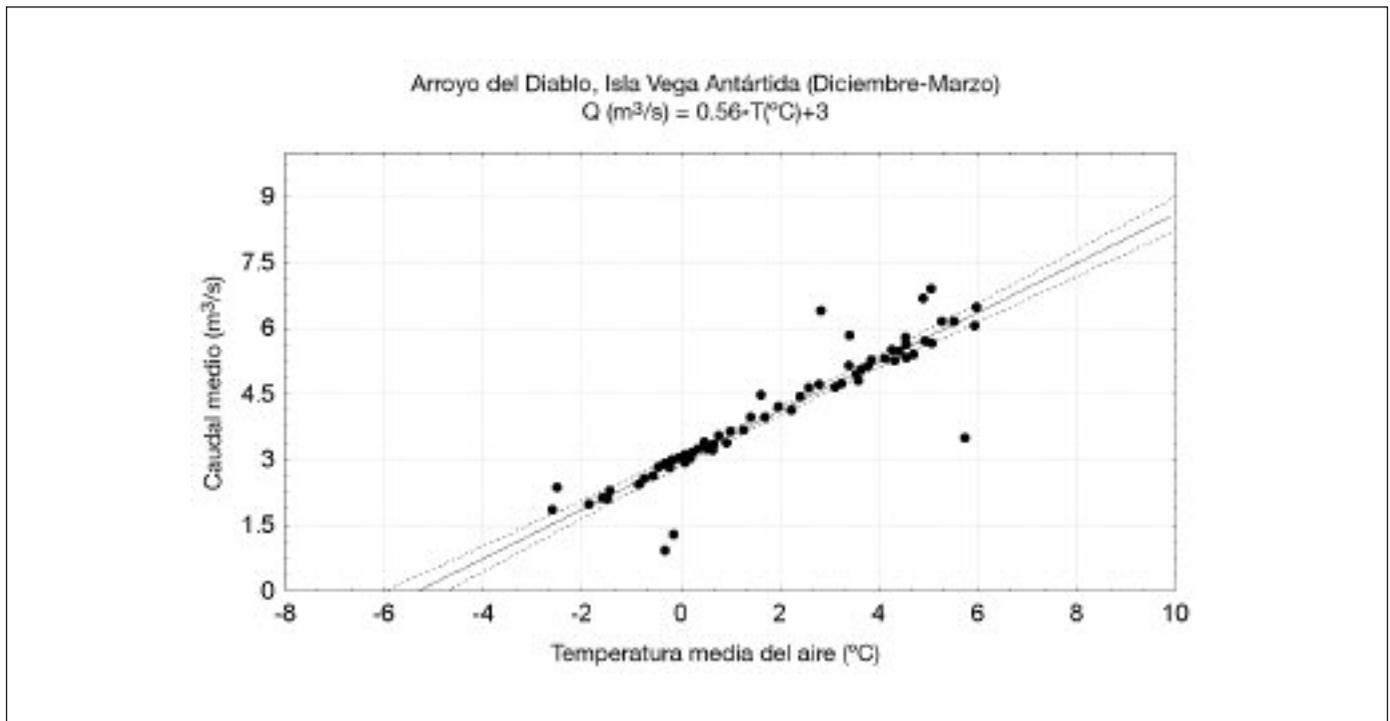


Fig. 8. Relación entre la temperatura del aire y la descarga, Arroyo del Diablo, Isla Vega
 Fig. 8. Relationship between Air temperature and discharge, del Diablo Brook, Vega Island

Aunque puede existir infiltración en la zona cercana al cauce, siendo este influente en el acuífero libre, este proceso lo consideramos subordinado y de menor importancia en el esquema hidrogeológico propuesto.

