

CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO EN LA ISLA MARAMBIO, ANTÁRTIDA.

Silva Busso, A.¹; Sánchez, R.² & Fresina, M.¹

Resumen - A partir de información hidrogeológica y geofísica se realizó una caracterización del comportamiento hidrogeológico de la isla Marambio, con particular énfasis en el área donde se asienta la base homónima. El trabajo permitió determinar la presencia de una incipiente zona saturada (llamada acuífero) por encima del permafrost, durante la época estival. Las relaciones de esta zona saturada con el permafrost, con la zona no saturada y con los cuerpos de agua superficial son variables y dependen fundamentalmente de las condiciones climáticas. Asimismo, se determinó que factores como las actividades asociadas a la base Marambio, la litología, la cercanía al mar, la intensa nubosidad del área y los procesos de infiltración influyen sobre diferentes aspectos del comportamiento hidrológico del área. Por último, se infiere un probable comportamiento del sistema hidrológico en la sección Infrapermafrost.

Palabras clave: Antártida, Aguas Subterráneas, Impacto Humano, Permafrost

OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio es determinar el comportamiento hidrogeológico de la capa activa sobre el sustrato donde se asienta la base Marambio, estableciendo la presencia y eventuales relaciones entre zonas saturadas, no saturadas y permafrost, la conexión entre zonas saturadas en diferentes puntos del área de estudio (y la consiguiente existencia de acuíferos libres) así como el comportamiento del flujo subsuperficial del agua, con el objeto de determinar la ocurrencia de posibles impactos

¹ Instituto Nacional de Agua y Ambiente, Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano, Programa Nacional de Tecnologías Sustentables en Aguas Subterráneas

² Instituto Antártico Argentino, Programa de Gestión Ambiental

directos de la actividad antrópica sobre el régimen térmico del área y sus impactos indirectos asociados (erosión, anegamiento), proponer medidas de mitigación en caso de accidentes que involucren derrames de combustible así como establecer una red de monitoreo hidrogeológico que permita evaluar la validez de las medidas de mitigación implementadas en base Marambio.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las aguas subterráneas en áreas subpolares es un aspecto poco estudiado en la bibliografía contemporánea, en parte por las dificultades de acceso a dichas áreas, y en parte también porque el hecho que las aguas subterráneas se relacionen dinámicamente con la ablación de los suelos y subsuelos congelados (permafrost) en las épocas estivales constituye una condición muy poco frecuente.

Disponer de estudios del comportamiento hidrogeológico en estas regiones es particularmente importante en áreas donde existe actividad humana, ya que ésta puede alterar las características naturales del acuífero freático estival y así generar impactos sobre la cubierta de suelo y las cuencas hídricas asociadas, así como sobre la migración, degradación o lixiviación de posibles contaminantes superficiales en un ambiente sensible a las perturbaciones generadas por el hombre (tránsito vehicular, instalación de edificios, generación de calor, etc.).

Este trabajo forma parte de un conjunto de estudios de línea de base, necesarios para llevar adelante una gestión ambiental adecuada en bases antárticas.

DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

CARACTERÍSTICAS GENERALES

La Isla Marambio (Seymour en la literatura inglesa) pertenece al grupo de islas James Ross, ubicadas a unos 100 Km al sudeste del extremo norte de la Península Antártica, sobre el mar de Weddell (Figura 1). La isla, de forma elongada, se extiende por aproximadamente 20 Km en el sentido SO-NE, y con un ancho máximo de 8 Km en el sentido NO-SE. La Base Marambio ubicada en la latitud. 64°14´ S, longitud. 56° 43´ W, se halla situada en el sector nordeste de la Isla Marambio sobre una meseta que ocupa una extensión aproximada de 3 km², cuya cota máxima alcanza los 210 m.s.n.m. El relieve mesetiforme inclina levemente hacia el este, hasta la cota de 190 m.s.n.m. (Rinaldi et al, 1978). El tope de la meseta presenta un paisaje suavemente ondulado con sectores

deprimidos que se anegan transitoriamente en el verano. Los flancos de la meseta son abruptos, con inclinaciones que llegan a valores de 45 grados

Una de las características salientes de la isla es la ausencia de glaciares así como de acumulaciones permanentes de nieve durante el verano. El clima del área corresponde a frío polar, con temperaturas medias de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en verano, y de $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno, aproximadamente. La vegetación prácticamente no tiene desarrollo en la meseta y se halla limitada al desarrollo de pequeños cojines de líquenes de unos pocos centímetros de diámetro en las grietas protegidas y húmedas de los clastos mayores.

LITOLOGÍA Y SUELOS

En la Isla Marambio (Seymour) afloran sedimentos cretácico-terciarios que constituyen una secuencia homoclinal de poca inclinación, con dirección noreste-suroeste. En esta secuencia se han definido, desde el sudeste, las Formaciones López de Bertodano, Cross Valley (Elliot y Trautman, 1982), Sobral (Rinaldi et.al., 1978), La Meseta (Elliot y Trautman, 1982). La Formación Wiman (Elliot y Hoffman, 1989) se halla aún en revisión. Las formaciones mencionadas son, en general, de origen marino con abundante fauna fósil. El material suele ser poco consolidado y de bajo grado de diagénesis (Marenssi, 1995).

Ayudando en discordancia sobre la secuencia mencionada, y ubicada en el tope de la meseta donde se apoya la Base Marambio, se encuentra la Formación Weddell (Zinsmeister y De Vries, 1983), que constituye un depósito conglomerádico glacimarino de edad cuaternaria con un desarrollo menor a 5 metros, esta Formación está constituida de un conglomerado matrix-sosten, cuyos clastos varían desde el tamaño grava fina hasta bloques de varios metros cúbicos de tamaño, mientras que la matrix es fundamentalmente areno-limosa. La arena suele ser muy fina a fina e intercala limos arenosos (Marenssi, 1995).

En la meseta donde se asienta la Base Marambio se han identificado dos subgrupos de suelos (Soil Taxonomy, 1999): Haplorter Glácico, Acuortel Glácico. El primero es un suelo de poca evolución genética a partir de material glacifluvial de textura franca gruesa. El Acuortel Glácico es también un suelo de poca evolución genética, saturado con agua durante la mayor parte del periodo estival, y que exhibe características redoximórficas, de textura franca gruesa (Godagnone, 1999).

En toda el área de la meseta sobre la que se asienta base Marambio se reconoce la presencia de suelos congelados, o permafrost. El espesor de la capa activa no es espacialmente uniforme y varía con la época del año.

ASPECTOS HIDROGEOLOGÍCOS

A partir del relieve mesetiforme mencionado, se desarrolla una serie de microcuencas hídricas centrifugas (Agraz et.al., 1998).

El sistema hídrico superficial es de tipo centrifugo, a partir del relieve mesetiforme. Las redes de drenaje son de superficie reducida (entre 0.5 y 3.7 kms²), compuestas por cursos de régimen transitorio, activos sólo durante la época estival. La actividad de los cursos de agua es variable aún dentro de una misma estación, dependiendo fuertemente de las condiciones meteorológicas.

No existen en los alrededores de la base sistemas lénticos naturales. Los presentes han sido creados, intencionalmente o no, como consecuencia de la actividad de la Base Marambio. Sólo tres de ellos, los mayores, situados inmediatamente al sur del sector de alojamientos pueden ser considerados permanentes. Uno de ellos es utilizado como fuente de agua para consumo humano.

En la Isla Marambio (Seymour) se han realizado estudios geofísico geoeléctricos e integrado información geofísica previa de magnetotélúrica y microsísmica para determinar la posición de los niveles de permafrost en el área de la meseta, submeseta y sobre la costa norte (Fournier, et. al., 1990). Así, se interpretó que el permafrost en la costa norte de la isla presenta una capa activa de no más de 0,5 metros de espesor, una capa de permafrost que intercala un nivel de alto contenido salino de no más de 8 metros de espesor y una resistividad de 0.6 ohm.m. Este horizonte resistivo se encontraría a profundidades cercanas a los 80 metros en la meseta, 28 m en la submeseta y 42 m en la costa (Fournier, et.al., 1990). Los mismos autores (op.cit.) estimaron, asumiendo un gradiente geotérmico de 0.030°C/m, que el límite inferior del permafrost (isotema de 0°C) se encuentra cercano a los 220 metros de profundidad.

El agua disponible en el sistema hídrico superficial posee dos orígenes: la ablación de las precipitaciones níveas y el aporte del acuífero libre estival. El agua contenida a consecuencia del descenso de la capa activa desarrollada en este periodo, conjuntamente con la infiltración producto de la ablación de las precipitaciones níveas, constituye la zona saturada contenida en la Formación Weddell. Las características estratigráficas y

geomorfológicas de esta unidad condicionan la ocurrencia de una zona no saturada así como del acuífero libre estival, Sánchez y Silva Busso, (1999).

Por su parte, el agua disponible en el sistema hídrico subsuperficial también posee dos orígenes: la infiltración "in situ" de las aguas de ablación sobre la unidad continente y la fusión de la capa activa del suelo congelado, Sánchez y Silva Busso, (1999).

METODOLOGÍA

Se construyeron 17 freáticos distribuidos alrededor de la base más 3 freáticos adicionales en un sector de la meseta libre de la influencia humana. Los freáticos fueron debidamente posicionados y acotados, conformando una verdadera red freática.

Como complemento a la instalación de la red freática, se llevaron a cabo 20 sondeos eléctricos verticales con el objeto de:

- Relacionar las características del subsuelo (en términos de zonas de diferente grado de saturación y presencia de permafrost) con su comportamiento resistivo, a través de este método indirecto.
- Definir la posición del permafrost en distintos puntos de la meseta.
- Corroborar los resultados obtenidos en el punto anterior, especialmente en lo concerniente al grado de impacto de las actividades de la base sobre el suelo congelado.
- Utilizar los resultados como patrón de comparación para otros puntos de similares características.

Por último se procedió a realizar lecturas periódicas de profundidad de agua en los freáticos instalados, así como de conductividad y pH de aguas superficiales, muestras de agua superficial y subterránea para análisis hidroquímico en el área de la meseta. El objeto es contar con los elementos necesarios para una caracterización completa e interrelación del sistema hídrico superficial y subterráneo en la zona.

Se tomaron muestras de terreno en diferentes puntos del área de la meseta, con el objeto de obtener datos de granulometría, conductividad hidráulica y permeabilidad del material más superficial de dicha área. La selección de los puntos de muestreo fue realizada en relación a los puntos más representativos de modo que la información obtenida resultase representativa. Todos los muestreos se realizaron de acuerdo con la metodología desarrollada en ambientes subpolares (Fresina et.al., 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PERFIL HIDROGEOLÓGICO

Dadas las características climáticas particulares de los ambientes subpolares es conveniente considerar la propuesta de (Tolstijin y Kiriujin 1978, en Mijalov, 1989) que consiste en una clasificación de la hidrogeología, fundamentalmente hidroclimática.

EL suelo congelado permanente o permafrost, debido a que permanece en todo momento a temperaturas por debajo del punto de solidificación del agua, contiene agua en estado sólido en los poros de la roca, dificultando el movimiento de agua subterránea. El permafrost constituye entonces un horizonte característico que se comporta como un nivel impermeable.

En los meses de invierno, el suelo congelado se desarrolla a partir de la superficie, pero en periodos estivales el agua contenida en la capa más superficial funde. Ese espesor de suelo que se congela y funde a lo largo del año constituye la capa activa. En la meseta de la Isla Marambio, esta capa activa puede tener valores que oscilan entre 0,5 m hasta 2,1 metros de profundidad - de acuerdo con las perforaciones que permitieron instalar la red freaticométrica - constituyendo un acuífero libre temporario, que se desarrolla en verano sobre el nivel impermeable del permafrost, en la sección hidroclimática Supra-Permafrost.

Los mecanismos que conducen al desarrollo de la capa activa y ablación del suelo congelado no son objeto de estudio aquí, sino el movimiento y circulación del agua en los niveles Supra-Permafrost y su relación con las precipitaciones, suelos y cursos superficiales.

Fournier et.al, 1990, han propuesto un horizonte de baja resistividad intercalado en el permafrost, a profundidades cercanas a los 80 metros desde la superficie de la meseta. Este horizonte ha sido interpretado como un nivel sin hielo y de alta salinidad. En afloramiento, las facies de arcilla heterolíticas suelen tener una distribución y altimetría similares, aunque son más potentes e intercalan arenas finas (Marenssi, 1995; Marenssi et.al., 1998). Esta afirmación no es concluyente, y se debe tener en cuenta que, a la profundidad sugerida, no existe evidencia que refleje una clara correspondencia entre la interpretación del horizonte resistivo y la litología.