Aspectos hidrológicos e hidrogeológicos de las cuencas en la región occidental de la Península

Sistemas hidrológicos alimentados por precipitaciones nivas y glaciares templados. Área de la Isla King George

La cuenca del Arroyo Matías se encuentra en la Península Potter (Caleta Portter), en la Isla King George, al noreste del archipiélago de las Shetland del Sur. En este estudio se ha elegido la cuenca del Arroyo Matías, considerando que la misma no recibe la descarga superficial del glaciar Potter, y además durante el verano se alimenta de las precipitaciones líquidas y nivas. En el área de estudio se encuentra también la cuenca del Arroyo Potter (hacia el este sobre la caleta), en el cual se han medido algunos datos de descarga muy dispares y cercanos a los 0.08-0.13 m³/s, con máximos de 3.8 m³/s (Varela, 1998), pero la misma posee conexión y alimentación de la ablación glaciaria y dada su ubicación no es

posible diferenciar o cuantificar el aporte glaciario del nival. Debe considerarse que la latitud y las condiciones climáticas determinan que el tipo de glaciares para esta región sean templados (Patterson, 2002). Esto implica que, a diferencia de Isla Vega, el agua infiltrada subterráneamente a partir de este tipo de glaciares puede constituir un aporte importante en el sistema hídrico.

Esto nos ha permitido seleccionarla como cuenca piloto de estudios hidrológicos; aquí en particular se evaluará la relación existente entre la precipitación y la descarga. Para tal fin hemos correlacionado los incrementos de las precipitaciones diarias (diferencia diaria de precipitaciones) a partir de la estación meteorológica en la cuenca y coincidentemente se midieron las descargas diarias.

En la Cuenca del Arroyo Matías se ha realizado durante el verano austral del 2001-02 una red de 30 piezómetros y se han tomado medidas periódicas diarias de caudal de descarga del arroyo. En perfiles de cauce elegidos en desembocadura y cuenca media se ha utilizado micromolinete tipo OTTI-AOL y durante el verano se ha instalado un limnómetro electromecánico a 1000 m de la desembocadura. El desarrollo del acuífero libre estival ha permitido realizar la freaticimetría de la cuenca (ver fig. 9). El sistema hídrico superficial está constituido de una serie de pequeños