Las prospecciones geoeléctricas realizadas por Fournier et. al., (1990) se realizaron con una apertura AB/2 de 350 metros, lo cual permitiría suponer una profundidad de penetración cercana a los 100-150 metros (Orellana, 1982). Por este motivo, estos autores (op.cit.), en base a un modelo de integración de la información geoeléctrica y

magnetotelúrica, realizaron una interpretación en profundidad, extrapolando a partir del análisis de dicho modelo.

En dicho trabajo, el límite inferior del permafrost fue estimado en base a un gradiente geotérmico teórico, no verificado en la región, del orden de 0,030°C/m, estableciendo la isoterma de 0°C cercana a los 220 metros de profundidad. Este valor se ajustó a partir del estudio geofísico, resultando ser no inferior a los 127 metros de profundidad (Fournier, et al, op.cit.).

CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO LIBRE ESTIVAL. SECCIÓN SUPRA-PERMAFROST

Durante los estudios iniciales que permitieron la instalación de la red freaticométrica local, se determinaron los espesores de la zona no saturada, saturada y profundidad del suelo congelado permanente. Se realizaron complementariamente calicatas eléctricas, (Figura N°2), con el objeto de interpretar la respuesta resistiva característica de los horizontes mencionados, y de determinarlos en áreas ausentes de perforaciones.

Las calicatas eléctricas fueron realizadas e interpretadas a través del método Schlumberger (en Orellana, 1982). El largo del tendido y la resistividad del terreno permitió una profundidad de penetración que no superó los 5 metros, suficiente para el estudio de la Sección Supra-Permafrost donde se desarrolla el acuífero libre estival.

Fukuda et.al., (1992) realizaron mediciones previas, empleando el dispositivo Wenner, que permitieron determinar la existencia de diferentes capas resistivas. Tales mediciones se llevaron a cabo en la costa (5 m.s.n.m.), en la submeseta (50 m.s.n.m.) y en el área de la Meseta (200m.s.n.m), determinando en esta última tres horizontes resistivos con los siguientes resultados:

Capa	Resistividad en ohm.m	Profundidad en (m)
1	350	0-0.6
2	200	0.6-30
3	450	30-200

Tabla N°1. Capas resistivas y profundidades estimadas en el área de la meseta

Fukuda et.al., (1992) atribuye estos valores a la presencia de permafrost, cuyo límite inferior estaría cercano a los 200 metros, estimándolo a partir de una perforación de estudio ubicada en la meseta.

Dado que el arreglo de Wenner es menos resolutivo que el de Schlumberger (Orellanas, op.cit.), en este trabajo se ha realizado un estudio geoeléctrico en detalle de la sección supraperafrost del área de la meseta (F.Weddell). Se realizaron 20 SEV, que se interpretaron con el apoyo de 20 perforaciones que alcanzaron el techo del permafrost, lo que proporcionó un mejor detalle en la interpretación geofísica.

La ubicación de los sondeos eléctricos verticales puede verse en la Figura N°2. La mayor concentración de SEVs en el área de la base responde a que se pretende evaluar, en una instancia posterior, el deterioro del acuífero libre debido a las actividades de la base.

A partir de los resultados del arreglo de SEVs se consideran posibles los siguientes horizontes resistivos y propuestas de interpretación:

Horizonte resistivo I: Corresponde a horizontes resistivos psefíticos de matrix arenolimososa que constituyen la zona no saturada, con espesores que varían entre los 0,5 -1 metro y resistividades de entre 74 hasta 94 ohm.m. La zona saturada suele ser el horizonte resistivo más superficial y es la respuesta resistiva durante el procesos de ablación de la capa activa.

Horizonte resistivo II: Corresponde a horizontes resistivos psefíticos de matrix arenolimososa saturados y constituyen el acuífero libre estival. Su espesor es variable entre 0,5 hasta 2,0 metros y resistividades entre 41 hasta 52 ohm.m. Este horizonte resistivo subyace al anterior y suele verificarse su presencia luego de la estabilización de la ablación de la capa activa. Su resistividad es elevada en función de la salinidad de las aguas que contienen, como se analizará más adelante, lo que indicaría una importante influencia litológica en la respuesta resistiva.

Horizonte resistivo III: Corresponde a horizontes resistivos relacionados con el suelo congelado permanente. En este caso la respuesta resistiva se relaciona con la litología psefítica de la Formación Weddell, pero en profundidad esta respuesta puede modificarse considerando que, a 5 metros de profundidad, se encuentra el contacto con la Formación La Meseta, de diferente litología.

El resultado de la interpretación de la información geoeléctrica se resume en el siguiente cuadro:

Horizontes

Espesores Aprox. (metros)	Resistividad ohm.m	Profundidades Aprox. (m)	Horizontes Resistivos
0,5 - 1	74-94	0-1	I
0,5- 1,5	41 – 52	0,5-2,0	II
---	>200	>2,5	III

Tabla N°2. Interpretación de los horizontes resistivos Area de la Meseta

La información de las calicatas y de las perforaciones realizadas (sondeos paramétricos) determina que la zona de la meseta de la Isla Marambio presentaría al menos un tipo de acuífero, contenido en rocas clásticas psefíticas de matriz psamítica.

Durante el periodo estival, el descenso de la capa activa del suelo congelado permanente permite el alojamiento de agua en estado líquido en el sedimento. El agua contenida en el acuífero libre estival puede entonces provenir del agua de ablación de la capa activa o bien de la infiltración vertical por ablación de las precipitaciones níveas en el área de la meseta, (Sánchez y Silva Busso, 1999).

Considerando estos mecanismos de recarga, durante gran parte del periodo estival se midieron sistemáticamente los niveles estáticos, conductividad, pH y temperatura del agua en el terreno. De allí, se ha verificado que el acuífero puede comportarse de tres modos distintos:

- ✓ No hay desarrollo del acuífero libre. La zona no saturada se desarrolla directamente sobre el suelo congelado permanente.

Lawson (1994, 1996) señala que el permafrost se adelgaza rápidamente por debajo de perturbaciones antrópicas, tales como caminos, ductos bajo tierra, instalaciones, o excavaciones.

- ✓ Donde la capa activa es somera (menor a un metro), el agua suele endicarse en sectores bajos, lo cual, en ocasiones, genera áreas pantanosas (Lawson, 1998). En diferentes áreas de la meseta se reconoce la presencia de sectores anegadizos, probablemente correlacionables a la ocurrencia de una capa activa somera.

En regiones de Alaska de similares características climáticas, topográficas y edáficas que las de la zona estudiada, Lawson, (1998) expresa que allí donde la profundidad del permafrost es menor a un metro, probablemente no se desarrolle ningún acuífero.

- ✓ El acuífero libre posee un régimen variable durante el periodo estival. Durante lapsos de mayor insolación o de clima menos riguroso, contienen al acuífero libre. En periodos menos favorables el acuífero se congela, formando parte del permafrost.

Lawson (1998), también para Alaska, destaca que estacionalmente existen períodos de flujo muy escaso o nulo en depósitos no congelados aislados, rodeados por permafrost y en algunas áreas por encima del permafrost que han sufrido extensa fusión.

- ✓ El acuífero posee un régimen constante durante el periodo estival. Suele corresponder a las áreas donde el suelo congelado está a mayor profundidad, cercano a pequeños cuerpos de agua o a áreas más alejadas de la base.

Lawson (1994, 1996) señala que el permafrost se adelgaza rápidamente por debajo de rasgos geológicos correspondientes a cursos de agua, lo cual permitiría un mayor desarrollo de la zona saturada.

La aparición de distintos comportamientos del permafrost en zonas contiguas o a lo largo de una estación ya ha sido reportada como un fenómeno posible en áreas polares y subpolares. Lawson (1998) sostiene que una característica propia de un acuífero en zonas subpolares es la discontinuidad en la ocurrencia del agua (Lawson, 1998). Asimismo, manifiesta que los niveles piezométricos, los caudales y las direcciones de flujo en un acuífero libre ubicado por encima del permafrost pueden variar relativamente rápido con la estación, y probablemente de un día para el siguiente.

La distribución espacial y temporal de suelos congelados es entonces una función de las características del terreno, de su uso histórico, de las perturbaciones de la superficie, así como de la transferencia de calor desde la superficie y el agua subterránea (varios, en Lawson et al, 1998).

Debido a la ocurrencia de estos comportamientos disímiles, en el área de la meseta (Formación Weddell), no se desarrolla una freaticimetría integrada. Por esta razón, en el mapa de la Figura N°2, se ha optado por no reconstituir la piezometría local. Consecuentemente, se tomaron los niveles estáticos observados en los freáticos como niveles guía. Éstos suelen oscilar entre 0,25 m.b.b.p. hasta 1 m.b.b.p, son relativamente estables en periodos favorables y desaparecen rápidamente por congelamiento. La pobre

integración de la freaticimetría local dificulta el flujo horizontal del agua en el acuífero. Esta situación también ha sido descrita para acuíferos polares. Lawson, 1998, sostiene que la variación de condición de suelo congelado a no congelado puede ser abrupta y sin manifestación superficial. Las superficies superiores y basales, así como los límites laterales de los materiales subsuperficiales permanentemente congelados, poseen un relieve altamente irregular. Combinado con la impermeabilidad del permafrost, estas características pueden afectar significativamente el movimiento del agua subterránea. Además sostiene que las zonas con capa activa delgada inhiben la comunicación entre los acuíferos ubicados por encima del permafrost y el movimiento subsuperficial del agua.

La figura N°3 presenta los valores de conductividad y su evolución diaria en los freáticos de las áreas con red de flujo integrada durante el periodo estival. Los valores de conductividad medidos evidencian elevados valores de concentración salina, que aumentan progresivamente a medida que los factores climáticos son menos favorables. El acuífero libre estival posee valores entre 3300 - 13160 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el pH de las aguas varía entre 6,91 - 8,15 y la temperatura del agua osciló entre 0,5° hasta -2,5°C sin llegar a congelarse a consecuencia de su elevada salinidad. La esflorescencia de sales en la superficie de diversas áreas de la meseta podría justificarse por este mecanismo.

Esta característica parecería contradictoria con uno de los mecanismos de recarga a partir de la ablación de precipitaciones nívicas, que haría esperar aguas del acuífero de menor salinidad. Una interpretación posible de este fenómeno, sometida a una futura investigación, puede relacionarse con la cercanía al mar y la intensa nubosidad del área de la meseta durante el verano. La consecuencia sería el arrastre de sales que se incorporan al acuífero libre estival por infiltración vertical durante la ablación.

Los rangos de conductividad hidráulica y porosidad de la Formación Weddell (1.6 y 7.5 cm/hora y 37.7-63.7%, respectivamente; Godagnone, comunicación personal), la rápida infiltración del agua, su ascenso y descenso a consecuencia de las temperaturas cercanas al punto de congelamiento y la poca integración de la piezometría local conducirían a un enriquecimiento local en sales. No se descarta el aporte salino consecuente del mayor tiempo de contacto con el material de la Formación Weddell. Es probable que ambos mecanismos actúen en forma conjunta.

Los valores de pH determinan aguas ligeramente alcalinas con límites normales o similares a regiones climáticas más templadas.

VINCULACIONES ENTRE LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y LOS FACTORES CLIMÁTICOS

Durante el periodo estival de monitoreo se registraron la temperatura, conductividad y pH del agua subterránea en los freáticos, juntamente con datos meteorológicos de temperaturas de aire, suelo, precipitación nival e insolación a partir de la estación meteorológica de Base Marambio.

Con el objeto de determinar una posible correlación lineal de los parámetros climáticos con la conductividad del acuífero estival, se aplicaron los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman. Quedó evidenciado que los valores de los coeficientes empleados son inferiores al valor mínimo que permite considerar cierta correlación entre variables. De esto se deduce que, o bien no existe una clara correspondencia entre los parámetros climáticos y la salinidad del acuífero libre estival, o el muestreo no es lo suficientemente significativo como para permitir determinar dicha correlación.

Considerando la evolución de la conductividad media a lo largo del periodo estival, y al compararla con las variaciones climáticas, se observa que, a temperaturas medias diarias cercanas a los -3°C a $-3,5^{\circ}\text{C}$, el acuífero libre deja de cumplir con la ley de Darcy y pasa a formar parte de los procesos relacionados con la capa activa / permafrost. Al aumentar las temperaturas medias diarias, el sistema se activa con valores de conductividad de magnitud comparable a la instancia previa al congelamiento, (ver figura N°4), lo cual constituye la expresión más importante del control climático sobre el sistema.

Durante el periodo estival se monitorearon (conductividad, pH, mayoritarios y metales pesados), los cuerpos de agua más importantes sobre la meseta de la Isla Marambio, que capturan gran parte del escurrimiento superficial de la meseta en la zona edificada de la base.