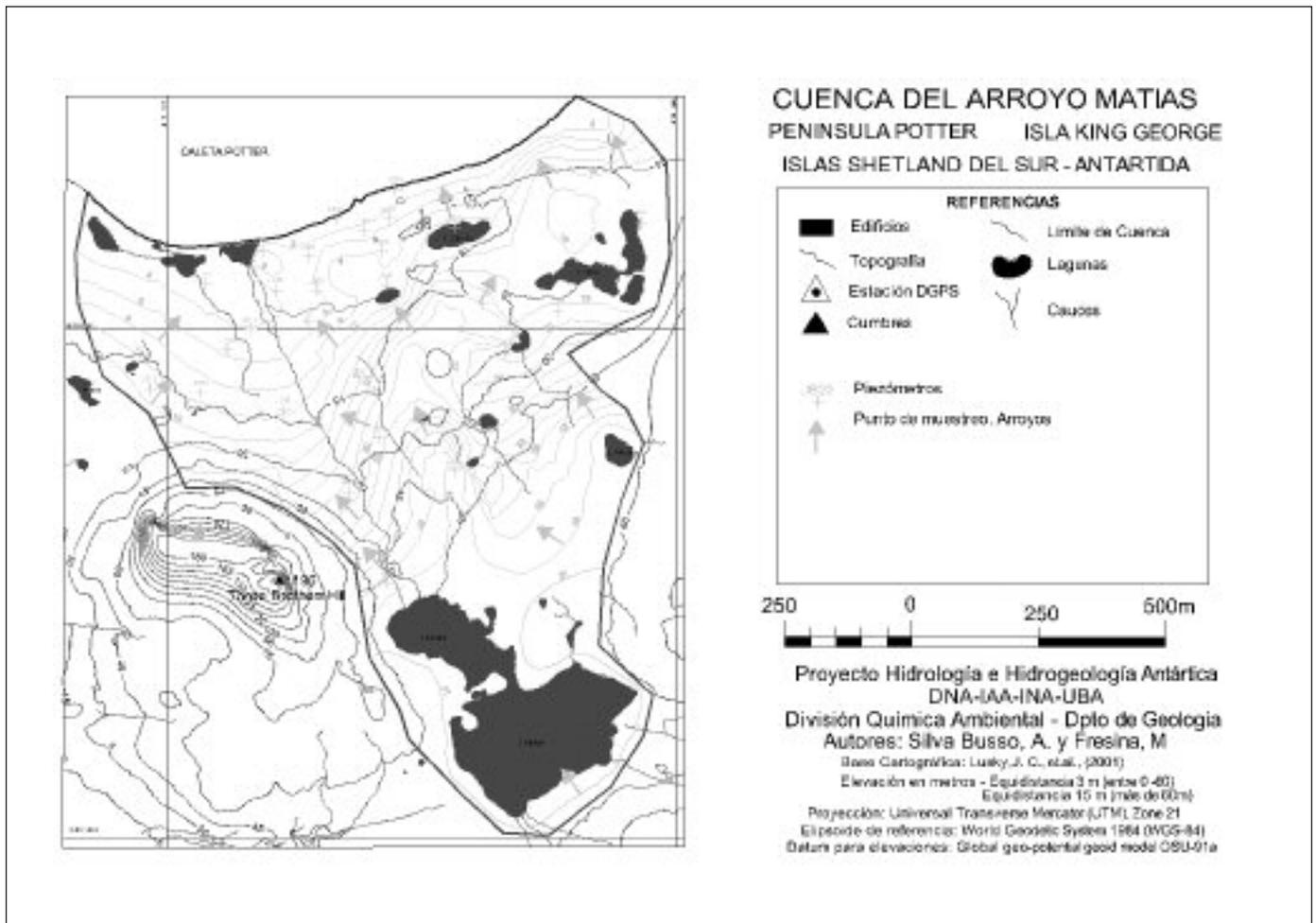


Fig. 9. Mapa freaticométrico de la cuenca del Arroyo Matías, Isla King George
 Fig. 9. Phreatimetric Map of the Matías Brook basin, Potter Point, King George Island

cursos de agua con régimen permanente durante el verano (incluso algunos años entre septiembre y mayo), que fluyen con drenaje hacia la caleta Potter.

Se ha incluido las variaciones diarias del incremento de precipitaciones e incremento de caudal de descarga que permiten observar desfases de 24-48h (ver fig. 10). Se ha verificado que las variaciones horarias (menores a 0,02 m durante el día) de caudal en la cuenca del Arroyo Matías no muestran variaciones significativas, como en las cuencas piloto en Isla Seymour (Silva Busso *et al.*, 2000) e Isla Vega (Silva Busso y De Angelis, 2003) donde las variaciones horarias del caudal son importantes.

La relación entre incrementos de precipitación y caudales de descarga, como puede observarse en la figura 11, son lo suficientemente significativos para considerarlos correlacionables ($r=0,61$). Sin embargo, es probable que otros factores relacionados hayan tenido o tengan influencia. Se ha buscado relaciones

de los caudales de descarga con la temperatura del aire y es más baja ($r=0,35$). Sin embargo, el aporte de la ablación sobre los cauces debe considerarse relacionado en parte con la insolación durante el verano. Los factores climáticos, como temperatura e insolación, ejercen cierta influencia sobre la hidrología superficial, aunque no tan manifiesta como en las cuencas del suroeste. La ablación de las precipitaciones níveas invernales constituyen un evento hídrico que suele ocurrir durante la primavera en un lapso relativamente breve de tiempo: las precipitaciones estivales alimentan la cuenca hasta entrado el otoño.

Dadas las características morfométricas de la cuenca y considerando su principal cauce colector, se estimó, en base a las precipitaciones, el caudal de punta y el tiempo de punta (Soil Conservation Service, 1986). Los valores calculados a partir de los extremos de precipitaciones durante el verano oscilan entre 5 l/s-25 l/s de caudal de punta y el tiempo de

punta calculado oscila entre 30-48 h. Además, es una cuenca de elevado caudal específico, siendo en el período de medición cercano a los 200 l/s Km², muy superior al esperado en base a las precipitaciones.

Estos datos se calcularon preliminarmente y no son concluyentes; sin embargo, los órdenes de variación se encuentran dentro del rango de varianza de los valores de caudal de descarga medidos en el terreno (VAR:18,9 y s:4.3) y las relaciones entre incremento de precipitaciones y caudales muestran un desfase de 48 h entre sí. Los caudales de descarga de los cursos de agua no son tan variables, y la cuenca posee un conjunto de sistemas lénticos naturales que, a priori, constituirían un ambiente hídrico comparable con los mallines. Los mallines y/o vegas, al igual que las turberas, son formaciones netamente diferenciadas de las áreas circundantes por su tipo de suelo altamente orgánico, en cuencas con alto contenido hídrico y flora característica (Raffaele, 1993). En Patagonia, los mallines se localizan a lo largo de todo el gradiente ambiental Oeste-Este, desde la cordillera de los Andes (2000 mm de precipitación) hasta la estepa (300 mm de precipitación). En este caso se podría definir un sistema de mallines subpolares, con características a determinar en futuros estudios.