Las aguas de estos cuerpos provienen fundamentalmente del escurrimiento superficial, consecuente de la ablación local. Por ello, poseen una salinidad menor que el sistema subterráneo. Los valores de conductividad media mínimos en los embalses fueron de $325,44 \mu\text{S/cm}$ y SD: $18,64 \mu\text{S/cm}$, mientras que los de conductividad media máxima fueron de $590,04 \mu\text{S/cm}$ SD: $37,65 \mu\text{S/cm}$. El pH de las aguas toma valores medios entre $8,20 - 8,25$ SD: $0,29$.

La presencia de agua en los cursos fluviales temporarios 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 éste es bisectado por los cauces (Fresina, et.al., 1999). La ablación

de las precipitaciones níveas invernales constituye un evento hídrico que suele ocurrir durante la primavera, en un lapso relativamente breve de tiempo. Durante gran parte del periodo 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. En estas condiciones, las cuencas hídricas tienen, en su desembocadura, caudales muy variables (entre 6m³/h hasta 180 m³/h), con conductividades de entre 3500 a 6000 μ S/cm (aguas salobres). Estos valores varían a lo largo del día, en relación estrecha con los parámetros meteorológicos de temperatura, insolación y precipitaciones níveas (Sánchez y Silva Busso, 1999). La presencia de aguas salobres en los cauces bajos y variables caudales son indicadores de un aporte subsuperficial, como un proceso dominante durante el verano.

La presencia de aguas de baja salinidad en los embalses y la influencia climática expuesta anteriormente, apoyaría la hipótesis de que el mecanismo de infiltración vertical y el proceso de congelamiento-ablación del mismo son los que poseen mayor incidencia sobre la concentración salina del acuífero estival. El concepto de lavado de sales que podría aportar el sedimento, a consecuencia de su origen glaciomarino, sería un fenómeno subordinado.

INFERENCIAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PROFUNDO. SECCIÓN INFRA-PERMAFROST

La determinación del espesor y base del permafrost ha sido objeto de diversos estudios geofísicos (Fournier, et.al., 1990; Mamani et.al., 1998), que han interpretado estos límites o espesores en base a características resistivas de diferentes horizontes en profundidad. Debe considerarse que estos métodos son indirectos y la ausencia de perforaciones profundas dificulta una correlación adecuada entre la geofísica y la hidrogeología infrapermafrost .

El límite inferior o base del permafrost estaría en relación con el gradiente geotérmico regional, que, asumiéndolo cercano a 0,030 °C/m, Custodio y Llamas, (1983), determinaría que la base del permafrost se encontraría a una profundidad de 220 metros, aunque los métodos geoeléctricos y magnetoteléuticos definen profundidades no mayores que 127 metros, Fournier et.al., (1990). De considerar este último valor, el gradiente geotérmico local sería elevado (aprox.0,06°C/m).

A partir de datos de temperatura de los primeros metros del permafrost, y considerando el mismo gradiente de Fournier, et.al., (1990), Fukuda et.al., (1992) estiman

que las profundidades de la base del permafrost se encontrarían muy cercanas a 200 m en la Meseta y a 105 m en la submeseta, aunque también consideran que es difícil determinar el límite inferior del permafrost a partir de la prospección geoelectrica.

Los tendidos geoelectricos realizados hasta el momento no han alcanzado la profundidad necesaria como para llegar a la base del permafrost. En este estudio se propone considerar la presencia de niveles saturados a profundidades relativamente bajas, ya que el contenido salino de las aguas, conjuntamente con la carga litostática, podría provocar que la base del permafrost se encontrase por encima de la isoterma de 0°C. Esto podría explicar la diferencia observada entre las interpretaciones geofísicas llevadas a cabo hasta el momento y la interpolación a través del gradiente geotérmico.

El permafrost tiene importancia como nivel poco permeable, que funcionaría como confinante de posibles niveles acuíferos en profundidad, los cuales se alojarían en las facies más permeables de la Formación La Meseta por debajo del permafrost. La Formación La Meseta se encontraría en un valle bisectado de dirección Oeste-Este relleno por sedimentos fundamentalmente psamíticos de origen marino presumiblemente psefíticos hacia la base y de origen fluvial hacia la base, con un espesor no menor que 600 metros, y cuyo eje de sedimentación en la zona central de la cuenca puede tener una inclinación de 4 a 6 grados hacia el este (Marenssi, 1995).

La presencia de niveles saturados en profundidad puede deberse a motivos como la presencia de aguas conatas o "viejas", un posible grado de conexión hidráulica con el mar, o bien a cierto grado de goteo a partir de posibles anomalías en el permafrost. Lawson, 1998, sostiene que el permafrost puede presentar anomalías debidas a variaciones litológicas, las cuales, a su vez, pueden permitir la presencia de sectores con agua, con mayor o menor conexión vertical y horizontal.

Según Custodio y Llamas, (1983), se estima que las aguas contenidas en los posibles niveles acuíferos infrapermafrost, en base a los posibles orígenes considerados, serían, al menos, salobres.

La Figura N°5, presenta una propuesta de esquema hidrogeológico regional para el área de la Isla Marambio que incluiría los posibles límites suprapermast e infrapermafrost en base a la información disponible en la actualidad.

CONCLUSIONES

- El modelo hidroclimático regional propuesto por (Tolstijin y Kiriujin 1978, en Mijalov, 1989) encuentra expresión en la interpretación del sistema hídrico de la región. Pudiendo

identificarse el acuífero libre estival (Formación Weddell) en la sección suprapermafrost e inferir niveles saturados (Formación La Meseta) en la sección infrapermafrost.

- Durante el periodo estival se reconoce la activación de un nivel saturado con un comportamiento acuífero contenido en la parte superior de la Formación Weddell por encima del Permafrost, en el área de la meseta.

- Dichos niveles acuíferos poseen la características de un acuífero libre, con un drenaje mal integrado y una elevada conductividad hidráulica vertical. Se comprobó la existencia de aguas con elevados contenidos salinos (3000 a 18000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y distribución aleatoria en la meseta.

- El control climático sobre el acuífero libre tiene mayor influencia sobre su comportamiento hidráulico, recarga y ocurrencia, que sobre las características químicas. Se comprobó que los elevados valores de conductividad no tiene correlación con los parámetros climáticos.

- Un mecanismo probable relacionado con los elevados tenores de salinidad, sometida a una futura investigación, puede relacionarse con la cercanía al mar y la intensa nubosidad del área de la meseta durante el verano. La consecuencia sería el arrastre de sales que se incorporan al acuífero libre estival por infiltración vertical durante la ablación y procesos de activación y desactivación del acuífero.