Si bien el acuífero libre en la cuenca del Arroyo Matías (ver fig. 10) se encuentra actualmente en estudio, un análisis preliminar de la información tomada

en el terreno a partir de los piezómetros indica que el arroyo es durante el verano influente sobre el acuífero libre. El comportamiento climático de verano sobre el acuífero no parece tener mayor influencia sobre su comportamiento hidráulico, recarga, ocurrencia y características químicas, excepto la influencia que las precipitaciones tienen en la cuenca.

El permafrost llega hasta la superficie en los meses de invierno, pero en períodos estivales ablanda su capa activa hasta una profundidad considerablemente mayor que en las cuencas piloto situada más al suroeste. La capa activa en la cuenca y área de la Caleta Potter, que se ha observado durante las perforaciones realizadas durante la construcción de la red Piezométrica, no se ha encontrado al menos hasta los 3 metros de profundidad. Es probable que durante el período estival, el suelo congelado o permafrost, sea estacional o bien esté muy influenciado por la litología de la cuenca. De todas formas sólo se ha verificado el desarrollo del acuífero libre estival que coexiste hasta fines de dicho período.

Discusión y conclusiones

Las características climatológicas del área norte de la Península Antártica encuentran correlato en el comportamiento hidrológico superficial y subterráneo de

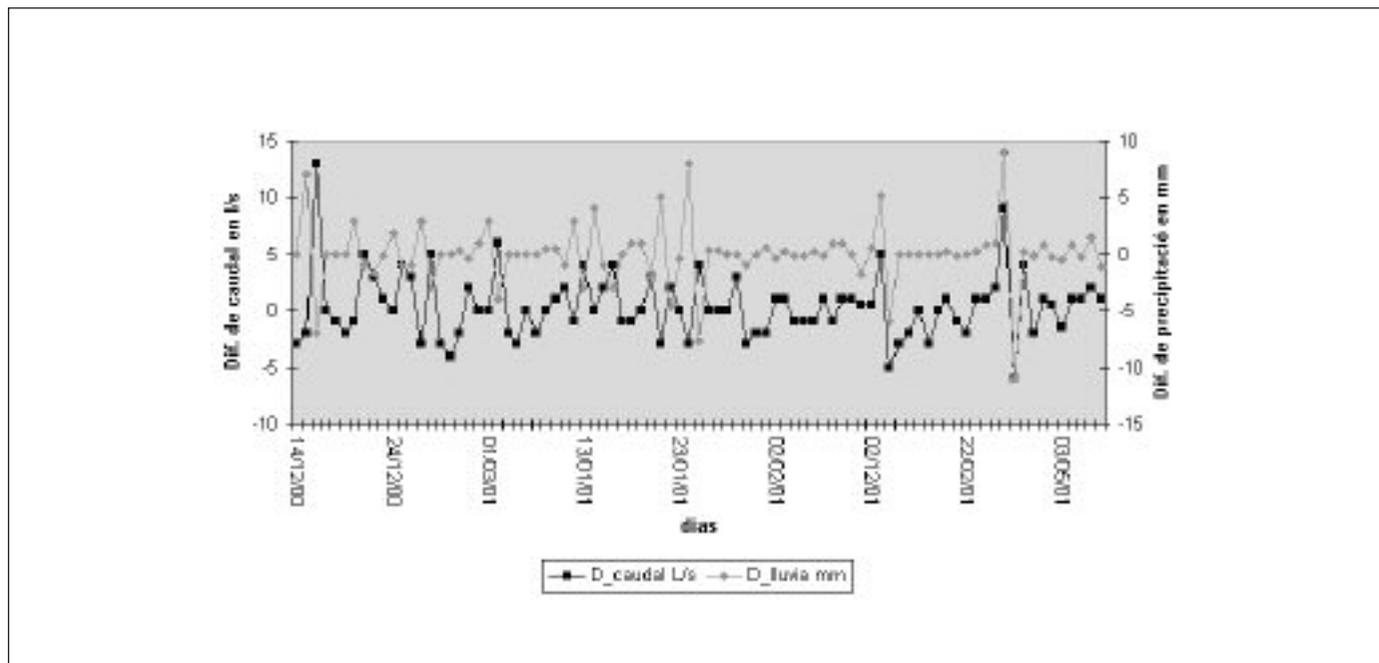


Fig. 10. Variación diaria del incremento del caudal y de las precipitaciones, durante el verano austral en 2000-2001, Arroyo Matías, Isla King George