- La hidrología superficial durante el periodo estival recibe su principal aporte de la descarga del acuífero libre al bisectar los cauces, confiriendo una elevada salinidad a las aguas (3000 a 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y caudales 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. Los factores climáticos como temperatura e insolación si, ejercen una influencia notoria sobre la hidrología superficial.

- Las características hidrogeológicas analizadas y los mecanismos propuestos están en directa relación con la vulnerabilidad y el riesgo potencial de una carga contaminante. De esto se deduce la importancia del conocimiento del sistema hidrogeológico para determinar la dinámica de una carga contaminante potencial, dado que su movilidad ocurre a través de la activación del sistema hidrológico superficial-subterráneo.

- Las actividades de la Base Marambio, especialmente la instalación y funcionamiento de edificios (como fuentes de generación de calor), puede tener influencia sobre el comportamiento del sistema hidrogeológico.

- En base a estudios previos sobre la Formación La Meseta, se realizó un análisis estratigráfico y estructural de la región, con miras a estimar un posible comportamiento hidrogeológico profundo. Se considera que hacia la base de la Formación La Meseta en la Sección Infrapermafrost, estarían dadas las condiciones que permitirían la existencia de niveles saturados, que eventualmente pueden tener un comportamiento acuífero con posibilidades recarga lejana en el mar.

- A la luz de la información existente, el permafrost es considerado una unidad poco permeable. Hacia la base o límite inferior podría tener el comportamiento de un acuitardo a consecuencia de la fusión parcial. Esta especulación le conferiría cierto grado de aporte.

- Todas las estimaciones hidrogeológicas profundas en la Sección Infrapermafrost están sujetas a futuros estudios en base a perforaciones. Una perforación de estudio constituye la única posibilidad que permita ajustar el modelo hidrogeológico propuesto. Esto contribuiría a un futuro estudio de captación y abastecimiento de agua a la Base Marambio.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AGRAZ J.L, R.A.SÁNCHEZ, C.A.RINALDI, y J.M. ACERO, 1998. Revisión Ambiental de las Actividades Argentinas en Base Marambio. Dirección Nacional del Antártico, Instituto Antártico Argentino

CUSTODIO E.y M.R. LLAMAS, 1983. Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.

ELLIOT D.H. y T.A.TRAUTMAN, 1982. Lower Tertiary strata on Seymour Island, Antarctic Peninsula. Craddock (de) Antarctic Geoscience University of Wisconsin, press, Madison. pp 287-297.

FRESINA M., SANCHEZ, R., SILVA BUSSO, A, 1999. Aproximación metodológica al monitoreo del ambiente hídrico en Isla Marambio, Antártida. Comité Argentino para la Investigación del Cuaternario (CADINCUA). Vol: 1, (en prensa).

FOURNIER, H.G., E.M. BUK and A.E.CORTE, 1990. Three Permafrost Conditions Indicated by Geophysical Soundings in Tertiary Sediments at Seymour Island, Antarctic Peninsula. Cold Regions Science and Technology, 17 pag: 301-307.

FUKUDA M, J. STRELIN, K. SHIMOCAWA, N. TAKAHASHI, T. SONE AND D. TROMBOTT, 1992. Permafrost Occurrence of Seymour Island and James Ross Island, Antarctic Peninsula. Recent Progress in Antarctic Earth Science, Edit: Yoshida et.al., pp 745-750. Tokyo, Japan.

- GODAGNONE R. E., 1999. Suelos Antárticos Clasificación Taxonómica y Cartografía. Convenio DNA-INTA. Instituto Antártico Argentino, Dirección Nacional del Antártico.
- LAWSON D.E., S. A. ARCONI, A. J. DELANEY, J. D. STRASSER, J. C. STRASSER, C. R. WILLIAMS AND T. J. HALL, 1998. Geological and Geophysical Investigations of the Hydrogeology of Fort Wainwright, Alaska. Part II: North-Central Cantonment Area. Cold Regions Research & Engineering Laboratory Report 98-6. US Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire.
- LAWSON D.E., J. D. STRASSER, J. C. STRASSER, S. A. ARCONI, A. J. DELANEY and C. R. WILLIAMS, 1996. Geological and Geophysical Investigations of the Hydrogeology of Fort Wainwright, Alaska. Part I: Canol Road Area. Cold Regions Research & Engineering Laboratory Report 98-6. US Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire.
- LAWSON D.E., J.C. STRASSER, and J.M. DAVI, 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.
- MARENSSI S., 1995. Sedimentología y Paleoambientes sedimentarios de la Formación La Meseta, Isla Marambio, Antártida. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Inédita.
- MAMANI M., D. TRAD, B. CASTIGLIONE, 1998. Investigación Geoelectromagnética en la Isla Marambio, Antártida. Cuartas Jornadas sobre Investigaciones Antárticas. Segundo Tomo (p.387-395). Dirección Nacional del Antártico. Instituto Antártico Argentino.
- TOLSTIJIN, N.I., V.A. KIRIUIJIN, 1978 (en Mijalov, 1989) Introducción a la Hidrogeología Regional. Editorial LGI, Moscú, Rusia.
- NET L. Y S. MARENSSI, 1999. Petrografía de las areniscas de la Formación La Meseta (Eoceno), Isla Marambio, Antártida. Cuartas Jornadas sobre Investigaciones Antárticas. Segundo Tomo (p.343-347). Dirección Nacional del Antártico. Instituto Antártico Argentino.
- ORELLANA, E. 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Editorial Panarinfo, Madrid, España.
- RINALDI C.A, A. MASSABIE, J. MORELLI, L.H. ROSENMAN y R.A. DEL VALLE, 1978. Geología de la Isla Vicecomodoro Marambio, Antártida. Contribución Instituto Antártico Argentino, Bs.As.:1-37.

SÁNCHEZ R. y SILVA BUSSO A., 1999. Determinación del comportamiento hidrogeológico subsuperficial en el área de Base Marambio, Antártida. Inédito

USDA, 1999. Keys to Soil Taxonomy, Unites States of Departament of Agriculture. Natural Recourses Conservation Service. 9th Edition, USA.

ZINSMEISTER W. J. y T. de VRIES, 1983. Quaternary glacial marine deposits on Seymour Island. Antarctic Journal of the United States, 18: 64-65.