Fig. 10. Flow rate and precipitations increase daily variation, Matías Brook, King George Island (summer 2000-2001)

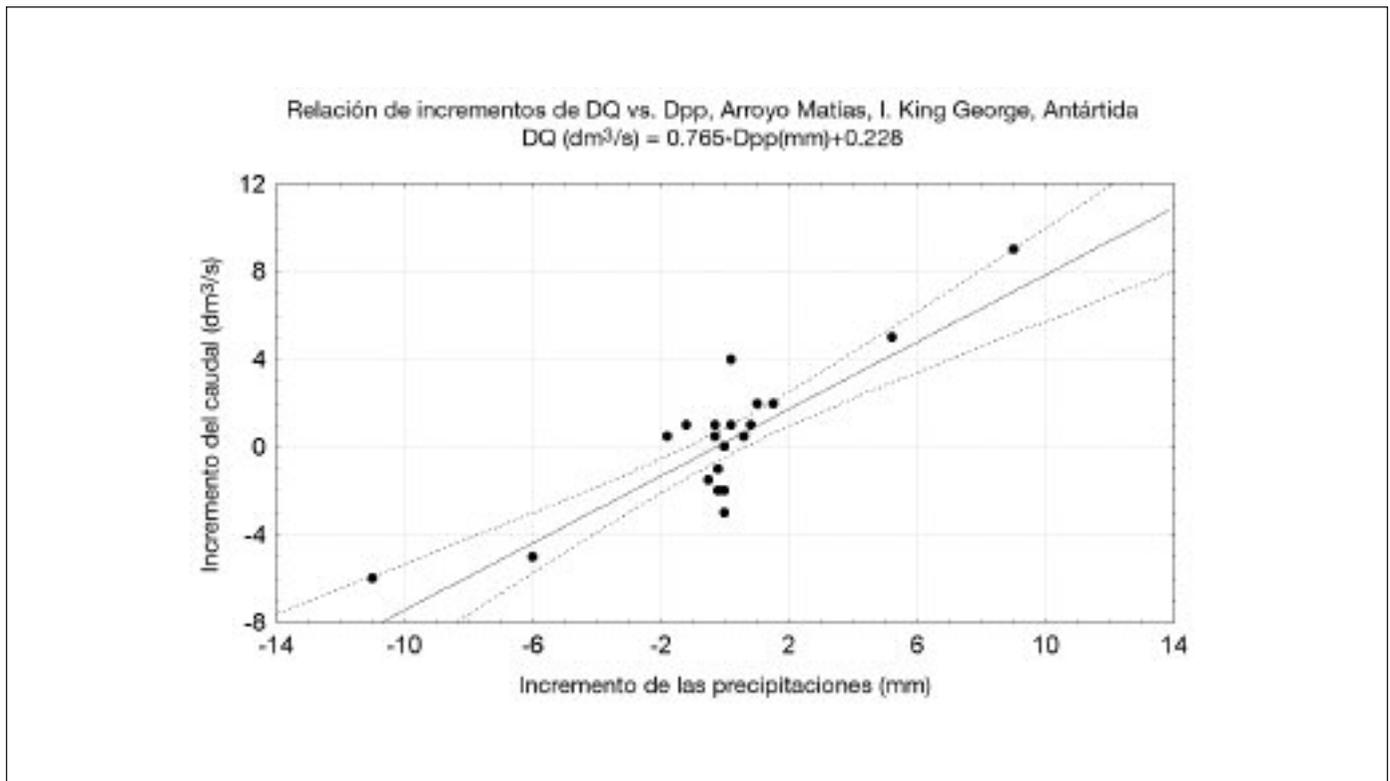


Fig. 11. Relación entre los incrementos de caudal y precipitación, Arroyo Matías, Isla King George
 Fig. 11. Relationship between precipitation and discharge increase, Matias Stream, King George Island

cada región estudiada. No obstante, la diferenciación climática no es el factor concluyente y se ha determinado en este trabajo que el ambiente hidrológico de cada cuenca puede influir en la dinámica hídrica de una determinada región.

En las cuencas piloto consideradas se ha mostrado la particular influencia de alguna variable meteorológica en particular sobre el sistema hidrológico en su conjunto a expensas de la influencia de las otras, que si bien son menos importantes, no dejan de tener su efecto sobre la dinámica hídrica. Este criterio metodológico permite considerar ambientes hidrológicos claramente identificables y cuyas descargas son controladas predominantemente por ciertas variables meteorológicas.

Los glaciares y en particular la consideración de su tipología (frío, templado o politermal) puede tener influencia en las descargas superficiales y subterráneas, dependiendo de sus características. Aunque el aporte de los mismos debe ser evaluado en cada cuenca en particular, la dinámica hídrica de las cuencas se diferenciará notoriamente si existe la posibilidad del aporte subsuperficial procedente del glaciar (tipo templado).

La región oriental de la Península Antártica, con

menores temperaturas y escasas precipitaciones, posee características de una zona semiárida subpolar, con glaciares fundamentalmente politermales a fríos (Patterson, 2002). La dinámica hídrica puede considerarse representada en las cuencas piloto de la Isla Vega e Isla Seymour. En la Isla Vega la dinámica hidrológica se caracteriza por una casi exclusiva alimentación superficial de los glaciares y cuyas descargas, en general de varios m³/s, poseen una elevada correlación con la temperatura media de aire. El sistema subsuperficial está muy limitado a las áreas cercanas a cauces y cuerpos de agua con escaso desarrollo areal es probable que el desarrollo de este dependa del ángulo de insolación y orientación. En la Isla Seymour, la ausencia de glaciares y las escasas precipitaciones ponen en evidencia el control de la ablación del permafrost sobre el sistema hidrológico local. La descarga, aunque de poca magnitud, presenta una elevada correlación con la temperatura del suelo (y probablemente con la temperatura mínima del aire que suele tomar valores cercanos), donde no debe descartarse la influencia del ángulo de insolación y orientación. Es importante mencionar que en la Isla Seymour, donde los arroyos no poseen alimentación de los glaciares, ocurre que el caudal y la salini-

dad aumentan progresivamente a causa del aporte del sistema subsuperficial (Silva Busso *et al.*, 2000). En ambos casos las variaciones de caudal son casi horarias con significativas variaciones de los mismos; esto dificulta la interpretación de la información hidrológica.

La región occidental de la Península Antártica, con mayores temperaturas y precipitaciones más abundantes que la anterior, posee aún las características de una zona subpolar subhúmeda. Los glaciares son de tipo templado (Patterson, 2002), con descarga superficial, y, en particular, una importante infiltración subsuperficial.

La dinámica hídrica puede considerarse representada por la cuenca del Arroyo Matías en Isla King George. La misma se caracteriza por una correlación elevada entre los incrementos de las precipitaciones y caudales por encima de las otras variables meteorológicas analizadas. Además, los caudales de descarga poseen poca variación horaria. Su relación con las precipitaciones locales favorece el desarrollo de los humedales subpolares y cuerpos de agua en dicha cuenca. Los fenómenos criológicos y el desarrollo del permafrost se encuentran más limitados y son importantes en los meses de invierno; durante el resto del año, la dinámica hidrológica es más significativa que en las cuencas de la región oriental de la Península. En esta región la existencia de un permafrost más estacional y discontinuo, glaciares templados y precipitaciones líquidas estivales permiten un aporte subsuperficial en la cuenca del Arroyo Matías, pudiendo explicar los elevados valores de descarga en desembocadura.

Por último, debe considerarse que las cuencas hídricas en la región son normalmente ambientes hídricos mixtos, es decir, que poseen descargas glaciares y una variable importancia de las precipitaciones (líquida o nívea) y la ablación del permafrost. Esto hace más complejas las metodologías de estudio y de evaluación hidrológica y su relación con las variables climáticas como lo han expresado ya diversos autores (Chinn, 1981; Eraso *et al.*, 1991; Imbar, 1992; Sánchez y Silva Busso, 1999).

Referencias

Chinn, T.H.J. 1981. Hydrology and climate in the Ross Sea area. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 11 (4), 373-386.