FIGURAS CITADAS EN EL TEXTO

Figura N°1. Mapa de ubicación del área de estudio

Figura N°2. Mapa Hidrogeológico del área de la meseta

Figura N°3. Varaiación de la conductividad del Acuífero libre en el área de la meseta.

Figura N°4. Relación entre la evolución de la salinidad del acuífero libre estival y los parámetros meteorológicos durante parte del periodo estival de 1999

Figura N°5. Esquema hidrogeológico regional en la Isla Marambio y Clasificación Hidroclimática de Acuíferos.

FIGURAS CITADAS EN EL TEXTO

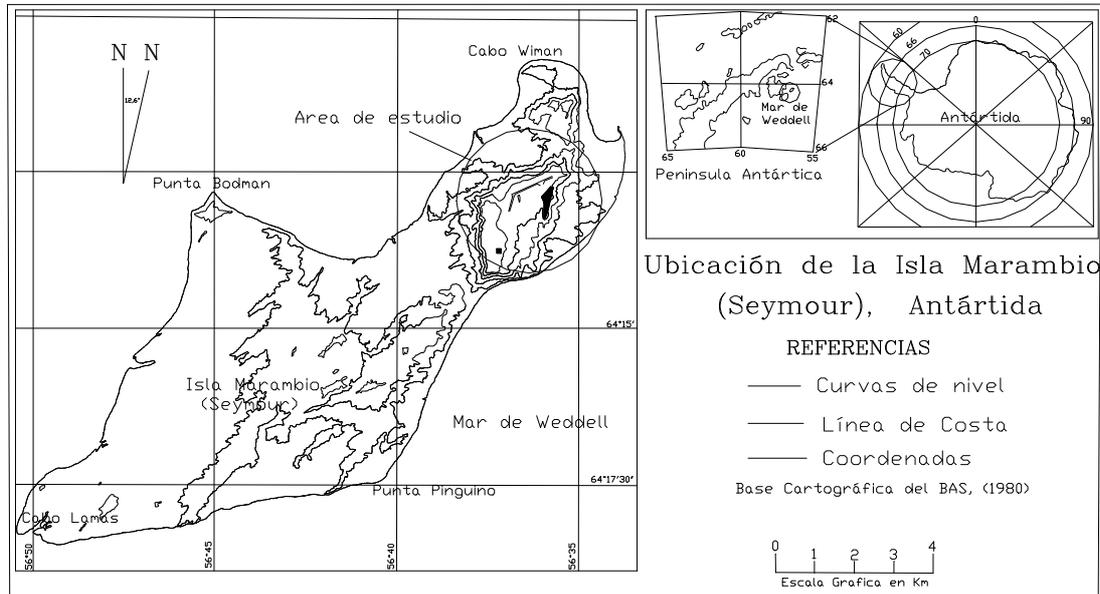


Figura N°1. Mapa de ubicación del área de estudio

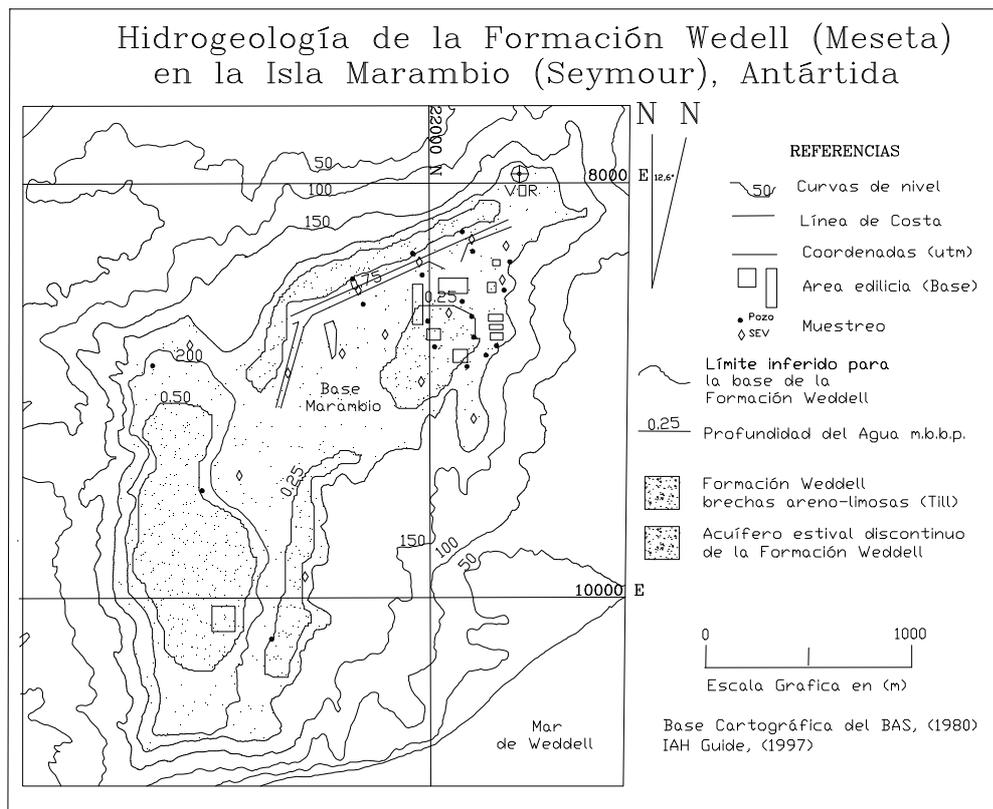


Figura N°2. Mapa Hidrogeológico del área de la meseta

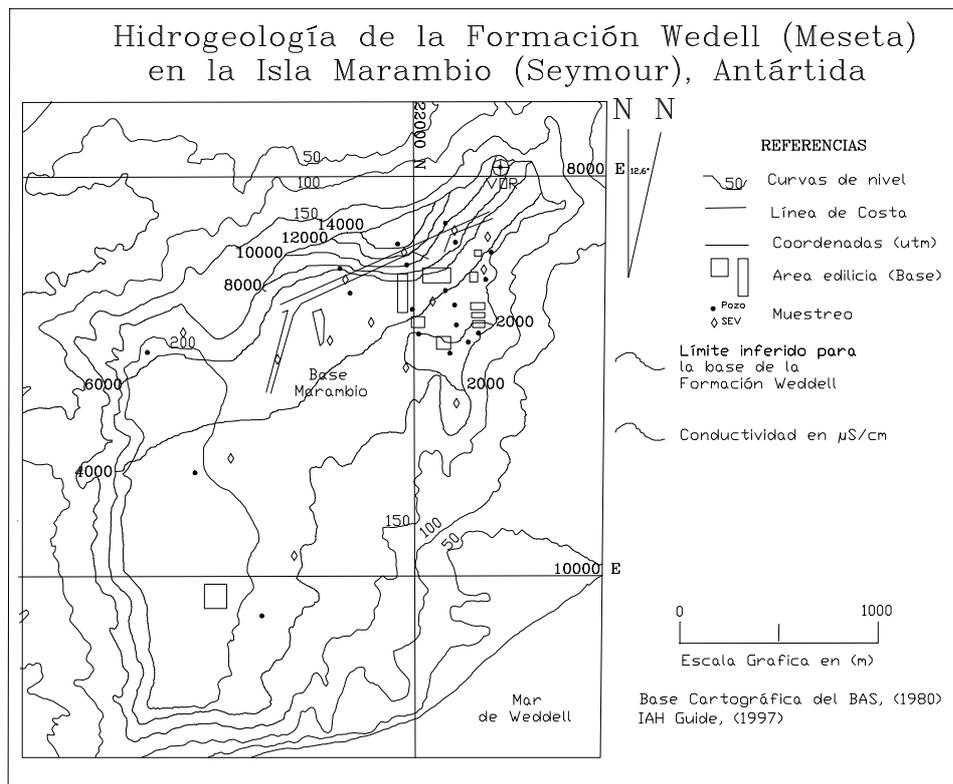


Figura N°3. Varaiación de la conductividad del Acuífero libre en el área de la meseta.

Oscilaciones de la Conductividad media del agua subterránea y las temperaturas del periodo estival 98-99.

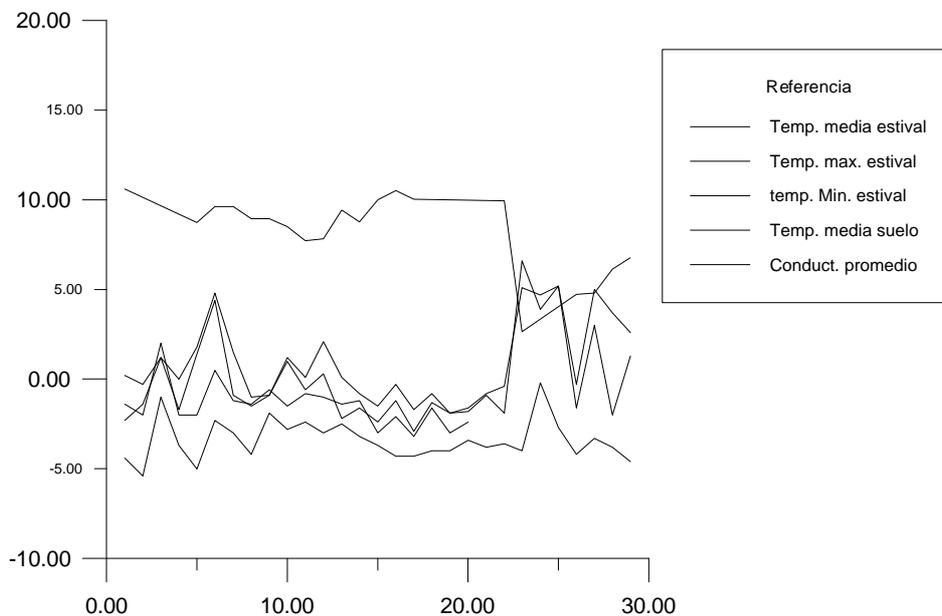


Figura N°4. Relación entre la evolución de la salinidad del acuífero libre estival y los parámetros meteorológicos durante parte del periodo estival de 1999

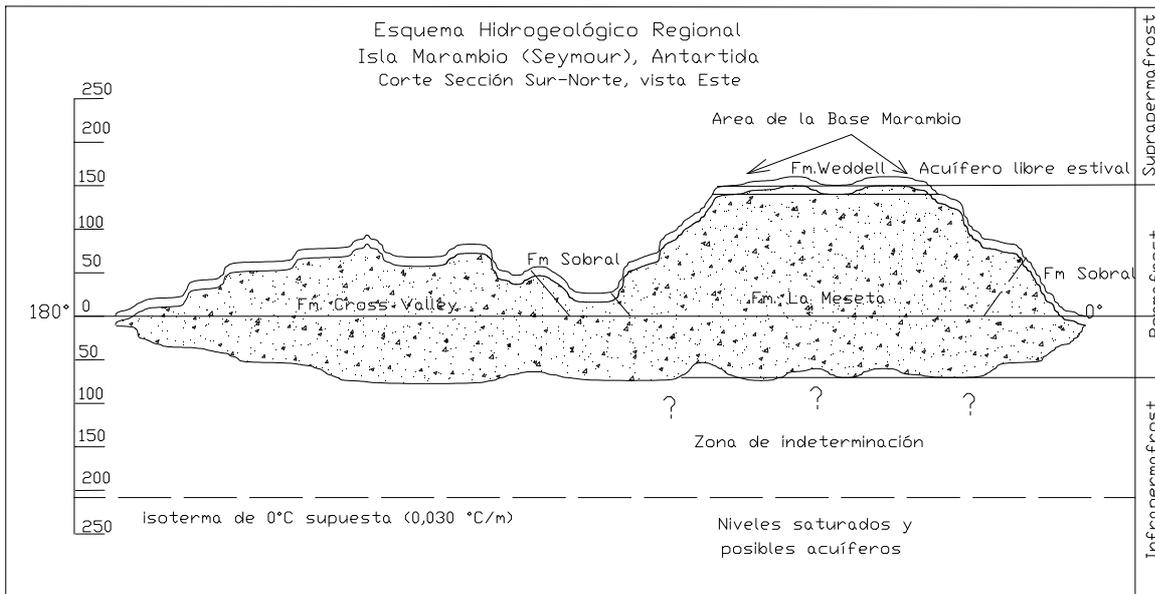


Figura N°5. Esquema hidrogeológico regional en la Isla Marambio y Clasificación Hidroclimática de Acuíferos.

Sección Supra-Permafrost	Acuífero Libre Estival (Capa Activa)	205
Meseta >200 m	Suelo Congelado Permanente (Nivel poco permeable)	
Permafrost	Nivel del Mar (0m)	-55
Sección Infra-Permafrost	Zona saturada permanente Niveles Acuíferos (?)	

Figura N°6. Cuadro hidrogeológico regional en la Isla Marambio y Clasificación Hidroclimática de Acuíferos.