Eraso, A., Antigüedad I. y Magin A. 1991. Time Series Correlogramme and Spectral Análisis of the Cazadora Glacier Drainage and Meteorológic Parameters. *First International Symposium of Glacier Caves and Karst in Polar Regions*, Madrid, España, 69-91.

Guglielmin, M. y Dramis F. 1999. Permafrost as a climatic indicator in northern Victoria Land, Antarctica. *Annals of Glaciology*, Vol.29, 131-135.

De Angelis H., Ermolin E. y Skvarca P., 2002. Geomorfología de la Bahía del Diablo, Isla Vega, Península Antártica. *Actas del XV Congreso Nacional de Geología*. Publicado en CD, ISBN: 987-20190-1-0 N° 033.

Inbar, M., 1992. Hidrología y geometría hidráulica en litología volcánica y clima antártico. Estudio cuantitativo morfológico en la Isla Decepción, Islas Shetland del Sur. *Geología de la Antártida Occidental. II Congreso Geológico de España y VII Congreso Latinoamericano de Geología*. J. López-Martínez (Ed). Simposios T3, Salamanca, España. pp 337-346.

Jones, P. D., 1995. Recent Trends in Maximum and Minimum Temperatures in the Antarctic. *Climatic Reserch Unit, University of East Anglia, Unite Kindong*. (Inédito)

King, J.C., 1994. Recent Climate Variability in the Vicinity of the Antarctic Peninsula. *International Journal of Climatology*. Vol 14 pag:357-369.

Lawson, D.E., Strasser J.C. and Davi J.M., 1994. Geological and geophysical investigations of the hydrogeology of Operable Unit 3. *Interim draft report prepared for the US Army 6th ID and US Army Engineer District, Alaska by the Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire*.

Mc. Conchie J.A., 1990. The Hydrology, glaciology, and sediments transport monitoring programme in the Miers Valley. *New Zealand Antarctic Expedition 1988/1989*, Scientific Programme 12-19.

Paterson, W.S.B. 1994. *The physics of glaciers*. Third edition, Oxford. Elsevier. 497 pp.

Raffaele, E. 1993. Estructura y dinámica de la vegetación de un mallín de altura sometido a perturbaciones experimentales. *Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata*, La Plata, Argentina.

Reymond C.S., Stammerjohn S.E., Baker K.S., 1996. Surface Air Temperature Variations in the Western Antarctic Peninsula Region. *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula, Antarctic Research Series*, Vol 70, pag:105-121.

Reynolds, J.M. 1981. The distribution of mean annual temperatures in the Antarctic Peninsula. *British Antarctic Survey Bulletin*, 54: 123-133.

Sánchez R. y Silva Busso A., 1999. Determinación del comportamiento hidrogeológico subsuperficial en el área de Base Marambio, Antártida. *Instituto Antártico Argentino* (Inédito).

Silva Busso A. y De Angelis H., 2003. Características hidrológicas de Bahía del Diablo, Isla Vega, Península Antártica. *Rev. de Geología Aplicada a la Ingeniería y Medio Ambiente ASAGAI*, Argentina (en prensa).

Silva Busso, A., Fresina M., Sánchez R., 2000. Characterization of the hydrogeological behaviour of Marambio (Seymour) Island., Antarctica. *I Joint Congress on Groundwater*, Fortaleza, Brasil, Abstracts. 292, in CD.

Skvarca, P., Rott H. y Nagler T., 1995. Satellite imagery: a baseline for glacier variations study on James Ross Island, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 21, 291-296.

Skvarca, P., Rack W., Rott H. y Ibarzábal T. y Donángelo F.,

1998. Evidence of recent warming on the eastern Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 27, 628-632.
- Soil Conservation Service, 1986. *Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds*. USDA (U.S. Department of Agriculture).
- Stark P., 1994. Climatic Warming in the Central Antarctic Peninsula Area. *Weather* Vol 49 Ab (6), p: 215-220.
- Tolstijin, N.I. y Kiriujin V.A, 1978 (en Mijalov, 1989). Introducción a la Hidrogeología Regional, *editorial LGI*, Moscú, Rusia.
- Varela, L., 1998. Estudio sobre el escurrimiento fluvial de los arroyos de deshielo. *IV Jornadas sobre Investigaciones Antárticas*, Instituto Antártico Argentino, Buenos Aires, Argentina p: 31-35.

Recibido: Agosto 2002
Aceptado: Octubre 2003